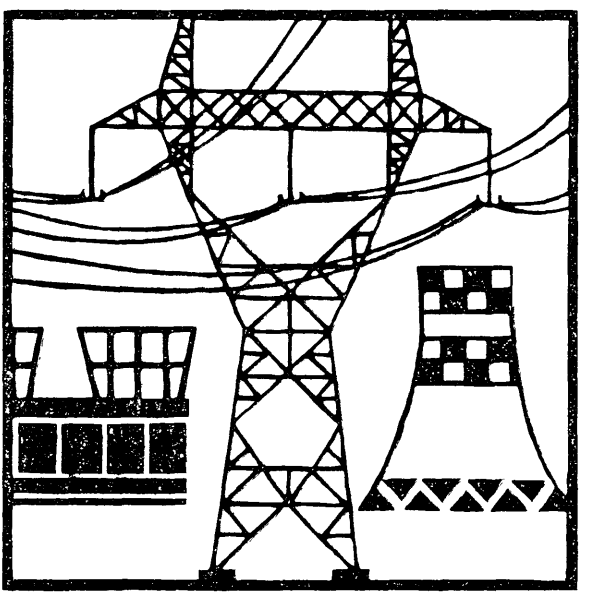
В.С. ПОНОМАРЕНКО Ю.И. АРЕФЬЕВ

ГРАДИРНИ промышленных и энергетических предприятий



ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Фролов Ю.Д
ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО

В.С. ПОНОМАРЕНКО Ю.И. АРЕФЬЕВ

ГРАДИРНИ промышленных и энергетических предприятий

Под общей редакцией доктора технических наук
В. С. ПОНОМАРЕНКО

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1998

УДК 621.175:628.179
ББК 38.761
П 56

Рецензент В. А. Трубников

Книга вышла при финансовой поддержке ООО "ЭКО-сервис К"

Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И.

П 56 Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие/ Под общ. ред. В. С. Пономаренко. – М.: Энергоатомиздат: 1998. – 376 с.: ил.
ISBN 5-283-00284-5

Дана классификация охлаждающих систем оборотного водоснабжения промышленных и энергетических предприятий. Рассмотрены теоретические основы процесса охлаждения воды в градирнях и методы их технологических расчетов. Приведены новые расчетные зависимости. Рассмотрены особенности эксплуатации градирен в различных условиях, приведены исходные данные для расчетов надежности и технико-экономической и эколого-экономической оценки градирен и отдельных конструкций.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, эксплуатацией и исследованием градирен и систем оборотного водоснабжения промышленности и энергетики, а также преподавателей и студентов строительных и энергетических вузов.

ISBN 5-283-00284-5

© Авторы, 1998

ПРЕДИСЛОВИЕ

В развитие теории и практики градирен в свое время значительный вклад внесли отечественные ученые и проектировщики – В. Е. Андрианов, А. Г. Аверкиев, Л. Д. Берман, А. Ф. Володин, В. А. Гладков, А. А. Гоголин, Б. В. Проскуряков, Б. С. Фарфоровский, Т. С. Ямпольский и др.

Градирня – это сооружение (аппарат) для охлаждения воды атмосферным воздухом.

В промышленности и энергетике охлажденной на градирнях оборотной водой осуществляется конденсация отработавшего пара и газообразных продуктов, охлаждение жидких продуктов, а также оборудования и механизмов в целях предохранения их от быстрого разрушения под влиянием высоких температур.

От эффективности работы градирен зависит степень реализации преимуществ систем оборотного водоснабжения в техническом и экологическом аспектах в сравнении с прямоточными системами, а также производительность технологического оборудования, качество и себестоимость вырабатываемой продукции, удельный расход сырья, топлива и электроэнергии.

Потребность в справочном материале для проектирования и реконструкции этих сооружений назрела давно. Однако по разным причинам справочники такого рода не выпускались и специалистам приходилось руководствоваться разрозненными статьями, публикуемыми, к тому же весьма редко, в периодических журнальных изданиях.

Последний нормативный документ по вентиляторным и башенным градирням, вышедший в свет в 1989 г., – это пособие по проектированию градирен к СНиП 2.04.02–84 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения" (далее см. пособие). Однако к 1992–93 гг. пособие практически исчерпало себя. За время, прошедшее от подготовки его к изданию, были усовершенство-

ваны методы технологических расчетов градирен, накоплены обширные данные по их эксплуатации и промышленным испытаниям, по результатам работ НИИ ВОДГЕО и ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева выполнены проекты целого ряда модификаций вентиляторных и башенных градирен большой производительности с улучшенными технологическими характеристиками, получили развитие разработка и изготовление малогабаритных градирен полной заводской готовности. В то же время многие конструкции градирен устарели по технологическим данным или не могут быть применены из-за возникшего дефицита дерева и асбестоцемента, являющихся ранее одними из основных строительных материалов в конструкциях градирен.

Период 1987–92 гг. характерен интенсивным переходом на применение в конструкциях градирен полимерных материалов и освоением производств по выпуску из них необходимого технологического оборудования.

Основное содержание настоящего справочного пособия составляют материалы по расчетам и выбору различных типов градирен и их элементов для конкретных условий эксплуатации систем оборотного водоснабжения, представленные с учетом последних разработок в этой области в нашей стране.

Значительное внимание в пособии уделено вопросам работы градирен в технических системах водоснабжения. Становятся все более актуальными проблемы обеспечения надежности технических систем водоснабжения, в особенности некоторых химических производств и АЭС, достаточно полно отраженные в справочном пособии. Кроме того, представлены необходимые данные для определения в каждом конкретном случае рационального состава сооружений оборотных систем, в том числе вида, конструкций градирен и материалов для их изготовления, а таже режима эксплуатации оборотных систем на основании технико-экономических и эколого-экономических расчетов вариантов.

Справочное пособие не может претендовать на исчерпывающий охват всех интересующих практиков вопросов, касающихся разработки и эксплуатации градирен в охлаждающих системах оборотного водоснабжения.

Оно составлено в основном на базе научных исследований, выполненных в НИИ ВОДГЕО (директор акад. РАН С. В. Яковлев).

Основные условные обозначения даны в начале пособия, остальные приводятся в тексте. При этом авторы пытались сохранить обозначения в формулах, предложенные в предыдущих изданиях. В связи с чем некоторые символы имеют несколько значений. Однако мы надеемся, что это не слишком усложнит пользование пособием, поскольку они относятся к разным разделам текста и даны необходимые пояснения.

Материалы справочного пособия подготовили: В. С. Пономаренко – гл. 1, 2, 9, 12, 13, 15, 17, § 6 гл. 16 и приложения; Ю.И. Арефьев – гл. 3, 4, 6, 7, 10, 11 и § 1–5 гл. 16. Главы 5, 8 и 14 написаны авторами совместно. Общее редактирование выполнено доктором техн. наук В. С. Пономаренко.

Большую помощь в подготовке и оформлении рукописи оказали сотрудники НИИ ВОДГЕО Л. П. Беззатеева и Т. М. Демкина, за что авторы выражают им искреннюю благодарность. Авторы также выражают глубокую признательность генеральному директору ООО "Эко-сервис К" В. А. Богомолову за содействие в издании справочного пособия.

Все замечания и предложения по содержанию книги, за которые авторы заранее признательны, просьба направлять в НИИ ВОДГЕО по адресу: 119826, Москва, Комсомольский проспект, 42; или в ООО "Эко-сервис К" по адресу: 111395, Москва, ул. Молдагуловой, 4, кв. 23.

Авторы

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$c_{вл}$, $c_{п}$, $c_{в.с}$ – удельные теплоемкости соответственно влажного воздуха, водяного пара, сухого воздуха, Дж/(кг · К) [ккал/(кг · °С)]

$c_{ж} = 4{,}19$ кДж/(кг · К) [1 ккал/(кг · °С)] – удельная теплоемкость воды

$F_{ор}$ – площадь орошения градирни, м²

g – ускорение свободного падения, м/с²

$G_{в}$ – подача воздуха вентилятором, кг/ч (кг/с)

$G_{об}$ – расход оборотной воды, м³/ч

$G_{ж}$ – гидравлическая нагрузка на градирню, кг/ч (кг/с)

$G_{и}$ – количество испарившейся воды, кг/ч (кг/с)

h – высота оросителя градирни, м

i – удельная энтальпия (теплосодержание) воздуха, Дж/кг (ккал/кг)

i_1, i_2 – удельные энтальпии воздуха в ядре потока при входе в градирню и выходе из нее, Дж/кг (ккал/кг)

i'' – удельная энтальпия насыщенного воздуха, Дж/кг (ккал/кг)

i''_1, i''_2 – удельные энтальпии насыщенного воздуха у поверхности воды на входе в градирню и выходе из нее, Дж/кг (ккал/кг)

i_m – удельная энтальпия насыщенного воздуха у поверхности воды при ее средней температуре, Дж/кг (ккал/кг)

$\Delta i_{ср}$ – средняя разность удельных энтальпий воздуха, Дж/кг (ккал/кг)

K – поправочный коэффициент в упрощенном уравнении теплового баланса

P, $P_{д}$, $P_{ст}$ – полное, динамическое и статическое давления, развиваемые вентилятором, Па (мм вод. ст.)

$P_{б}$ – барометрическое давление, мм рт. ст.

$P_{п}$, $P''_{п}$ – парциальные давления пара во влажном и насыщенном воздухе, Па (кг/м²)

ΔP – потери полного давления в оросителе, Па (мм вод.ст.)

$q_{в}$ – массовая скорость воздуха, кг/(м² · ч)

$q_{ж}$ – плотность орошения градирни, м³/(м² · ч) [кг/(м² · ч)]

$q_{ун}$ – капельный унос воды из градирни, % от $G_{ж}$

$R_{в.с} = 287{,}1$ кДж/(кг · К) [29,27 кг · м/(кг · °С)] – газовая постоянная сухого воздуха

$R_{п} = 461{,}6$ кДж/(кг · К) [47,06 кг · м/(кг · °С)] – газовая постоянная пара

$r = 2493$ кДж/кг (595 ккал/кг) – удельная теплота парообразования

t_1, t_2 – температуры воды на входе в градирню и выходе из нее, °С

$\Delta t = t_1 - t_2$ – перепад температур воды, °С

$t_{ср} = (t_1 + t_2)/2$ – средняя температура воды, °С

x – влагосодержание воздуха, кг/кг

x'' – влагосодержание насыщенного воздуха, кг/кг

x_1, x_2 – влагосодержания насыщенного воздуха на входе в градирню и выходе из нее, кг/кг

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К) [ккал/(м² × × ч · °С)

β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м³ · ч · кг/кг)

A – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние конструктивных особенностей оросителя на его охлаждающую способность, 1/м

m – показатель степени, характеризующий зависимость объемного коэффициента массоотдачи от изменения массовой скорости воздуха

$\lambda = q_{в}/q_{ж}$ – отношение массового расхода воздуха к расходу воды, кг/кг

Me – безразмерный критерий Меркеля

$\gamma_{в}$ – плотность атмосферного воздуха, кг/м³

$\gamma_{ж}$ – плотность воды, кг/м³

ζ – коэффициент сопротивления градирни

ϑ, τ – температуры атмосферного воздуха по сухому и смоченному термометрам, °С

φ, φ'' – относительные влажности атмосферного и насыщенного воздуха, %

V – объем оросителя градирни, м³

ω – скорость воздуха в оросителе, м/с

$\zeta_{с.о}$ – коэффициент сопротивления сухого оросителя

$K_{ор}$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние плотности орошения на аэродинамическое сопротивление оросителя

ГЛАВА 1

ГРАДИРНИ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

1.1. Охлаждение воды в промышленности

Системы промышленного водоснабжения предназначены обеспечивать подачу воды на производство в требуемых количествах и соответствующего качества. Они состоят из комплекса взаимосвязанных сооружений – водозаборных устройств, насосных станций, водоводов, установок для очистки и улучшения качества воды, регулирующих и запасных емкостей, охладителей воды и разводящей сети трубопроводов. В зависимости от назначения и местных условий некоторые из перечисленных сооружений в системе могут отсутствовать.

По данным государственного учета использования воды промышленностью Российской Федерации расходуется в год примерно 40 км^3 свежей воды, что составляет 50% общего количества, забираемого для нужд народного хозяйства из источников водоснабжения. Это равняется примерно 20% потребности промышленных предприятий в воде. Недостающее количество (160 км^3) обеспечивается за счет повторного использования воды после охлаждения и (или) очистки. Такая вода называется оборотной или циркуляционной.

В зависимости от вида технологического процесса оборотная вода может быть транспортирующей или поглощающей средой (использование воды в таких качествах в данной работе не рассматривается), либо теплоносителем, циркулирующим в охлаждающей системе оборотного водоснабжения. Это система, в которой вода используется в качестве хладоагента для охлаждения оборудования или для конденсации и охлаждения газообразных и жидких продуктов в теплообменных аппаратах, где нагревается, а в некоторых случаях и загрязняется этими продуктами в основном за счет неплотностей оборудования. После охлаждения преимущественно на градирнях и очистки (при необходимости) основная масса воды возвращается в систему; часть оборотной воды (обычно не более 5%) теряется на испарение, капельный унос, утечки и сброс в виде продувки системы.

Для охлаждения различного рода технологического оборудования в России используется примерно 105–130 км^3 оборотной воды, что составляет в среднем по всем отраслям промышленности около 65% общего расхода воды этой категории.

Требования, предъявляемые к температуре оборотной воды различными промышленными предприятиями, диктуются технологическим процессом и эксплуатационными свойствами оборудования. При выборе типа градирен для обеспечения этой температуры следует учитывать возможность загрязнения воды продуктами производства в водооборотном цикле.

В табл. 1.1 приведены данные об использовании оборотной воды в промышленности, требования к ее температуре в летний период и наличии загрязнений. Количество загрязнений в воде не указано, поскольку оно для одного и того же вида производства может быть различным из-за неодинаковых состояния оборудования, уровня эксплуатации, наличия очистных сооружений в водоблоке и др. Водооборот в промышленности Российской Федерации в 1994–97 гг. составил в среднем 78%. Бóльшее значение этот показатель достигал в нефтеперерабатывающей отрасли, на предприятиях черной и цветной металлургии, а также нефтехимии.

Предприятия теплоэнергетической отрасли потребляют две трети свежей воды, забираемой на промышленные нужды из источников водоснабжения, при наибольшем расходовании ее для охлаждения технологического оборудования (96%). Однако коэффициент водооборота в отрасли ниже среднего по промышленности и составляет примерно 60% из-за сохранившихся с предыдущих лет на многих энергетических предприятиях прямоточных систем водоснабжения. Так, из 144 ТЭС с установленной мощностью 215 ГВт на прямоточных системах водоснабжения работают 45 и на оборотных 99. При этом для охлаждения оборотной воды используются водохранилища (54%), башенные градирни (14%), "сухие" (радиаторные) градирни (0,8%) и брызгальные бассейны (0,2%).

Вода в промышленности и энергетике используется для конденсации и охлаждения газообразных и жидких продуктов

Таблица 1.1. **Данные об использовании оборотной воды в промышленности и энергетике**

Отрасль	Расход воды на охлаждение, %	Водооборот, %	Расход оборотной воды на крупных предприятиях, тыс. $м^3/ч$	Температура воды, °С		Вид загрязнений
				нагретой в технологическом оборудовании	охлажденной на градирне	
Теплоэнергетическая	96	60	1000	37–45 *1	30–33	Условно чистая
				35–38 *2	30–33	То же
				35–40 *3	25–30	Нефтепродукты
Нефтеперерабатывающая	*95*	*94*	*100*	*40–45*	*25–28*	*Механические примеси, нефтепродукты*
Химическая и нефтехимическая	74–95	64–96	100	40–45	25–30	Органические, минеральные примеси
Черная металлургия	75	93	300 *4	40–45 *5	30–35	Механические примеси, нефтепродукты
				35–40 *6	25–28	То же
Цветная металлургия	20	91	5	35–40	25–30	”
Целлюлозно-бумажная	7	65	1	32–35 *7	25–27	Условно чистая
Предприятия легкой промышленности	–	–	6	35–36	27–28	”

*1 Конденсаторы паровых турбин. *2 Воздухоохладители обмоток генераторов. *3 Маслоохладители. *4 На комбинатах и заводах с полным металлургическим циклом. *5 *Холодильники доменных печей и др.* *6 *Воздухоохладители и* маслоохладители. *7 Конденсаторное оборудование.

химических и нефтехимических производств, для конденсации отработавшего пара после расширения его в паровых двигателях, отвода теплоты от маслоохладителей и оборудования в целях предохранения его от быстрого разрушения под влиянием высоких температур (например, цилиндров компрессоров, кладки производственных печей) и т. п.

Как следует из табл. 1.1, в зависимости от вида производства, требования, предъявляемые к температуре охлаждающей воды, различаются. Эти требования диктуются условиями производственных процессов и определяются экономичностью и надежностью работы оборудования.

На многих промышленных предприятиях эксплуатируются компрессорные установки. Для того, чтобы температура сжимаемого воздуха, выходящего из компрессора, не превышала допустимого для нормальной и безопасной работы предела 140–160 °С, используется его охлаждение. Чаще всего применяется водяное охлаждение рубашек компрессоров, при котором охлаждающая вода, прошедшая поверхностные холодильники компрессоров, после охлаждения на градирнях вновь используется.

Расход оборотной воды при температурном перепаде 10–25 °С рассчитывается таким образом, чтобы ее температура после поверхностных холодильников не превышала 45 °С из-за предупреждения выпадения солей временной жесткости и образования накипи на охлаждаемой поверхности.

Потребление свежей воды в промышленности в значительной мере может быть уменьшено за счет перехода производств на безотходные, безводные или маловодные технологии. Однако многие производственные процессы не всегда или не в полной мере позволяют использовать такие технологии. Тогда на первый план в реализации задачи экономии воды в промышленности вступают охлаждающие системы оборотного водоснабжения с градирнями различных типов и конструкций.

1.2. Технико-экономические и экологические аспекты применения градирен в системах промышленного водоснабжения

Градирни применяются почти во всех отраслях промышленности, особенно велико их использование в энергетической, химической, нефтеперерабатывающей, металлургической,

производства минеральных удобрений и других, поскольку на сегодняшний день отвод низкопотенциального тепла от промышленных аппаратов с помощью градирен – самый дешевый способ, позволяющий сэкономить не менее 95% свежей воды.

Особенностью многих производственных технологий является отбор тепла в широком интервале температур охлаждаемых продуктов. Общая система эвакуации тепла включает ряд стадий, на которых применяют различные технические средства.

В зоне высоких температур 300–900 °С тепло снимается в котлах-утилизаторах и используется в производстве в виде вторичного пара. В интервале 100–300 °С целесообразно использование технологического тепла в адсорбционных холодильных установках для приготовления искусственного холода различных параметров, в том числе холодной воды. Охлаждение продуктов от 100 до 50 °С экономичнее производить в воздушных холодильниках. Дальнейшее снижение температуры продуктов, например в нефтеперерабатывающей промышленности, с 50 до 30 °С производится при помощи оборотной воды, охлажденной, в свою очередь, на градирнях.

Для достижения еще более низкой температуры продукта применяются компрессионные или пароэжекционные установки. Из-за большого потребления электроэнергии такими установками отвод тепла от технологических продуктов становится в 10–15 раз дороже, чем с помощью оборотной воды. Экономия электроэнергии может быть достигнута за счет применения таких типов и конструкций градирен, которые способны охлаждать воду до более низких температур. Например, для отвода 4 млн. кДж/ч тепла компрессионным способом затраты электроэнергии составляют 250–300 кВт · ч, а для отвода этого же количества тепла с помощью вентиляторных градирен затрачивается 10–15 кВт · ч.

Температура оборотной воды, охлаждаемой на градирнях, существенно влияет на работу технологического оборудования, как следует из данных табл. 1.2.

Экологические проблемы работы градирен стали возникать по мере роста производительности этих сооружений и их числа на промышленной площадке, а также с приближением производственных объектов к жилой застройке и транспортным магистралям.

Таблица 1.2. **Влияние температуры оборотной воды на работу технологического оборудования**

Характер изменения температуры воды	Влияние на показатели работы оборудования
Снижение температуры воды, подаваемой на конденсаторы турбин КЭС, на 1 °С	Уменьшение на 1,2–2 г расхода условного топлива на выработку 1 кВт · ч электроэнергии
Повышение температуры воды, подаваемой на конденсаторы ТЭС, на 1 °С	Снижение вакуума в конденсаторах на 0,5%, что равноценно снижению мощности турбины на 0,4% или перерасходу пара на 0,5%
Снижение температуры воды, подаваемой на конденсаторы компрессионных холодильных станций, на 1 °С	Уменьшение на 2–4% расхода электроэнергии на привод компрессоров
Снижение температуры воды, подаваемой на конденсаторы пароэжекционных холодильных станций, на 7 °С (с 27 до 20 °С)	Уменьшение расхода пара с 3,4 до 2,1 т на 4 ГДж вырабатываемого холода
Снижение температуры воды при расчетах размеров теплообменной аппаратуры предприятий нефтехимии на 5 °С (с 30 до 25 °С)	Уменьшение на 23% площади поверхности охлаждения теплообменников и на 20% расхода металла на их изготовление
Снижение температуры воды на установке пиролиза нефти мощностью 340 тыс. т/год на 2,3 °С	Увеличение выработки топливно-энергетических ресурсов в год на 518 тыс. долларов США
Недоохлаждение воды в летний период относительно ее расчетной температуры на предприятиях по выработке химической продукции	Уменьшение среднегодовой выработки кальцинированной соды примерно на 3,4, аммиака – на 10, метанола – на 8, сернистого натрия – на 4,5, уксусной кислоты – на 11%

Градирни как источник возможного негативного влияния на состояние окружающей среды могут рассматриваться в следующих аспектах: унос капельной влаги, выброс вредных веществ, паровой факел и шум.

Проблемой предотвращения капельного уноса из градирен НИИ ВОДГЕО занимается с середины 60-х годов. Выполнен большой объем научно-исследовательских работ, разработаны методики оперативного измерения уноса капельной влаги на стендовых градирнях и в натурных условиях. На их основе

составлены нормативные требования по допустимым значениям капельного уноса из градирен. Разработаны рекомендации на проектирование и конструирование водоуловителей из различных материалов, многие из которых серийно изготавливаются.

При использовании городских и промышленных вод, а также сильно минерализованных природных вод (например, морской воды) градирни в некоторых случаях могут быть источником вредного воздействия на окружающую среду – атмосферу, почву, водные объекты. Совместно с организациями Минздрава РФ НИИ ВОДГЕО разработаны документы, регламентирующие применение указанных вод в охлаждающих системах оборотного водоснабжения и допустимые нормы содержания вредных веществ в капельном уносе и продувке, а также требования к водоуловителям градирен. Проблемами капельного уноса из башенных градирен занимается также ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.

Градирня как источник шума представляет собой сооружение, в котором шум может создаваться вентиляторной установкой с приводом преимущественно на низких и средних частотах, равных 63–500 Гц, и движением воды (шум дождя) на частотах 500–8000 Гц. По результатам исследований, выполненных совместно с НИИСтройфизика и ГПИСантехпроект, НИИ ВОДГЕО составлены вошедшие в нормативные документы шумовые характеристики всех основных видов градирен, применяющихся в стране. Совместно с ГПИСантехпроект разработан расчет шума градирен, размещаемых на территории жилой застройки.

Проблема парового факела (выпара) градирен возникла в нашей стране только в последние годы, т. е. значительно позже, чем в западных странах. Она решается путем использования мокро-сухих и сухих градирен. Этими вопросами занимаются организации Минэнерго РФ, ВНИИНефтемаш, принимает в них участие и НИИ ВОДГЕО.

Таким образом, градирни – не самое экологически опасное сооружение на промышленной площадке. При надлежащей эксплуатации и поддержании в исправном состоянии конструкций они не оказывают заметного влияния на состояние окружающей среды. В то же время применение градирен в составе охлаждающих систем оборотного водоснабжения обеспечивает экономию природной воды в 25–50 раз по сравнению с

прямоточными системами и предотвращает тепловое загрязнение водоемов.

Сравнительные технико-экономические и экологические показатели градирен по данным СНиП 2.04.02–84 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения" и по проектам Союзводоканалпроекта, ЛОАТЭП и Теплоэлектропроекта приведены в табл. 1.3. Экологические показатели в этой таблице определены по усредненным данным потерь воды и концентрациям загрязнений оборотной воды в промышленных оборотных системах. Экономические показатели приведены в ценах, действовавших до 01.01.1991 г.

Таблица 1.3. **Технико-экономические и экологические показатели градирен при охлаждении оборотной воды с температурой не более 45 °С**

Показатель	Тип градирен			
	вентиляторные	башенные	открытые (атмосферные)	радиаторные (сухие)
Технические				
Удельная тепловая нагрузка, кВт/м^2	93–175	70–120	35–60	0,25–2
Перепад температур воды, °С	3–20	5–15	5–10	5–10
Температура охлажденной воды (среднегодовая), °С	16–18	21–23	26–28	30–32
Глубина охлаждения воды $t_2 - \tau$, °С	4–5	8–10	10–12	20–35
Экономические				
Базовые удельные затраты на 1 м^2 площади градирен:				
капитальные, тыс. руб./м^2	0,3–0,8	0,7–1,1	0,3–0,7	2–3,3
эксплуатационные, тыс. руб./(м^2 · год)	0,2–0,9	0,07–0,21	0,1–0,2	0,26–1,0
Экологические				
Выбросы в окружающую среду, отнесенные к 1 м^3 охлаждаемой воды:				
тепла с паровым факелом, МДж/ч	12–80	20–60	20–40	20–40

Продолжение табл. 1.3

Показатель	Тип градирен			
	вентиляторные	башенные	открытые (атмосферные)	радиаторные (сухие)
воды с капельным уносом и продувкой, $м^3/ч$ (не более)	0,035	0,03	0,02	–
загрязнений с капельным уносом и продувкой, кг/ч, до:				
органических (комплекс)	0,01	0,007	0,007	–
минеральных солей	0,3	0,2	0,17	–
механических примесей	0,01	0,007	0,007	–
Потребление свежей воды, отнесенное к 1 $м^3$ охлаждаемой воды, $м^3/ч$ (не более)*	0,05	0,04	0,03	0,02**

* Без учета потерь оборотной воды, отбираемой из системы на технологические нужды.

** На увлажнение воздуха в наиболее жаркие дни.

1.3. Схемы промышленного водоснабжения с градирнями

Системы водоснабжения. Охлаждающие системы водоснабжения промышленных и энергетических предприятий могут быть: прямоточными, с повторным использованием воды, оборотными и комбинированными (рис. 1.1, *а–г*).

В соответствии со СНиП 2.04.02–84 выбор системы и схемы водоснабжения следует производить на основании сопоставления возможных вариантов их осуществления с учетом особенностей объекта или группы объектов, требуемых расходов воды на различных этапах их развития, источников водоснабжения, требований к напорам, качеству воды и обеспеченности ее подачи.

При прямоточных системах водоснабжения (рис. 1.1, *а*) вода, взятая из водоисточника, сбрасывается в него примерно в том же количестве за вычетом потерь в производстве, но с температурой в среднем на 8–12 °С выше. Основное преимущество систем прямоточного водоснабжения – их простота и низкая среднегодовая температура подаваемой на производство воды, соответствующая ее температуре в поверхностном водоисточнике (8–14 °С). Это имеет значение для производств, где более низкие температуры охлаждающей воды обеспечивают больший выход продукта и улучшают его качество.

Прямоточные системы водоснабжения сохранились преимущественно на некоторых старых предприятиях и электростан-

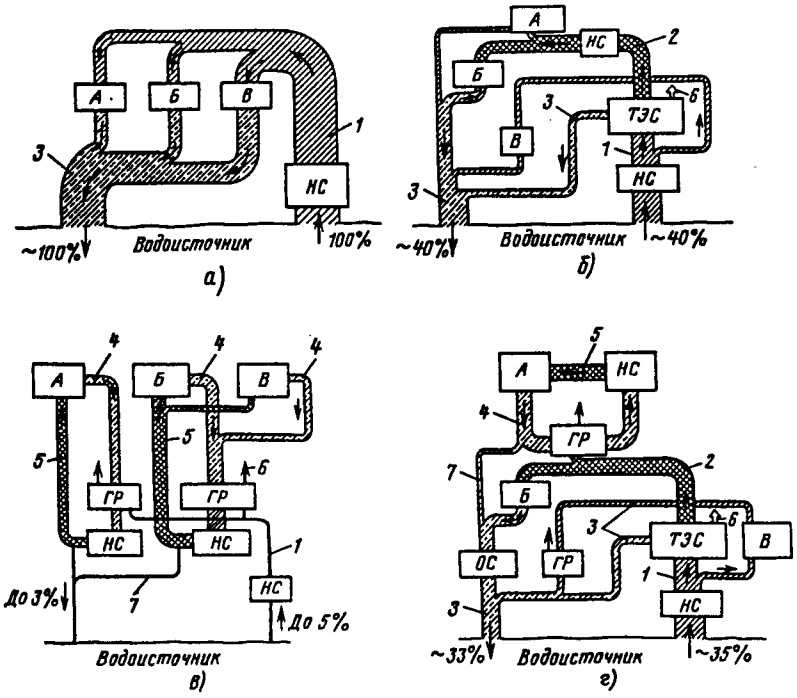


Рис. 1.1. Системы промышленного водоснабжения:

а – прямоточная; *б* – с повторным использованием воды; *в* – оборотная; *г* – комбинированная; *А, Б, В* – производства – потребители воды; *НС* – насосная станция; *ГР* – градирня; *ОС* – очистные сооружения; *1–5* – вода соответственно свежая, вторично используемая, отработанная, нагретая, охлажденная; *6* – безвозвратные потери; *7* – продувочная вода

циях и имеются в небольшом количестве на новых производствах, в основном использующих для охлаждения морскую воду (70% объема используемой теплоэнергетикой морской воды приходится на АЭС).

Ограниченное применение прямоточных систем водоснабжения обуславливается возрастающей напряженностью водохозяйственных балансов индустриальных районов, введением платы за воду в промышленности, а также трудностями с соблюдением нормативных требований по защите водоисточников от вредного теплового воздействия.

Допустимое санитарными нормами повышение температуры воды в расчетном створе водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования летом после сброса нагретой воды должно быть не более 3 °С, а для рыбохозяйственных водоемов – 5 °С в сравнении с естественной среднемесячной температурой воды на поверхности водоема в наиболее жаркий месяц года. Это требование не всегда может быть обеспечено при прямоточной системе водоснабжения.

На ТЭЦ и АЭС, например, в зависимости от типа турбин и вида топлива на каждый 1 кВт · ч выработанной электроэнергии с охлаждающей водой отводится от 4 до 8 кДж тепла. Этим обстоятельством обуславливается возможность применения прямоточной системы водоснабжения при расходе воды в водоисточнике в расчетных гидрогеологических условиях не менее 30 м^3/с на 1 млн. кВт установленной мощности тепловой электростанции.

Прямоточные системы становятся неэкономичными при значительных диаметрах и протяженности водоводов и неприемлемы при химическом загрязнении отработавшей воды, которую без специальной очистки нельзя сбросить в открытые водоисточники, но по условиям технологического процесса можно вновь использовать после охлаждения.

Система с повторным использованием воды (рис. 1.1, *б*) применяется, когда технически отработавшую воду можно последовательно использовать в ряде технологических процессов. Вторично или несколько раз использованная вода после очистки и (или) охлаждения, при необходимости, сбрасывается в водоисточник или направляется в оборотную систему.

Примером подобного решения схемы может служить использование нагретой воды после охлаждения конденсаторов паротурбинных установок для нужд других производств промышленного предприятия, нетребовательных к температуре охлаждающей воды. Потребность предприятия в свежей воде в сравнении с прямоточной системой заметно уменьшается, например, при использовании схемы, приведенной на рис. 1.1, *б*, на 60%. При этом, однако, нередко требуются промежуточные насосные установки между потребителями последовательно используемой воды.

СНиП 2.04.02–84 предписывает проектировать новые системы промышленного водоснабжения с оборотом воды (рис. 1.1, *в*). По составу сооружений система оборотного водоснабжения более сложная, чем прямоточная и с последовательным использованием воды, дороже в строительстве и эксплуатации, но позволяет резко (в 25–50 раз) снизить потребность предприятия в свежей воде и уменьшить не менее, чем в 80 раз сброс тепла в водоисточник (табл. 1.4).

Таблица 1.4. **Сравнительные показатели прямоточной и оборотной систем водоснабжения**

Показатель	Система водоснабжения	
	прямоточная	оборотная
Тепловая нагрузка, ГДж/ч	2000	2000
Расход охлаждающей воды, м^3/ч	50 000	50 000
Подача воды на промышленную площадку из водоисточника, м^3/ч	50 000	1500
Сброс воды в водоисточник, м^3/ч	Около 49 500	620
Среднегодовая температура охлаждающей воды, °С	8–14	20–25
Среднегодовая температура нагретой воды, °С	18–24	30–35
Безвозвратные потери воды, м^3/ч	–	1500
В том числе:		
на испарение на градирнях	–	855
капельный унос	–	25
Сброс тепла, ГДж/ч	Около 2000	Около 2000
В том числе:		
в водоисточник	Около 2000	25
в атмосферу	–	1975
на почву	–	0,1
Относительные капиталовложения, %	100	140–175
Относительные эксплуатационные затраты, %	100	200–280

При оборотных системах тепло выбрасывается в основном в атмосферу; безвозвратный расход воды из водоисточника становится бóльшим (1,5–2% количества забираемой воды), чем при прямотоке (менее 1%), за счет испарения части оборотной воды на градирнях и потерь с капельной влагой; возможно использование для производственного водоснабжения поверхностных источников с небольшим дебитом воды. Для ТЭЦ, например, достаточно расхода воды в водоисточнике в расчетных гидрогеологических условиях 2–4 м³/с на 1 млн. кВт установленной мощности тепловой электростанции.

Основным источником добавочной воды для восполнения безвозвратных потерь из систем оборотного водоснабжения является природная вода. При соответствующем технико-экономическом обосновании для этих целей могут быть использованы очищенные продувочные, ливневые, городские и производственные сточные воды. Использование сточных вод дает возможность сократить, а в некоторых случаях и исключить забор воды из источников водоснабжения для производственных целей.

Комбинированные системы водоснабжения (рис. 1.1, *г*) применяются на промышленных предприятиях с большим разнообразием производств, а в соответствии с этим требующих воду различного качества по концентрациям загрязнений и температуре. По потреблению свежей воды и сбросу отработанной воды в водоисточники такие системы являются промежуточными между системами прямоточными, с повторным использованием воды и оборотными.

Схемы оборотного водоснабжения промышленных предприятий. Некоторые варианты систем оборотного водоснабжения, применяемых на предприятиях химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности приведены на рис. 1.2. Системы могут быть: открытыми – за счет применения испарительных градирен с охлаждением воды при непосредственном контакте с атмосферным воздухом и со сбросом части воды в водоисточник в виде продувки (рис. 1.2, *а, б*); открытыми замкнутыми, когда продувка системы исключена или часть оборотной воды на байпасе (3–10% общего расхода) подвергается очистке от растворенных примесей и загрязнений и возвращается в систему (рис. 1.2, *в*); закрытыми замкнутыми, когда применяются радиаторные градирни с охлаждением воды без непосредственного контакта с воздухом – через стенки труб (рис. 1.2, *г*).

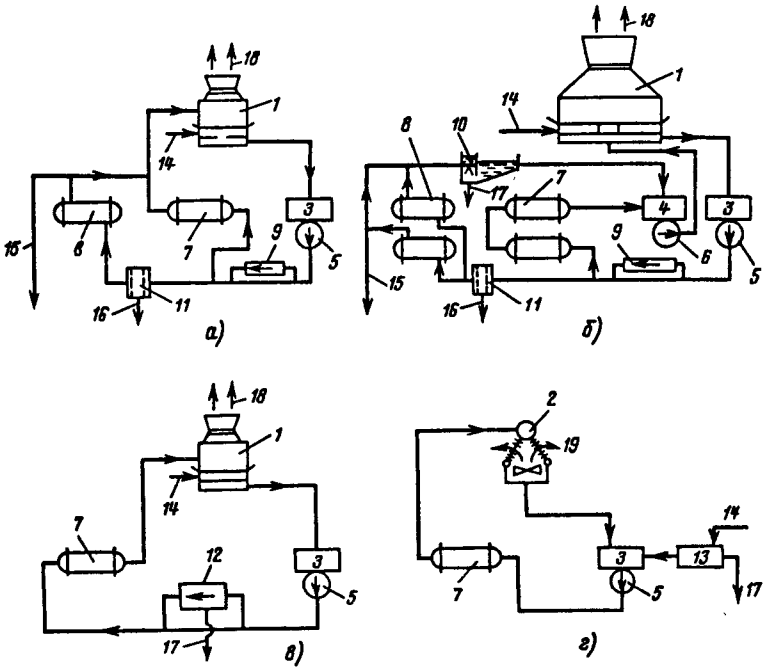


Рис. 1.2. Схемы оборотного водоснабжения промышленных предприятий:
а – открытая с одним подъемом воды; *б* – открытая с двумя подъемами воды; *в* – открытая замкнутая; *г* – закрытая замкнутая; *1* – испарительная градирня; *2* – радиаторная градирня; *3, 4* – резервуары охлажденной и нагретой воды; *5, 6* – насосы; *7, 8* – технологические аппараты; *9* – установка стабилизационной обработки воды; *10* – нефтеловушка; *11* – напорный фильтр; *12* – установка для очистки и корректировки минерального состава воды; *13* – установка для умягчения добавочной воды; *14* – добавочная вода; *15, 16* – продувочная и промывная воды; *17* – шлам; *18* – нагретый и насыщенный паром воздух, капельный унос; *19* – нагретый воздух

СНиП 2.04.02–84 ориентирует на проектирование систем водоснабжения с оборотом воды, общим для всего промышленного предприятия или в виде замкнутых циклов для отдельных производств, цехов или установок. Чаще всего предусматривается один подъем воды без разрыва струи на технологических установках с обеспечением напора, достаточного для подачи воды на градирни (рис. 1.2, *а*).

Остаточный напор воды на отметке размещения водораспределительной системы градирни должен обеспечивать нор-

мальную работу водоразбрызгивающих сопел и определяется их конструкцией – не менее 1 м вод. ст. для ударных сопел и 3 м вод. ст. для центробежных.

Система оборотного водоснабжения с двумя подъемами (рис. 1.2, *б*) применяется в том случае, когда конструкцией технологической установки диктуется разрыв струи или необходимость очистки нагретой оборотной воды от производственных продуктов перед поступлением на градирни. Устройство двух насосных станций заметно удорожает строительство и эксплуатацию системы.

В системах с продувкой (рис. 1.2, *а, б*) схемы очистки продувочных вод должны обеспечивать ликвидацию вредных и утилизацию полезных веществ. Необходимо также предусматривать сброс шламов из водосборных бассейнов градирни в шламонакопители или на другие сооружения для их ликвидации. Удаление шламов из градирен производится через специальные донные грязевые трубопроводы (шламопроводы) или с помощью гидроэлеваторов и насосов по напорным трубопроводам. Сброс шламов в сеть канализации не допускается. Однако допустимы случайные переливы из водосборных бассейнов градирен.

В замкнутых системах для компенсации безвозвратных потерь воды целесообразно использование очищенных производственных и бытовых сточных вод, а также аккумулированного поверхностного стока. При использовании очищенных сточных вод в качестве добавочной воды технологическая схема системы водоснабжения, методы очистки и качество очищенных сточных вод должны быть согласованы с органами Минздрава РФ.

Закрытые системы (рис. 1.2, *г*) обычно работают на обессоленной воде или на конденсате, поскольку потери воды в них на испарение, капельный унос и продувку отсутствуют.

Системы оборотного водоснабжения энергетических предприятий. Системы оборотного водоснабжения тепловых и атомных электростанций могут быть открытыми, закрытыми и комбинированными (рис. 1.3).

На ТЭС и АЭС преобладающее количество воды (90–95%) расходуется на охлаждение конденсаторов турбин. Для совершения полезной работы турбиной от нее отводится с отработанным паром часть тепла, которое передается в конденсаторе охлаждающей воде. Расход воды расчитывается относи-

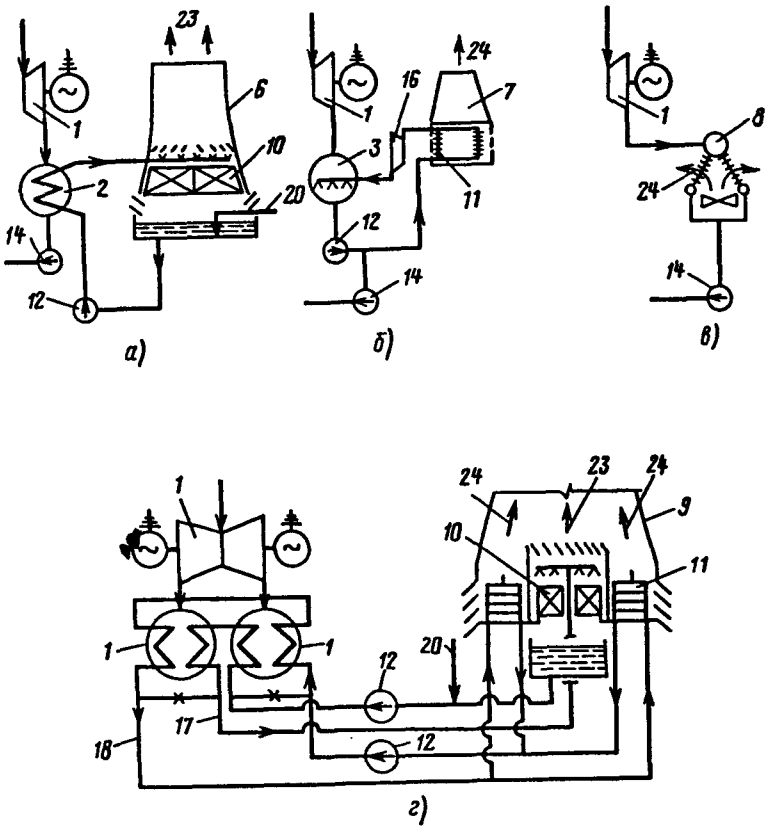


Рис. 1.3. Схемы оборотного водоснабжения энергетических предприятий:

а – открытые; *б, в* – закрытые; *г, д* – комбинированные; *1* – турбина; *2* – поверхиостный конденсатор; *3* – контактный конденсатор; *4* – воздухоохладитель; *5* – маслоохладитель; *6* – башенная испарительная градирня; *7* – башенная радиаторная градирня; *8* – воздушный конденсатор; *9* – гибридная градирня; *10* – ороситель; *11* – радиатор; *12* – циркуляционный насос; *13* – насос подачи воды из водоисточника; *14* – конденсатный насос; *15* – отстойник; *16* – гидротурбина или дроссельный клапан; *17* – открытый контур; *18* – закрытый контур; *19* – сброс нагретой воды в водоисточник; *20* – свежая подпиточная вода; *21* – слив масла на регенерацию; *22* – вспомогательное оборудование; *23* – нагретый и насыщенный паром воздух, капельный унос; *24* – нагретый воздух

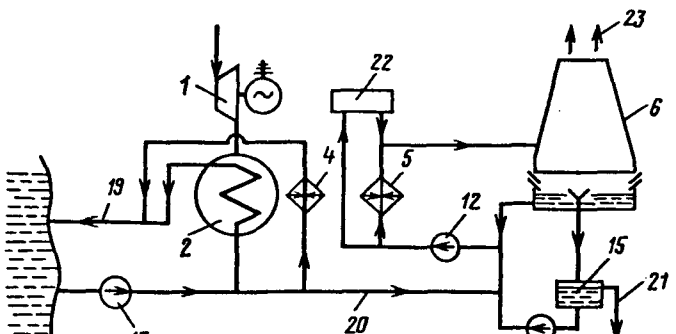


Рис. 1.3 (д)

тельно расхода поступающего в конденсатор пара таким образом, чтобы отводимого от него тепла было достаточно для нагрева воды в среднем на 10 °С (летом на 7–8, зимой на 12–13 °С).

На современных турбоустановках ТЭС и АЭС давление отработавшего пара находится в интервале от 3 до 6 кПа, что соответствует температуре насыщения (конденсации) водяного пара 24–40 °С. Недогрев охлаждающей воды до температуры конденсации не должен превышать 3–5 °С. С учетом этого обстоятельства оптимальный режим турбоустановок электростанций в летний период будет иметь место при температуре охлажденной воды, подаваемой в конденсатор с градирен, около 27–30 °С.

Учитывая большую зависимость КПД электростанций от теплотехнических параметров работы конденсаторов (табл. 1.5), выбор системы технического водоснабжения ТЭС и АЭС производится по результатам технико-экономического сравнения всех возможных вариантов, приведенных к сопоставимым условиям по отпуску электроэнергии и воздействию на состояние окружающей среды. В качестве альтернативного варианта должно рассматриваться наряду с природными водами использование для подпитки оборотных систем очищенных городских сточных вод. Принимается вариант с наименьшими приведенными затратами с учетом предотвращенного ущерба окружающей среде.

С экологической точки зрения наиболее совершенными являются системы охлаждения конденсаторов турбин оборот-

Таблица 1.5. **Влияние температуры воды, охлаждающей конденсаторы турбин, на КПД ТЭЦ**

Показатель	Система водоснабжения				
	прямоточная	оборотная			
		водохранилища–накопители	брызгальные бассейны	испарительные градирни	радиаторные градирни
Среднегодовая температура охлаждающей воды, °С	11	16	20	22	31
Температура конденсации пара, °С	26	31	36	39	43
Давление в конденсаторе турбины, кПа	3,4	4,5	6,5	7,1	8,7
КПД ТЭЦ, %	38,4	37,5	36,1	35,2	33,4

ной водой, охлаждаемой, в свою очередь, на градирнях (рис. 1.3, *а*). Вентиляторные градирни в отрасли сохранились лишь на старых электростанциях; на новых они не применяются, поскольку потребляют на привод вентиляторов около 0,5–0,7% электроэнергии, вырабатываемой электростанцией.

В местностях с недостатком воды даже на восполнение безвозвратных потерь на испарение и капельный унос при обычных испарительных башенных градирнях, а также в особых случаях по технико-экономическим и экологическим соображениям применяются башенные радиаторные градирни (рис. 1.3, *б*) или воздушно-конденсаторные установки (рис. 1.3, *в*), что делает системы охлаждения закрытыми.

В зарубежной практике в последние годы интенсивно начали применяться системы охлаждения конденсаторов турбин электростанций с комбинированными градирнями (рис. 1.3, *г*), называемыми иногда гибридными. При их применении снижается видимый выпар из градирни (паровой факел), достигается экономия добавочной воды и улучшаются теплотехнические параметры конденсаторов в сравнении с башенными радиаторными градирнями и воздушно-конденсационными установками.

На рис. 1.3, *д* приведена комбинированная схема технического водоснабжения ТЭС, при которой конденсаторы турбин

и воздухоохладители охлаждаются свежей водой из водоисточника по прямоточной схеме, а остальное техническое оборудование (маслоохладители, подшипники механизмов и др.), где оборотная вода загрязняется преимущественно нефтепродуктами – по замкнутому циклу с градирней. Такая система применима только при наличии достаточно мощного поверхностного водоисточника.

Схемы охлаждения компрессоров и холодильников. Во многих производственных процессах используется сжатый воздух, вырабатываемый компрессорами, которые относятся к основному оборудованию холодильных установок. В стационарных условиях охлаждение деталей компрессора осуществляется чаще всего водой по замкнутому водооборотному циклу.

Расходы охлаждающей воды относительно небольшие (чаще всего примерно до 500, реже 1000–1500 м³/ч) и зависят от типа компрессоров и мощности станции, но температура воды должна быть не выше 27 °С в летний период. Это обстоятельство, а также условие обеспечения чистоты охлаждаемых деталей компрессоров делают невозможным подключение их к общей системе оборотного водоснабжения предприятия, поэтому компрессорные станции оборудуются самостоятельными оборотными системами (рис. 1.4, *а*).

Примерно такую же систему водяного охлаждения могут иметь и конденсаторы холодильных установок (рис. 1.4, *б*). Для них требуется более низкая температура охлаждаемой воды, желательно не выше 25 °С в летний период, поскольку от нее зависит давление и температура конденсации паров хладагента, а следовательно, холодопроизводительность и потребляемая мощность на выработку холода (рис. 1.5).

В оросительных конденсаторах нагрев охлаждаемой воды допускается на 2–3 °С, в закрытых трубчатых – на 4–8 °С. При этом значение температуры конденсации паров хладагента не должно превышать значения температуры выходящей из конденсатора воды более чем на 5 °С.

Градирни в системах охлаждения компрессоров холодильных станций конденсаторов могут размещаться на уровне земли, на эстакаде или на перекрытиях зданий с плоской кровлей. При размещении градирни внутри производственного помещения следует обеспечивать забор свежего воздуха снаружи помещения и выброс на улицу отработанного воздуха при помощи герметичных воздуховодов.

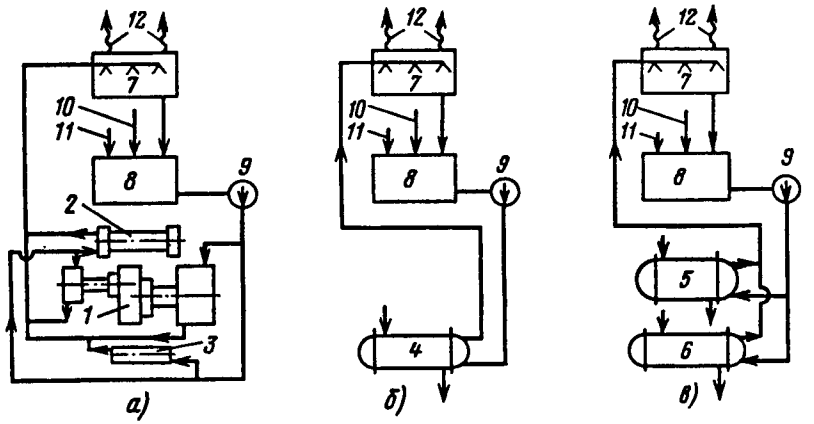


Рис. 1.4. Схемы охлаждения:
а – компрессора; *б* – конденсатора холодильной установки; *в* – холодильников магистрального газопровода; *1* – компрессор поршневой; *2* – промежуточный холодильник; *3* – масляный холодильник; *4* – конденсатор кожухотрубный; *5, 6* – холодильники газа и этиленгликоля кожухотрубные; *7* – градирня; *8* – резервуар охлажденной воды; *9* – насос; *10* – свежая подпиточная воды; *11* – стабилизирующие реагенты; *12* – испарение и капельный унос

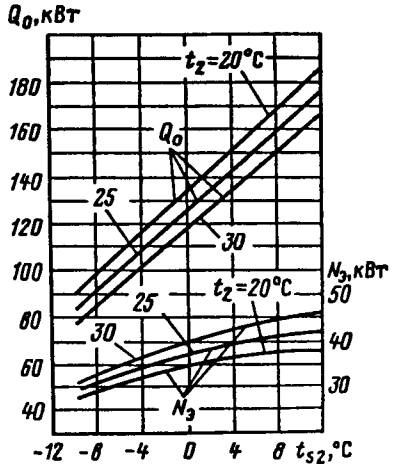


Рис. 1.5. График зависимости холодопроизводительности Q_0 и потребляемой мощности $N_э$ от температуры хладоносителя на выходе из испарителя t_{s2} при различных температурах воды на входе в конденсатор t_2 для холодильных машин типа 2МКТ80–2–0, 2МКТ80–2–1

На магистральных газопроводах требуется охлаждение кожухотрубных холодильников газа и этиленгликоля, для чего целесообразно использовать системы оборотного водоснабжения (рис. 1.4, *в*). Для холодильников требуются охлаждающая вода с температурой 25 °С при нагреве ее до 35 °С. Безвозвратные потери оборотной воды на испарение и капельный унос на градирнях могут приниматься в среднем 5 л на 1000 м³ осушаемого газа.

Критерии рационального использования воды. Рациональным (разумно обоснованным) и наиболее эффективным будет такое расходование воды в процессе производства, при котором наиболее полно будут реализованы ее свойства. Норма расходования воды зависит от вида промышленного производства.

Оценку эффективности использования воды промышленностью можно осуществлять (кроме сравнения с установленными нормами) тремя методами; в каждом из этих методов исходят из применения оборота воды.

По первому методу определяют оборот воды, %:

$$P_{об} = \frac{G_{об}}{G_{об} + G_{и}} 100, \qquad (1.1)$$

где $G_{об}$ – количество оборотной воды, циркулирующей в системе оборотного водоснабжения, м³/ч; $G_{и}$ – количество воды, забираемое предприятием (производством, цехом или установкой) из источника, м³/ч; $G_{об} + G_{и}$ – общее количество воды, расходуемое предприятием.

Необходимо стремиться к 100%-ному обороту воды. Однако, как уже было сказано выше, в настоящее время в целом по стране расходуется оборотной воды 78% общего водопотребления. При условии повторного использования очищенных сточных вод можно достичь $P_{об} = 100\%$.

По второму методу определяют коэффициент использования воды:

$$И = \frac{G_{и} - G_{сб}}{G_{и}} \leqslant 1, \qquad (1.2)$$

где $G_{сб}$ – количество сбрасываемых предприятием в водоем всех производственных сточных вод (без хозяйственно-бытовых), м³/ч.

Необходимо стремиться к положению, когда $И = 1$, главным образом в результате повторного использования очищенных сточных вод. Передовые промышленные предприятия добились коэффициента использования воды, равного 0,75–0,85 и даже 0,95.

На некоторых промышленных предприятиях в систему водоснабжения вода поступает с сырьем (например, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная промышленность и др.), тогда вместо коэффициента использования можно ввести понятие кратности использования воды:

$$n = \frac{G_{об} + G_{и} + G_{с}}{G_{и} + G_{с}} > 1, \qquad (1.3)$$

где $G_{с}$ – количество воды, поступающей в систему с сырьем, м³/ч.

По третьему методу оценки рациональности использования воды определяют потери воды в процессе использования, %:

$$P = \frac{G_{и} + G_{сб}}{G_{об} + G_{и}} 100. \qquad (1.4)$$

Необходимо стремиться к возможно меньшим потерям воды в процессе ее использования. Фактические потери воды в промышленности составляют 3,5%, в комплексе предприятие–ТЭЦ – 2,2%, только на ТЭЦ – 1,35%. На конкретных предприятиях значения этих потерь могут несколько отличаться от указанных из-за различных технических состояний технологического оборудования и систем водоснабжения, неодинакового уровня эксплуатации, климатических условий и других причин.

ГЛАВА 2

ВИДЫ И ВЫБОР ГРАДИРЕН ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ЦИКЛАМИ

2.1. Виды градирен

В нашей стране примерно с 1960 по 1990 гг. градирни строились преимущественно по типовым проектам. Типовые проекты вентиляторных секционных и отдельно стоящих (одновентиляторных) градирен разработаны ГПИ Союзводоканалпроект при участии Промстройпроекта и ЦНИИ Проектстальконструкция (рис. 2.1–2.5) (табл. 2.1–2.3).

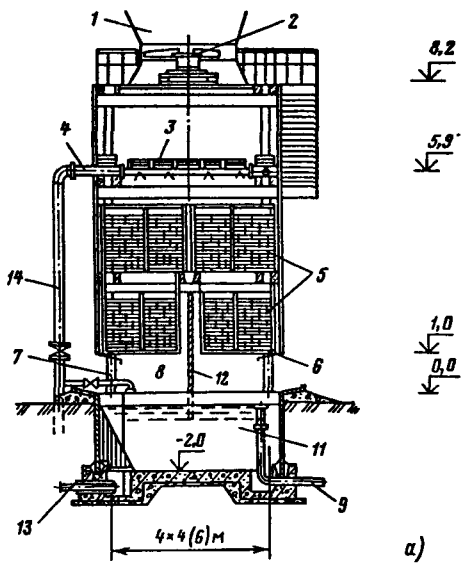


Рис. 2.1. Вентиляторные секционные противоточные градирни:

а – с размерами одной секции в плане 4 х 4(6) м; *б* – то же 8 х 8 м; *в* – то же 12 х 12 (13 х 13) м; *г* – то же 16 х 12 (18 х 18) м; (указанные на рисунках высотные отметки могут отличаться от фактических в зависимости от конструкции градирни); *1* – диффузор; *2* – вентилятор; *3* – водоуловитель; *4* – водораспределительная система; *5* – оросительное устройство; *6* – воздухонаправляющий козырек; *7* – водуховходные окна; *8* – воздухораспределительное пространство; *9* – переливной водовод; *10* – грязевой водовод; *11* – водосборный бассейн; *12* – ветровая перегородка; *13, 14* – отводящий и подводящий водоводы

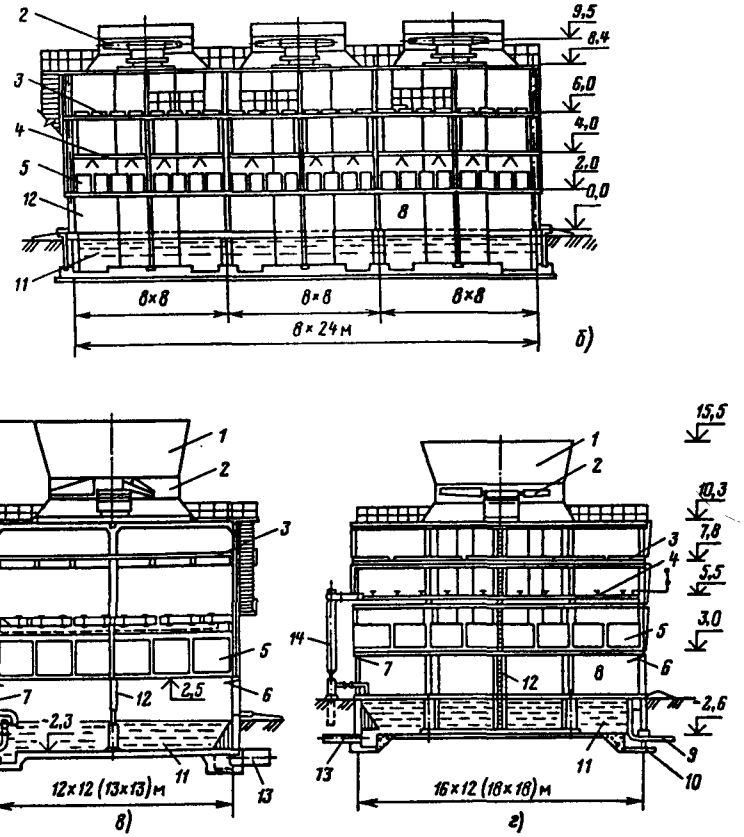


Рис. 2.1 (*б, в, г*)

Секционные градирни разработаны для регионов с расчетной температурой воздуха не ниже –40 °С, расчетным давлением ветра до 0,54 кПа, нормативной снеговой нагрузкой до 1,47 кПа и сейсмичностью до 8 баллов (включительно) для непросадочных грунтов при уровне грунтовой воды на глубине не менее 0,5 м от поверхности земли.

Для химических и нефтехимических предприятий институтами Гипрокаучук и Госхимпроект разработаны несколько модификаций градирен с площадью сечения 400 и 1200 м² (СК-400 и СК-1200) (рис. 2.4). Госхимпроектом выполнены также индивидуальные проекты двух- и трехсекционных градирен с пло-

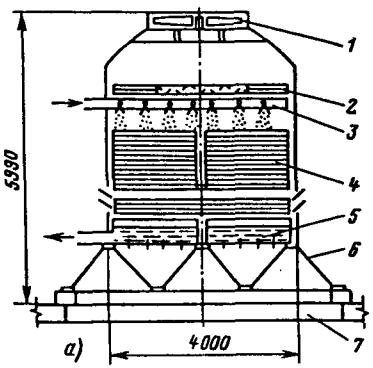
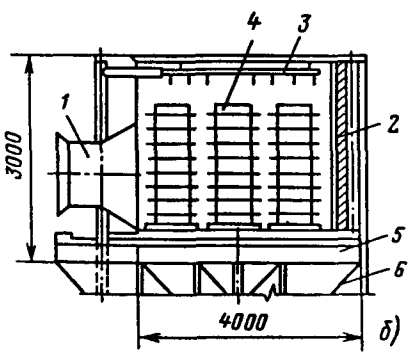
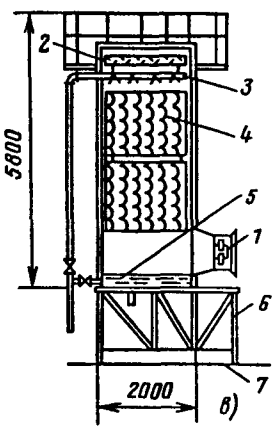


Рис. 2.2. Вентиляторные градирни для установки на зданиях с плоской кровлей:

а – противоточная в комплектно-блочном исполнении; *б* – поперечно-точная; *в* – противоточная; *1* – вентилятор; *2* – водоуловитель; *3* – система распределения воды; *4* – ороситель; *5* – водосборный поддон; *6* – рама; *7* – кровля





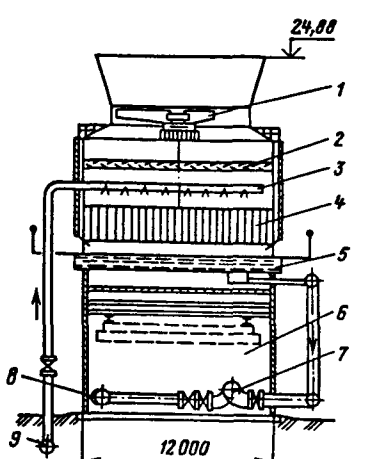


Рис. 2.3. Вертикальный блок сооружений "градирня–насосная станция":

1 – вентилятор; *2* – водоуловитель; *3* – система распределения воды; *4* – ороситель; *5* – поддон для сбора охлажденной воды; *6* – машинное отделение; *7* – циркуляционный насос оборотной воды; *8, 9* – отводящий и подводящий трубопроводы

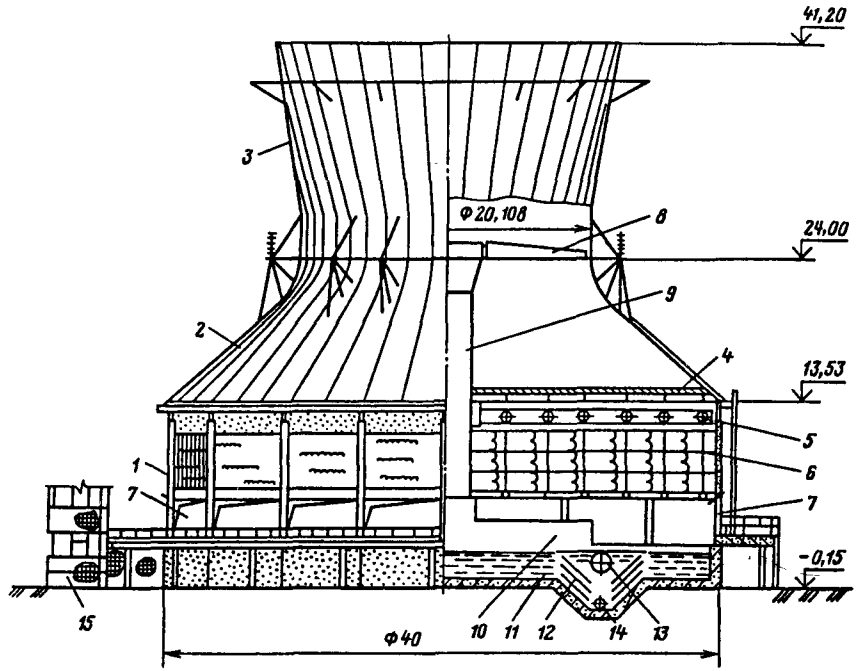


Рис. 2.4. Вентиляториая отдельностоящая градирня (вариант конструкции с полочным отстойником):

1 – несущий каркас; *2* – конфузор; *3* – диффузор; *4* – водоуловитель; *5* – система распределения воды; *6* – ороситель; *7* – воздуховходные окна; *8* – вентилятор; *9* – трансмиссионная шахта; *10* – машинное отделение; *11* – водосборный бассейн; *12* – кольцевой полочный отстойник; *13* – перфорированная труба для отвода охлажденной и осветленной воды; *14* – то же для отвода осадка; *15* – насосная станция

щадью орошения одной секции 144 и 192 м^2 для систем оборотного водоснабжения, работающих на морской воде и в условиях сейсмичности районов 9 баллов, а также вертикальных блоков сооружений "градирня–насосная станция". Типовые и индивидуальные проекты вентиляторных градирен в части технологических расчетов, высотных и плановых схем, конструкций оросителей, водоуловителей и систем распределения воды выполнены на основании результатов научных исследований и рекомендаций НИИ ВОДГЕО.

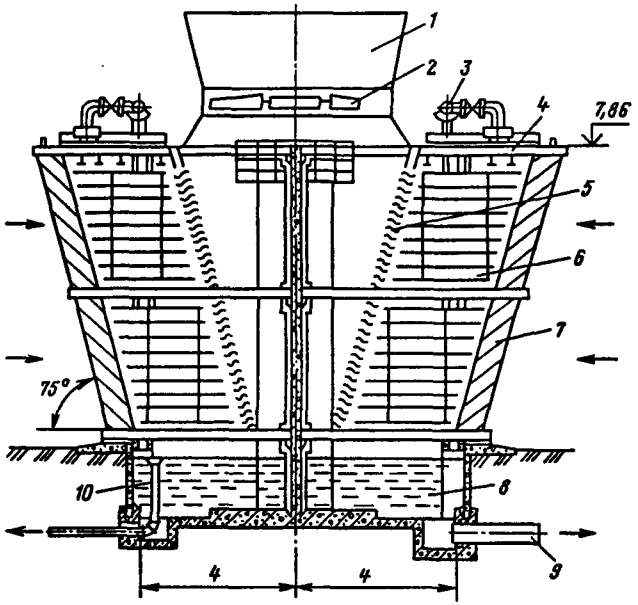


Рис. 2.5. Вентиляторная поперечно-точная (двухпоточная) градирня:

1 – диффузор; *2* – вентилятор; *3* – подводящий водовод; *4* – водораспределительная система; *5* – водоуловитель; *6* – оросительное устройство; *7* – жалюзи; *8* – водосборный бассейн; *9* – отводящий водовод; *10* – переливной водовод

В настоящее время в СНГ налажено производство вентиляторных градирен, поставляемых на предприятия в готовом виде и называемых по этому признаку малогабаритными. Характерные конструкции таких градирен показаны на рис. 2.6 и 2.7, в табл. 2.4 приведены основные показатели самых распространенных из них, а также эжекционных градирен (рис. 2.8).

В градирнях типа "Одесса" (рис. 2.6, *е*) применен ороситель в виде взвешенных в восходящем потоке воздуха пустотелых шариков диаметром 30–40 мм (объемная масса 250 кг/м^3), выполненных из вспененного полипропилена. Аэродинамическое сопротивление такого оросителя составляет 500–608 Па (обычно до 160 Па), чем обусловлено использование радиальных вентиляторов для подачи воздуха в такие градирни. В соответствии с этим при одинаковых гидравлических нагрузках на градирни энергетические затраты при подаче воздуха ра-

Таблица 2.1. **Основные показатели вентиляторных секционных градирен**

Номер проекта	Марка вентилятора	Размеры одной секции, м: в плане	Размеры одной секции, м: высота	Число секций в градирне	Размеры градирни в плане, м	Высота подачи воды, м	Тип оросителя	Материал: несущего каркаса	Материал: обшивки	Материал: оросителя и водоуловителя
Градирни, располагаемые на поверхности земли										
901-6-(81 ÷ 84).86	ЗВГ 25	4 × 4	10,1	2	4 × 8	5,8	Пленочный	Сборный железобетон	Модифицированная древесина	
				3	4 × 12					
				4	4 × 16					
				5	4 × 20					
901-6-68.84	ЗВГ 25	4 × 4	8,4	2	4 × 8	4	То же	Сталь	Стеклопластик (волнистые листы)	Винипласт (каландированная пленка)
901-6-69-84				3	4 × 12					
901-6-(85 ÷ 88).86	ЗВГ 25	4 × 6	10,1	2	6 × 8	5,8	Капельный	Сборный железобетон	Модифицированная древесина	
				3	6 × 12					
				4	6 × 16					
				5	6 × 20					
901-6-67.83, тип 1–IV	ЗВГ 25	4 × 6	9,7	2	6 × 8	5,8	Брызгальный	То же	То же	
				3	6 × 12					
				4	6 × 16					
				5	6 × 20					

Продолжение табл. 2.1

Номер проекта	Марка вентилятора	Размеры одной секции, м		Число секций в градирне	Размеры градирни в плане, м	Высота подачи воды, м	Тип оросителя	Материал		
		в плане	высота					несущего каркаса	обшивки	оросителя и водоуловителя
901-6-51	2ВГ 50	8 × 8	13,4	2 3 4 5	8 × 16 8 × 24 8 × 32 8 × 40	6,4	Пленочный, капельный, брызгальный	– ” –	Асбестоцемент (плоские или волнистые листы усиленного профиля) или модифицированная древесина	
901-6-90с.86 901-6-91с.86	2ВГ 50	8 × 8	12,7	2 3	8 × 16 8 × 24	4,3	Пленочный	Сталь	Стеклопластик	Поливинилхлорид (ПВХ)
901-6-48	2ВГ 70	12 × 12	16,6	2 3	12 × 24 12 × 36	7,7	То же	Сборный железобетон	Асбестоцемент или модифицированная древесина	Модифицированная древесина
901-6-71.85 901-6-72.85	2ВГ 70	12 × 12	15,2	2 3	12 × 24 12 × 36	5,2	– ” –	Сталь	Стеклопластик	То же
901-6-61	2ВГ 70	12 × 16	16,6	2 3	16 × 24 16 × 36	5,6	Капельный	Сборный железобетон	Модифицированная древесина	
901-6-62	2ВГ 70	12 × 16	16,6	2 3	16 × 24 16 × 36	5,6	Брызгальный	То же	То же	

901-6-92с.86 901-6-93с.86	2ВГ 70	12 × 16 12 × 16	17,1	2 3	16 × 24 16 × 36	7,8	Капельный	Сталь	– ” –	
901-6-94с.86 901-6-95с.86	2ВГ 70	12 × 16	17,1	2 3	16 × 24 16 × 36	7,8	Брызгальный	– ” –	Асбестоцемент	Модифицированная древесина или асбестоцемент
901-6-98.89 901-6-65	2ВГ 70 1ВГ 104	13 × 13 18 × 18	16,3 24,2	3 2	13 × 39 18 × 36	5,4 8,3	Брызгальный или пленочный	Монолитный или сборный железобетон	Монолитный железобетон или модифицированная древесина или асбестоцемент	Модифицированная древесина
901-6-66	1ВГ 104	18 × 18	23,9	2	18 × 36	8,3	Пленочный	Сталь	Модифицированная древесина	
901-6-52	06-300 № 8, отсасывающий	1 × 2	6,5	2 3 4 5 6	2 × 2 2 × 3 2 × 4 2 × 5 2 × 6	5,9	Пленочный или капельный	– ” –	Асбестоцемент или стеклопластик	Модифицированная древесина
901-6-53	06-300 № 8, отсасывающий	1 × 2	8,9	2 3 4 5 6	2 × 2 2 × 3 2 × 4 2 × 5 2 × 6	5,8	То же	Древесина	Модифицированная древесина	

Продолжение табл. 2.1

Номер проекта	Марка вентилятора	Размеры одной секции, м		Число секций в градирне	Размеры градирни в плане, м	Высота подачи воды, м	Тип оросителя	Материал		
		в плане	высота					несущего каркаса	обшивки	оросителя и водоуловителя
901-6-50	06-300, № 12, 5, нагнетательный	2×4	6,8	2 3	4×4 4×6	6,3	–"–	Сталь	Асбестоцемент или стеклопластик	Модифицированная древесина
901-6-49	06-300, № 12, 5, отсасывающий	2×4	9,1	2 3	4×4 4×6	7	–"–	Древесина	Модифицированная древесина	
		Градирни, располагаемые на зданиях с плоской кровлей								
901-6-55	06-300 № 8	1×2	5,8	2 3 4 5 6	2×2 2×3 2×4 2×5 2×6	5,3*	–"–	Сталь	Асбестоцемент	Модифицированная древесина
901-6-54	06-300 № 12, 5	2×4	3	2 3	4×4 4×6	2,8	Капельный	Алюминиево-магниевый сплав		То же
901-6-5/75	06-300 № 12, 5, нагнетательный	2×4	6,8	2 3 5	4×4 4×6 4×10	6,3	Пленочный или капельный	Сталь	Асбестоцемент	Винипласт или модифицированная древесина
901-6-96.88	3ВГ 25М	4×4	6	2 3	4×8 4×12	3	То же	–"–	–"–	Модифицированная древесина или поливинилхлорид

* Высота от днища градирни до оси труб водораспределительной системы.

Примечания: 1. При привязке градирен к местным условиям эксплуатации допускается замена материала обшивки, оросителей и водоуловителей при соответствующем обосновании и обязательных технологических расчетах. 2. Оросители брызгального типа снабжены воздухонаправляющими щитами. 3. ПВХ – поливинилхлорид (гофрированные листы).

Таблица 2.2. **Основные показатели конструкций вентиляторных градирен в вертикальных блоках сооружений "градирня – насосная станция"**

Марка вентилятора	Размеры одной секции, м		Число секций в градирне	Размеры градирни в плане, м	Высота подачи воды, м	Тип оросителя	Материал		
	в плане	общая высота					каркаса	обшивки	оросителя и водоуловителя
Насосная станция с одной группой насосов									
ВГ-25	4 × 4	18	4	4 × 16	13,8	Пленочный	Сталь	Оцинкованный профнастил или стеклопластик	Полимерные материалы
2ВГ-70	12 × 12	25,1	n = 2; 4; 5; 6; 7; 8	12 × (12n)	15,6	– " –	– " –	То же	То же
Насосная станция с двумя группами насосов									
2ВГ-70	12 × 12	25,1	4	12 × 48	15,6	Пленочный	Сталь	– " –	– " –

Таблица 2.3. **Основные показатели отдельностоящих градирен**

Шифр градирни	Марка вентилятора	Площадь градирни в плане, м^2	Диаметр основания, м	Высота градирни, м	Высота подачи воды, м	Тип оросителя (варианты)	Материал		
							несущего каркаса	обшивки	оросителя и водоуловителя
СК-400	1ВГ 104	400	22	22	7,8	Капельно-пленочный	Сталь, монолитный, сборный или сборно-монолитный железобетон	Стеклопластик или асбестоцемент, монолитный или сборный железобетон	Модифицированная древесина или ПНД*
Т2153	1ВГ 104	400	22	24	7,4	Пленочный или капельный	Сталь	Стеклопластик	Модифицированная древесина
Т2147	ВГ 140	750	31	26	8,09	Пленочный	Сборный железобетон	– " –	То же
СК-1200	1ВГ 200	1200	39	41,2	12,5	Пленочный или капельно-пленочный	Сталь, монолитный или сборно-монолитный железобетон	Стеклопластик, асбестоцемент, сборный или монолитный железобетон	– " –

* ПНД – полиэтилен низкого давления (плоские, гофрированные листы или сетки).

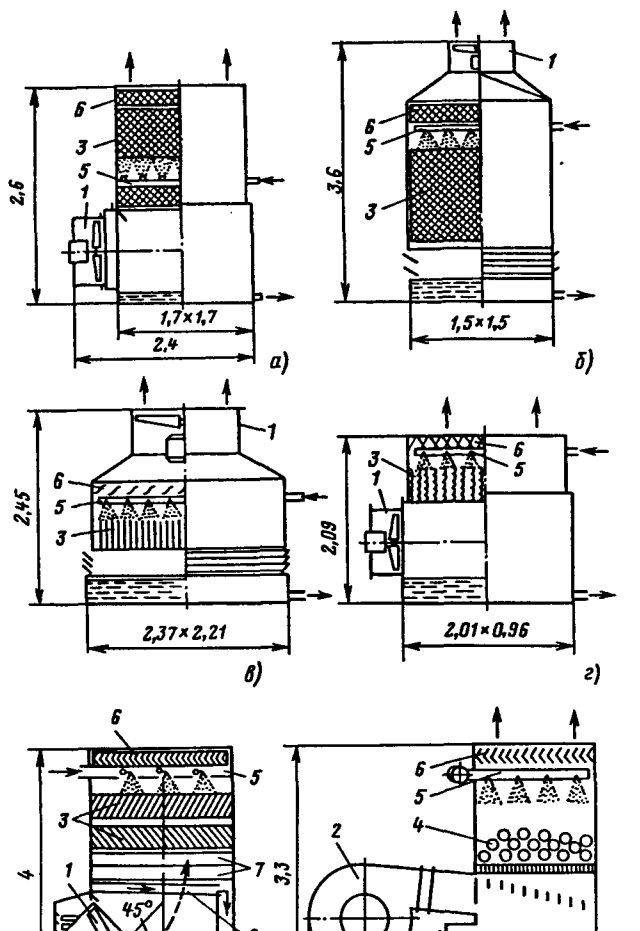


Рис. 2.6. Вентиляторные малогабаритные градирни заводского изготовления:
а – Росинка 30; *б* – ГМВ30; *в* – ГПВ160; *г* – ГРД32; *д* – ПАЮС–ВОДГЕО; *е* – Одесса 150; *1* – вентилятор осевой; *2* – вентилятор центробежный; *3* – ороситель; *4* – подвижная насадка (шары); *5* – система распределения воды; *6* – водоуловитель; *7* – жалюзийная решетка; *8* – лотки

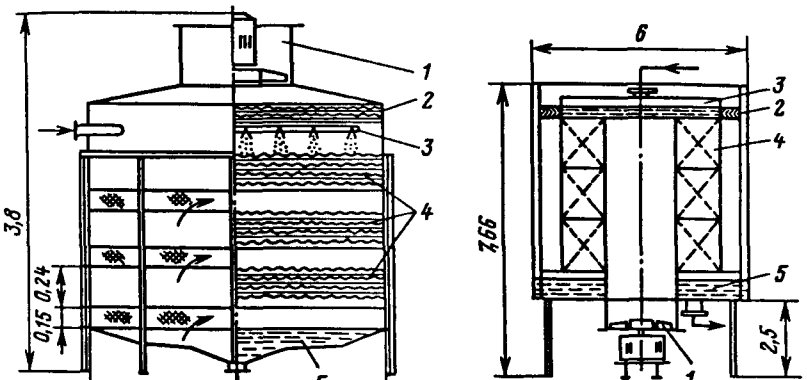


Рис. 2.7. Вентиляторные градирни заводского изготовления:
а – Харьков 1000 (противоточная); *б* – ВАЙГАЧ (поперечно-точная); *1* – вентилятор; *2* – водоуловитель; *3* – система распределения воды; *4* – ороситель; *5* – водосборный бассейн

диальными вентиляторами примерно в 2,5 раза больше, чем осевыми.

В эжекционных градирнях разбрызгивание воды форсунками осуществляется при давлении 0,33–0,4 МПа (3,3–4 кгс/см²). При этом капельный поток с преобладающим размером фракций несколько больше 0,2 мм, движущийся со скоростью 16–20 м/с, интенсивно увлекает (эжектирует) за собой атмосферный воздух, образуя газожидкостный факел распыла. Эжек-

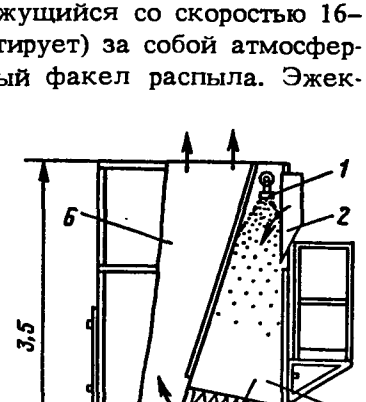


Рис. 2.8. Эжекторная градирня:
1 – форсунка; *2* – воздуховходное окно; *3* – эжекторный канал; *4* – устройство для вторичного дробления капель; *5* – водосборный поддон; *6* – сепарационный канал

Таблица 2.4. **Основные показатели малогабаритных градирен**

Тип градирни, разработчик и изготовитель	Модель градирни	Вид оросителя, материал	Марка вентилятора	Габариты, м			Расход воды, $м^3/ч$
				длина	ширина	высота	
Росинка, НПФ "Техэкопром" (на базе исследований НИИ ВОДГЕО)	Р 5	ПР50, ПНД	06–300 №4	1,2	0,8	1,9	4,6–6
	10/20		6,3	2,2	1,3	2,4	8,6–28
	30/40		8	2,4	1,4	2,3	28–55
	50/60		10	2,2	1,7	3,6	46–80
	80/100		12	2,7	2,3	3,9	73–140
ГМВ, НИИ ВОДГЕО, ТОО "Алорис"	ГМВ 2	То же	06–300 №4	ф 0,6		1,5	2–2,5
	5		4	0,7	0,8	2,6	2,5–5
	12		6,3	0,9	0,9	2,9	4–15
	20		8	1,2	1,2	3,3	21–30
	30		10	1,5	1,5	3,6	28–45
	60		12,5	2,1	2,1	3,8	50–100
	190		12,5*2	4,2	2,1	3,8	100–190
ГПВ, ВНИХИ, Харьковский механический завод	ГПВ 20М	Плоские или гофрированные листы, мипласт	06–300 №6,3	1	0,9	1,6	4
	40М		8	1,3	1,2	1,6	8
	80М		10	1,7	1,6	2,1	16
	160		12,5	2,4	2,2	2,5	32
ИВА*1, Харьковский механический завод	ИВА 25	То же	06–300 №4	0,9	0,8	1,8	5
	50		5	1,1	1	1,8	10
	100		6,3	1,4	1,3	2	20
	150		8	1,7	1,6	2	30
	250		10	2	2,1	2,4	50
	300		12,5	2,5	2,6	2,7	60
	400		ВОП 12,5	2,5	2,6	2,7	80
Харьков*1, Харьковский механический завод	Харьков 50	То же	06–300 №5	0,73	0,73	1,4	10
	100		6,3	1,1	1,1	1,4	20
	150		8	1,25	1,25	1,7	30
	250		10	1,53	1,53	2	50
	500		ВОП 12,5	2,1	2,2	2,7	100
	1000		В06–290–11–01	ф 3,1		3,8	160
ГРД, НПФ "Динас"	ГРД 4	Гофрированные листы, ПВХ	06–300 №4	0,7	0,7	2	4
	8		6,3	0,7	0,7	2	8
	12/16		6,3	1	0,8	2,1	12–16
	24/32		8	2	1	2,1	24–32
	50		8	2	1	2,6	50
	100		8*2	2,1	2,1	2,8	100
	150		8*3	2,1	3	3,2	150
	350		12,5*3	2,1	6	3,8	350
ГПА*1, фирма "Аксанд" (на базе исследований НИИ ВОДГЕО)	ГПА 0,65	ПР50, ПНД или гофрированные листы, мипласт	06–300 №4	0,85	0,85	2,5	До 15
	1,5		8	1,25	1,25	2,7	35
	2,5		8	1,8	1,8	3,4	60
	6		ВОП 12,5	2,55	2,55	3,5	130
ПАЮС–ВОДГЕО, НИИ ВОДГЕО	–	ПР50, ПНД	06–300 №12,5	2,3	1,9	4	50–70
Одесса, КП "Металлист" (на базе исследований Одесского технологического института холодильной промышленности)	Одесса 50	Шары, полипропилен	Ц4–70 6,3	2,8	1,1	2,8	10
	100		8	3,3	1,3	3,2	20
	150		8	3,5	1,4	3,3	30
	250		10	4,8	2,1	3,7	50
	500		10*2	5,4	3,2	3,8	100
ВАЙГАЧ*4, НПП "Вайгач", АОТЗ "Балтсталь"	–	ПР50 или фирмы "Бальке–Дюрр", ПНД	2,9*5	6	6	7,7	600

Продолжение табл. 2.4

Тип градирни, разработчик и изготовитель	Модель градирни	Вид оросителя, материал	Марка вентилятора	Габариты, м			Расход воды, $м^3/ч$
				длина	ширина	высота	
МУССОН, ТОО "Рецикл", МПО "Политехника"	ОВ 5М	–	–	1,6	0,8	3,5	5
	10М			1,6	1,6	3,5	10
	15М			2,4	1,6	3,5	15
	20М			3,2	1,6	3,5	20
	25М			4	1,6	3,5	25
	30М			3,2	2,4	3,5	30
	40М			3,2	3,2	3,5	40
	ОВФ 80			5	3	4	80
	160			10	3	4	160

Примечания: *1 Высотная схема аналогична схеме градирни ГПВ. *2 Градирня оборудована двумя вентиляторами. *3 Градирня оборудована тремя вентиляторами. *4 В горизонтальном сечении градирня имеет форму шестигранника. *5 Установочная мощность электродвигателя 37 кВт. ПР50 – призма решетчатая высотой 50 мм.

ционные градирни характерны повышенным уносом капельной влаги (более 1,5% расхода воды).

Типовые проекты башенных градирен большой производительности разработаны Ленинградским отделением Атомтеплоэлектропроекта (ЛОАТЭП) совместно с ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (рис. 2.9) (табл. 2.5). Индивидуальные проекты башенных

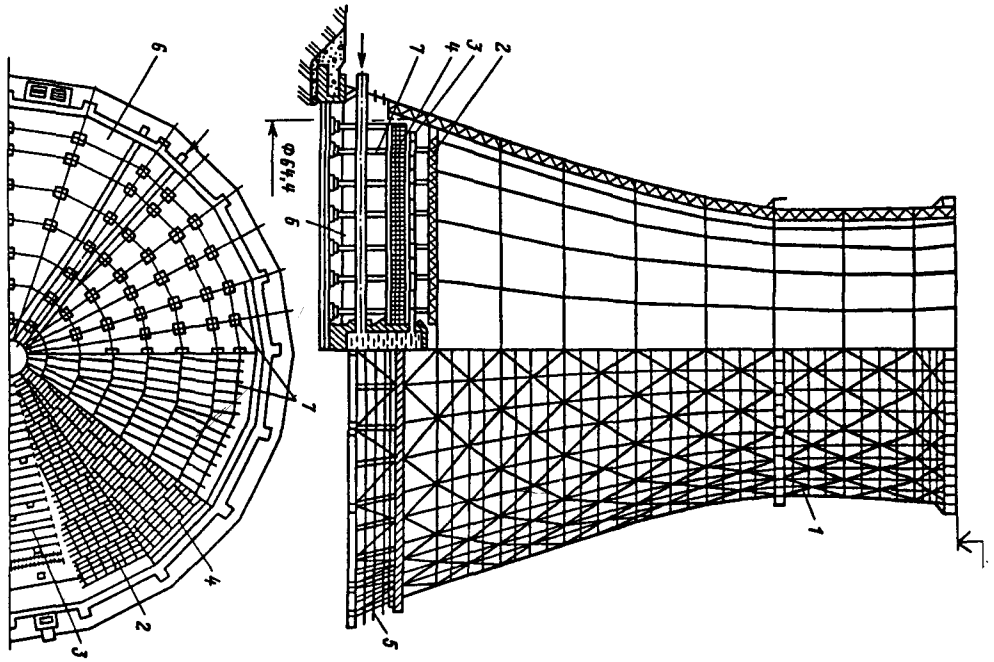


Рис. 2.9. Башенная противоточная градирня:

1 – вытяжная башня; *2* – водоуловитель; *3* – водораспределительная система; *4* – ороситель; *5* – воздухорегулирующее устройство; *6* – водосборный бассейн; *7* – несущий опорный каркас

Таблица 2.5. **Основные показатели башенных градирен**

Шифр проекта	Площадь поверхности оросителя, м²	Высота градирни, м	Диаметр башни, м		Высота воздухо-входных окон, м	Высота подачи воды, м	Тип оросителя	Материал		
			на уровне верха оросителя	выходного сечения				каркаса башни	обшивки	оросителя и водоуловителя
БГ-324-65	324	34	19,2	14	1,8	8,6	Пленочный	Сталь	Асбестоцемент или дерево	
БГ-576-65	576	40	25,2	17,6	3,3	8,6	–"–	–"–	То же	
БГ-725-66	725	39	32,5	21,8	3,55	8,6	–"–	–"–	–"–	
БГ-900-66	900	43,4	31,2	21,8	3,3	8,6	–"–	–"–	–"–	
БГ-1520-70	1520	55,3	47,6	25,6	3,3	6,6	–"–	Железобетон		Асбестоцемент
Градирни "старой" серии										
БГ-1200-70	1200	48,3	40	26	3,3	6,05	Пленочный	Сталь	Алюминий или асбестоцемент	Асбестоцемент
БГ-1600-70	1600	53,7	46	30,4	3,3	6,05	–"–	–"–	То же	–"–
БГ-2100-70	2100	64,8	52,2	33	3,8	8,7	–"–	–"–	–"–	–"–
БГ-2600-70	2600	71	58,2	37,9	4,3	9,5	–"–	–"–	–"–	–"–
БГ-3200-73	3200	81	64,4	40,4	5	10	–"–	–"–	–"–	–"–
БГ-4000-71	*4000*	91,5	72	41,6	5,5	10,9	–"–	–"–	Алюминий	–"–
БЖГ-4000-72	4000	90	73	43	5,5	11	–"–	Железобетон		–"–
Градирни "новой" серии										
–	1100	52	38,2	25	4,5	8,4	Пленочный	Сталь	Алюминий, асбестоцемент или стеклопластик	Асбестоцемент или полимерные материалы
–	1600	62	46	30	5,5	9,4	–"–	–"–	То же	То же
–	2300	75	55	36	6,5	10,4	–"–	–"–	–"–	–"–
–	3200	88	65	42	7,5	11,4	–"–	–"–	Алюминий	–"–
–	3200	88	65	42	7,5	11,4	–"–	Железобетон		–"–

и вентиляторных градирен преимущественно для зарубежных объектов разработаны институтом Теплоэлектропроект. Башенные градирни малой производительности (рис. 2.10) (табл. 2.6), имеющие квадратную форму в плане и высоту подачи воды 5,5 м, а также открытые градирни (рис. 2.11) (табл. 2.7) запроектированы Союзводоканалпроектом на основании рекомендаций НИИ ВОДГЕО.

В открытых градирнях для протока воздуха используется сила ветра и частично естественная конвекция. Они предназначены для следующих условий: расчетное давление ветра 0,27 кПа, давление снегового покрова 0,98 кПа; степень огнестойкости IV; расчетная температура наружного воздуха –30 °С; климатические районы СНГ I, II, III, IV.

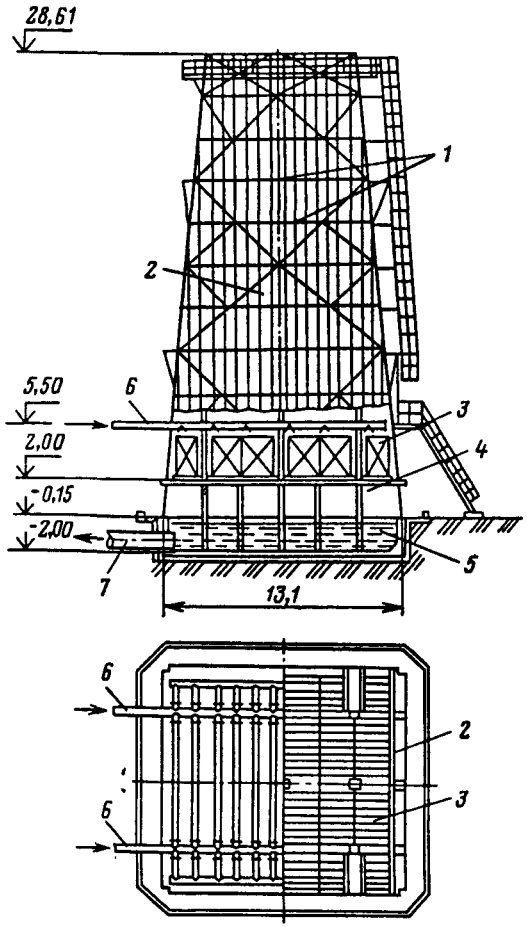
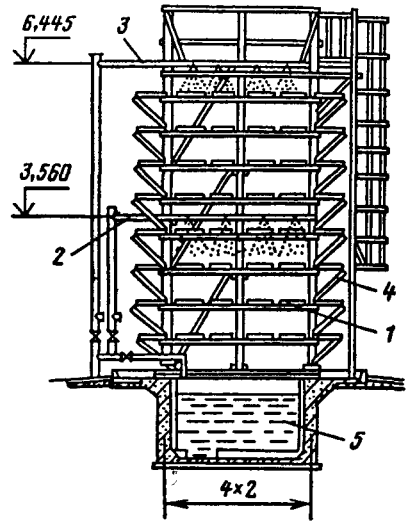


Рис. 2.10. Башенная градирня малой производительности:

1 – каркас вытяжной башни; *2* – обшивка; *3* – ороситель; *4* – воздухораспределительное пространство; *5* – водосборный бассейн; *6* – подводящий трубопровод; *7* – отводящий трубопровод

Рис. 2.11. Открытая градирня:

1 – ороситель; *2, 3* – нижняя и верхняя системы распределения воды; *4* – воздухонаправляющие жалюзи; *5* – водосборный бассейн



Высокое качество типовых проектов вентиляторных и башенных градирен не всегда реализовывалось при привязке их отраслевыми институтами к местным условиям строительства и эксплуатации. По этой приине, а также с переходом организаций на рыночную экономику после 1990 г. градирни перестали строить по типовым проектам. В настоящее время выполняются только индивидуальные проекты применительно к каждому конкретному объекту. Все же, учитывая множество построенных по типовым проектам градирен, которые сохранились и эксплуатируются на предприятиях и ТЭС еще с 1960–70 гг. и ранее, в табл. 2.1–2.3, 2.5–2.7 указаны номера или шифры типовых проектов для лучшей ориентации при использовании их в качестве рабочих материалов при проектировании новых и реконструкции старых сооружений.

Приведенные на рис. 2.12–2.14 схемы сухих и гибридных градирен за рубежом применяются достаточно давно. В нашей стране такие градирни еще не нашли широкого применения из-за относительно высокой стоимости и металлоемкости воздушных теплообменников и недооценки их преимуществ в природоохранном аспекте (см. гл. 12).

Таблица 2.6. **Основные показатели башенных градирен малой производительности**

Шифр проекта	Площадь орошения градирни в плане, $м^2$	Высота башни от уровня земли, м	Материал каркаса башни
Т-1973	16	18,1	Дерево
Т-1974	16	18,1	Сталь
Т-1975	64	20,7	То же
Т-1976	144	28,6	–"–
Т-1977	256	31,2	–"–

Примечания: 1. Оросители во всех градирнях состоят из деревянных щитов, собранных из планок размером 10 × 100 мм, установленных на ребро с промежутками по высоте 150 мм. Расстояние между щитами в свету 25–40 мм. 2. Отношение площади выходного сечения башни к площади орошения градирни равно 0,3.

Таблица 2.7. **Основные показатели открытых градирен**

Номер проекта	Площадь орошения, $м^2$	Размеры оросителя в плане, м	Высота градирни, м	Высота подачи воды[1], м
901-6-73.85	4	2 × 2	8	4,9/3,5
901-6-74.85	8	2 × 4	8	4,9/3,5
901-6-75.85	12	2 × 6	8	4,9/3,5
901-6-76.85	16	4 × 4	9,4	6,6/4,3
901-6-77.85	32	4 × 8	9,4	6,6/4,3
901-6-78.85	48	4 × 12	9,4	6,6/4,3
901-6-79.85	64	4 × 16	9,4	6,6/4,3
901-6-80.85	80	4 × 20	9,4	6,6/4,3

[1] В числителе – отметка расположения верхней системы распределения воды, в знаменателе – нижней.

Примечание. Во всех градирнях оросители капельные из нестроганых планок шириной 60–80 мм и толщиной 8–10 мм.

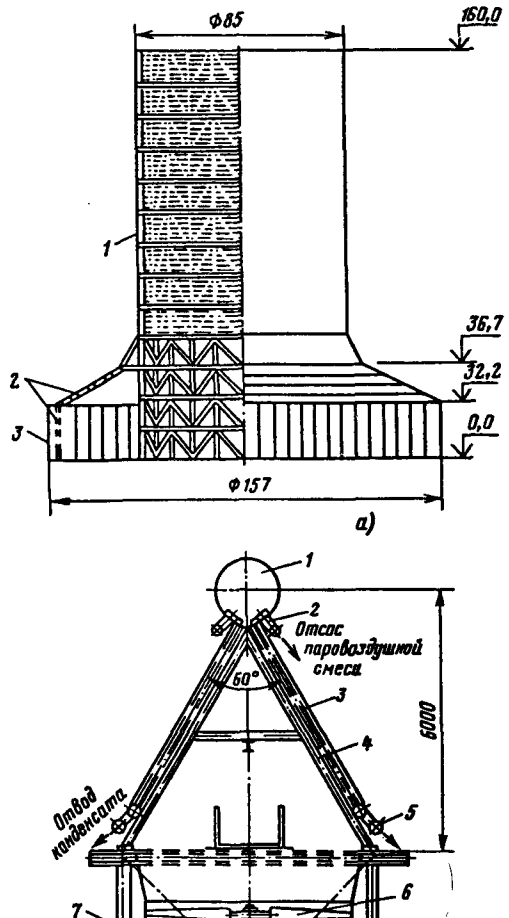


Рис. 2.12. Сухие градирни:

а – воздушно-конденсаторная установка (ВКУ) с естественной тягой воздуха; *1* – вытяжная башня; *2* – охладительные дельты; *3* – жалюзийная решетка; *б* – воздушный конденсатор с механической тягой воздуха; *1* – паропровод; *2* – трубопровод паровоздушной смеси; *3* – охладительные дельты; *4* – каркас секции; *5* – трубопровод отвода конденсата; *6* – вентилятор; *7* – опорная конструкция

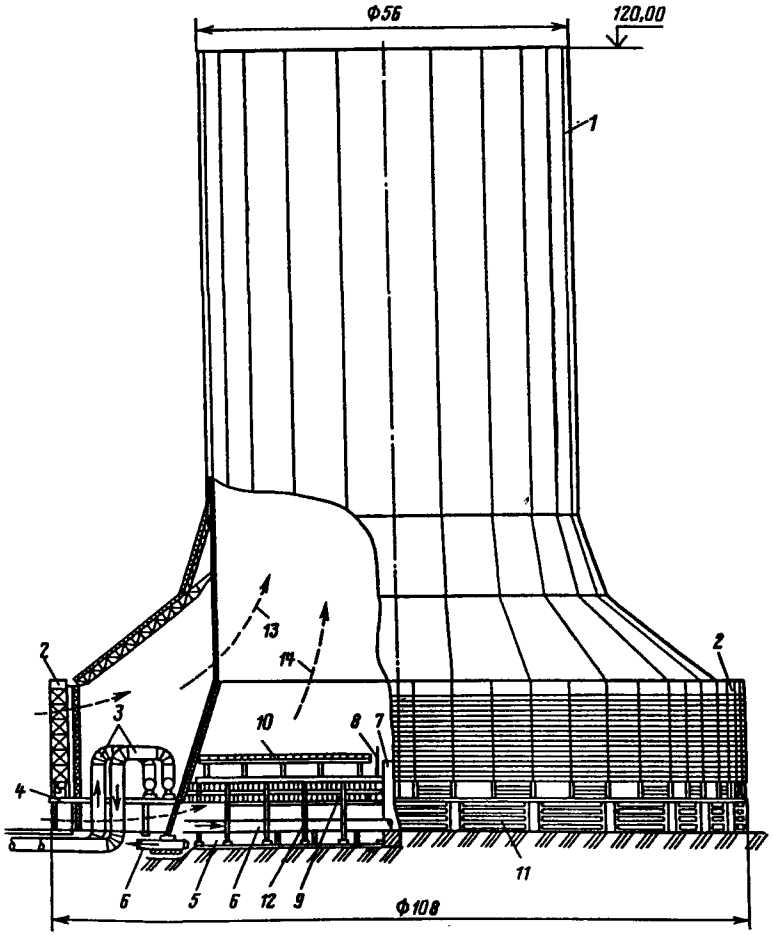


Рис. 2.13. Гибридная градирня башенного типа конструкции АО "Институт Теплоэлектропроект":

1 – вытяжная башня; *2* – охладительные дельты с жалюзи; *3* – циркуляционные водоводы сухой части; *4* – горизонтальное перекрытие; *5* – водосборный бассейн; *6* – циркуляционные водоводы испарительной части; *7* – железобетонный стояк; *8* – водораспределительная система; *9* – блоки оросителей; *10* – водоуловитель; *11* – воздухозаборные окна испарительной части; *12* – несущий опорный каркас; *13* – сухой нагретый воздух; *14* – насыщенный нагретый воздух

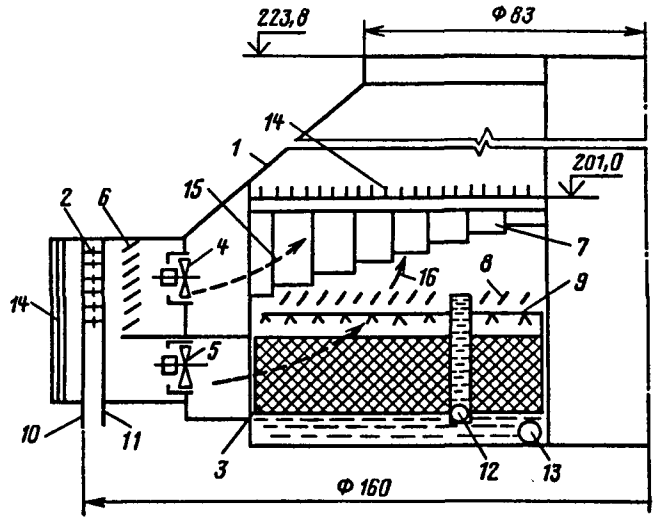


Рис. 2.14. Гибридная градирня фирмы "Бальке-Дюрр" (Германия) с комбинированной подачей воздуха:

1 – башня; *2* – сухие охлаждающие элементы; *3* – ороситель; *4, 5* – вентиляторы сухой и мокрой частей; *6* – жалюзи; *7* – смешивающие элементы; *8* – водоуловитель; *9* – система распределения воды; *10, 12* – подача нагретой воды в сухие охлаждающие элементы и на ороситель; *11, 13* – отвод охлажденной воды от сухой и мокрой частей; *14* – шумоглушители; *15* – сухой нагретый воздух; *16* – насыщенный нагретый воздух

2.2. Выбор градирен

Выбор типов и конструкций градирен производится на основании технологических расчетов с учетом заданных в проекте расходов оборотной воды и количества тепла, отнимаемого от продуктов, аппаратов и охлаждаемого оборудования, температур охлаждаемой воды и требований к устойчивости охладительного эффекта, расчетных метеорологических параметров, условий размещения градирен на площадке предприятия, химических составов добавочной и оборотной вод и санитарно-гигиенических требований к ним, а также технико-экономических показателей. Кроме того, надлежит учитывать требования природоохранных органов к работе градирен как возможных источников негативного воздействия на состояние окру-

жающей среды в районе расположения промышленного или энергетического предприятия. Учитывая большое разнообразие существующих типов и конструкций градирен и условий их применения, выбор наиболее рационального типа для каждой конкретной системы оборотного водоснабжения не всегда может быть однозначным. Помощь в предварительном выборе возможных вариантов градирен для последующих технологических и технико-экономических расчетов может оказать табл. 2.8. В таблице обобщены и систематизированы основные условия применения вентиляторных и башенных градирен. При этом в нее не включены открытые и эжекционные градирни, поскольку условия их применения отличаются от условий применения вентиляторных и башенных охладителей.

Таблица 2.8. **Условия применения вентиляторных и башенных градирен в системах оборотного водоснабжения**

Показатель	Индекс	Дополнительные индексы	Градирни	
			вентиляторные	башенные
Расход воды в системе, $м^3/ч$	1	15–17	До 100	–
	2	15–18, 21, 23	100–1000	
	3	18–24	1000–10 000	
	4	19–24	10 000–100 000	
	5	22, 24	Более 100 000	
Температура нагретой воды, °С	6	79–83	До 50	
	7	79, 80	До 60	–
	8	34–36	Выше 60	–
Перепад температур нагретой и охлажденной воды, °С	9	26	3–20 и выше	–
	10	26–28	5–15	
Концентрация загрязнений в охлаждаемой воде, мг/л	11	55, 58	До 25 нефтепродуктов и до 50 взвешенных веществ	
	12	56, 57	Более 25 нефтепродуктов, жиров и смол и до 120 взвешенных веществ	
	13	59	Загрязнения, образующие на конструкциях градирен отложения, не смываемые водой	
	14	34, 36, 43, 44	Наличие токсичных веществ	

Продолжение табл. 2.8

Показатель	Индекс	Дополнительные индексы	Градирни	
			вентиляторные	башенные
Площадь орошения одной градирни, $м^2$	15	29, 30, 72–74, 78	До 7	–
	16	29, 31, 74	4–48	–
	17	29, 70, 72, 73	4–24	–
	18	31, 70, 72	32–120	–
	19	31, 70, 72	128–320	–
	20	31, 70, 72	288–648	–
	21	31, 75	64–1152	–
	22	32, 71, 72	400, 750, 1200	–
	23	72, 76	–	16–256
	24	72, 76	–	324–4000 и более
Высота градирни, м	25	–	1,5–42	18–92 и более
Подача воздуха	26	48, 49	Механическая	
	27	48	–	Естественная
	28	48, 49	Комбинированная	
Тип вентилятора	–	76, 77, 78	Осевой общепромышленного назначения	–
	30	78	Радиальный общепромышленного назначения	–
	31	70, 76, 77	ВГ25, ВГ50, ВГ70	–
	32	71, 76	Диаметром 10,4; 14 и 20 м	–
Охлаждение воды: при контакте с воздухом	33	40	Ороситель (мокрые градирни)	
без контакта с воздухом	34	41	Теплообменник (сухие градирни)	
смешанное	35	41	Ороситель и теплообменник (гибридные градирии)	
	36	40	Теплообменник с набрызгом воды	
Способ передачи тепла от воды к воздуху	37	33	Испарением части воды	
	38	34	Теплопередачей через стенки теплообменника	
	39	35	Испарением и теплопередачей	
Выбросы из градирен в атмосферу	40	33, 36	Нагретый и насыщенный паром воздух	
	41	34, 35	Нагретый воздух	

Продолжение табл. 2.8

Показатель	Индекс	Дополнительные индексы	Градирни	
			вентиляторные	башенные
Капельный унос, %	42	34	Отсутствие	
	43	15	Менее 0,01	
	44	14, 24	0,01–0,05	
	45	16–22	0,1–0,2	–
	46	23, 36	0,5–1	
	47	59	1–1,5	
Схема подачи воздуха	48	29, 31, 32	Отсасывающая	
	49	29, 30	Нагнетательная	
Схема движения воды и воздуха	50	33	Противоточная	
	51	33	Поперечноточная	
	52	33	Смешанная	
Количество потоков воздуха	53	50, 51	Однопоточные	
	54	51	Двухпоточные	
Тип оросителя	55	79–83	Пленочный	
	56	79, 82, 83	Капельный	–
	57	79, 82	Капельно-пленочный	
	58	79–83	Комбинированный	
	59	–	Брызгальный	–
Тип водоуловителя	60	45	Жалюзийный	
	61	43, 44	Сотовый, с криволинейным очертанием лопаток	
	62	43, 44	Решетчатый	
Располагаемый остаточный напор на отметке водораспределительной системы градирни, м	63	68, 51	До 1	
	64	68, 69	1–2	
	65	69	Более 2	
Тип системы распределения воды в градирне	66	15–24, 50, 64, 65	Напорный трубчатый	
	67	51, 52, 63	Безнапорный (трубчатый, лотковый, в виде бассейна)	
Тип разбрызгивающих устройств (сопел)	68	66, 67	Ударные, в том числе сливные трубки	
	69	66	Центробежные (тангенциальные, эвольвентные, винтовые)	
Размещение градирен:				
в плане	70	29, 31	Секционные	–
	71	23, 24, 29, 30, 32	Отдельно стоящие	
относительно	72	15, 17–20, 22–24	На поверхности земли	

Продолжение табл. 2.8

Показатель	Индекс	Дополнительные индексы	Градирни	
			вентиляторные	башенные
уровня земли				
	73	15	На эстакаде	–
	74	15, 16	На зданиях с плоской кровлей	–
	75	21	Совмещенные с насосной станцией	–
Способ изготовления	76	16–24	Строительные конструкции	
	77	16, 17	Комплектно-блочного исполнения	–
	78	15	Заводского изготовления	–
Конструктивные материалы:				
оросителя и водоуловителя	79	55–57	Дерево	
	80	55	Асбестоцементные листы	
	81	55	Стеклопластиковые листы	
	82	55–58	Полиэтилен низкого давления стабилизированный	
	83	55–58	Поливинилхлорид пластифицированный	
несущего каркаса ограждающих конструкций	84	17, 23	Дерево	
	85	15–24	Сталь профильная	
	86	15, 16, 21	Алюминиево-магниевые сплавы	–
	87	18–22, 24	Сборно-монолитный железобетон	
	88	22, 24	Монолитный железобетон	
обшивки	89	84	Деревянные щиты	
	90	84, 85	Асбестоцементные листы усиленного профиля	
	91	84, 86	Стеклопластиковые листы усиленного профиля	
	92	84, 86	Профилированные листы пластифицированного ПВХ	
	93	84–87	Алюминиевые или стальные (оцинкованные) листы	
	94	87	Железобетонные стеновые панели	
	95	88	Монолитный железобетон	
Возгораемость конструкций градирни	96	80, 81, 83, 85–88	Невозгораемые	
	97	79, 82, 84, 89	Возгораемые	

Пример 2.1. На стадии ТЭО требуется выбрать возможные варианты градирен для охлаждения оборотной воды при следующих условиях: расход воды в системе 20 000 м³/ч; температура нагретой воды 38 °С; температура охлажденной воды 25 °С; температура атмосферного воздуха по сухому термометру 24,5 °С, по смоченному 19 °С, т. е. глубина охлаждения воды составляет 6 °С (25–19); концентрации загрязнений в оборотной воде – нефтепродуктов до 15 мг/л, взвешенных веществ до 25 мг/л; капельный унос из градирни не должен превышать 0,05%.

Решение. Этап 1. В табл. 2.8 находим строку с расходом оборотной воды в системе, с интервалом заданного расхода (20 000 м³/ч) 10 000 – 100 000 м³/ч (индекс 4).

Этап 2. Для индекса 4 имеются дополнительные индексы 19–24, для которых находим и выписываем соответствующие значения условий применения градирни. Площадь орошения одной градирни может быть: 19 – от 128 до 320 м²; 20 – от 288 до 648 м²; 21 – от 64 до 1152 м²; 22 – 400, 750, 1200 м² (градирни вентиляторные); 23 – от 16 до 256 м² и 24 – от 324 до 4000 м² и более (градирни башенные).

Из дальнейшего рассмотрения в данном примере исключаем вентиляторные градирни с площадями орошения 750 и 1200 м² по условию размещения не менее двух охладителей на площадке предприятия (см. гл. 11) и башенные градирни, не обеспечивающие заданной глубины охлаждения воды 6 °С (см. табл. 1.3).

Этап 3. Рассмотрим дополнительные индексы к индексам 19 и 20: 31 – вентиляторы типа ВГ, 70 – градирни секционные, 72 – размещаются на поверхности земли; к индексу 21: 31 – вентиляторы типа ВГ, 75 – градирни совмещены с насосной станцией; к индексу 22: 32 – вентиляторы диаметром 10,4 м, 71 – градирни отдельно стоящие, 72 – размещаются на поверхности земли.

Этап 4. При заданных концентрациях загрязнения оборотной воды – нефтепродуктов до 15 мг/л и взвешенных веществ до 25 мг/л (индекс 11) может быть применен ороситель пленочный (индекс 55) или комбинированный (индекс 58). Дополнительными к ним индексами определяется возможный материал оросителя: 79 – дерево; 80 – асбестоцементные листы; 81 – стеклопластиковые листы; 82 – ПНД и 83 – ПВХ.

Этап 5. Заданное значение капельного уноса из градирни 0,05% (индекс 44) обеспечивается водоуловителями – сотовым и с криволинейным очертанием лопаток (индекс 61) или решетчатым (индекс 62).

Этап 6. Для работы разбрызгивающих сопел зададимся напором воды в водораспределительной системе градирни, равным 3 м (индекс 65). По дополнительным индексам 65 и 69 система должна быть напорной трубчатой с центробежными соплами.

Таким образом, для дальнейших технологических и технико-экономических расчетов принимаем градирни наземные секционные, совмещенные с насосной станцией и отдельностоящие с площадью сечения 400 м² (*этап 3*) с вариантами оросителей из различных материалов (*этап 4*) и водоуловителей трех конструкций (*этап 5*), а также с напорной трубчатой системой распределения воды (*этап 6*) для всех вариантов градирен. Циркуляционные насосы должны быть подобраны из условия подачи 20 000 м³/ч воды на градирни при остаточном напоре в системе водораспределения 3 м.

Пример 2.2. При условиях примера 2.1 в оборотной воде присутствуют загрязнения, образующие на конструкциях градирен отложения, не смываемые водой. Выбрать тип оросителя.

Решение. По табл. 2.8 этому условию применения градирни соответствует индекс 13. Дополнительным к нему индексом 59 определяется тип оросителя – брызгальный.

На электростанциях для охлаждения оборотной воды применяются преимущественно башенные градирни, а на промышленных предприятиях – вентиляторные. Следует признать, что решение о преимущественном применении на ТЭС и АЭС башенных градирен, принятое в 1950–60 гг., оказалось удачным. В те годы оно обосновывалось рядом положений:

1) необходимостью охлаждения больших объемов оборотной воды, в несколько раз превышающих объемы воды на промышленных предприятиях;

2) опытом зарубежных стран. К тому времени стало общепризнанным, что для центральных и северных районов Европы и США наилучшим решением для мощных ТЭС является, как правило, применение башенных градирен, более простых в эксплуатации, чем вентиляторные, и допускающих размещение их в непосредственной близости к главному корпусу электростанции благодаря отводу из них влажного воздуха

на большой высоте. Целесообразность такого решения обычно подтверждалась и технико-экономическими расчетами, так как несколько бóльшая первоначальная стоимость башенных градирен компенсируется с избытком отсутствием затрат электроэнергии на создание тяги воздуха, меньшей стоимостью обслуживания и ремонта вследствие отсутствия вращающихся механизмов, возможностью сооружения градирен с большей единичной производительностью, позволяющей уменьшить площадь для сооружения охладителей и протяженность коммуникаций охлаждающей воды;

3) существующим в те годы законодательством, согласно которому расход электроэнергии на привод вентиляторов градирен, составляющий 0,5–0,7% общего ее количества, вырабатываемого электростанцией, относился на собственные нужды, что, естественно, было не выгодно для электростанции.

На сегодняшний день накоплен большой опыт эксплуатации башенных и вентиляторных градирен. Изменились условия их строительства и законодательство. Появились новые конструкции вентиляторов, оросителей, водоуловителей, водораспределительных устройств, значичельно повысились экологические требования к охладителям оборотной воды. Поэтому в последние годы специалистами все чаще обсуждается вопрос о возможности применения на ТЭС и АЭС для охлаждения оборотной воды вентиляторных градирен вместо башенных или совместно с ними.

Следует отметить, что сдерживающим фактором применения вентиляторных градирен на ТЭС и АЭС в нашей стране долгие годы являлось отсутствие отечественных вентиляторов большой производительности (диаметром 15–20 м). В настоящее время имеется возможность изготовления таких вентиляторов. Существует и опыт проектирования высокопроизводительных вентиляторных градирен для электростанций.

По результатам технологических расчетов и рекомендациям НИИ ВОДГЕО Союзводоканалпроектом запроектированы и реализованы в строительстве зарубежных ТЭС в странах с жарким климатом ($\tau \sim 22$–$24\,^{\circ}C$) градирни с отечественными вентиляторами ВГ 104. Подобные градирни, но с зарубежными вентиляторами диаметром 10,4 м проектировались для ТЭС жарких стран Теплоэлектропроектом при участии НИИ ВОДГЕО.

В пользу применения высокопроизводительных вентиляторных градирен на ТЭС и АЭС Российской Федерации могут

рассматриваться (при технико-экономическом анализе возможных вариантов охладителей) следующие обстоятельства.

1. Суровые климатические условия. Вентиляторные градирни лучше башенных противостоят сильным ветрам и обмерзанию, так как зимой могут работать с выключенными вентиляторами и соответственно при малой тяге воздуха.

2. На мощных ТЭС и АЭС при наличии нескольких водооборотных циклов с общим расходом оборотной воды более 500 тыс. $м^3/ч$ появилась необходимость в маневренности охлаждения воды в случаях резкой или частой смены тепловых нагрузок. Маневренность может быть достигнута изменением скорости вращения вентиляторов, их отключением или выводом из работы отдельных секций градирен. Бóльшее количество вентиляторных градирен при меньшей единичной производительности в сравнении с башенными позволяет автоматизировать режим подачи воздуха и воды на отдельные секции или на градирню в целом в зависимости от требуемой температуры охлаждения воды.

3. Требования упрощения, удешевления и сокращения сроков строительства. Вентиляторные градирни проще поддаются ремонту и демонтажу.

4. Появление на отечественном рынке доступных по цене вентиляторов большой производительности (диаметром 15–20 м).

5. Передача электростанциям функций самостоятельного решения финансовых и технических вопросов.

Целесообразность применения вентиляторных градирен на ТЭС и АЭС в климатических и эколого-экономических условиях Российской Федерации следует рассматривать конкретно для каждого объекта.

ГЛАВА 3

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ

Охлаждение воды в градирнях осуществляется путем передачи тепла атмосферному воздуху за счет поверхностного испарения воды и теплоотдачи соприкосновением (теплопроводность и конвекция). Тепло может отниматься от воды и

за счет излучения. Однако количество тепла, передаваемого излучением, настолько мало, что при составлении теплового баланса градирни им пренебрегают.

В течение большей части года преобладающую роль играет поверхностное испарение. Летом в жару на испарение приходится до 90% и более тепла, отдаваемого водой. Зимой возрастает теплоотдача соприкосновением до 50%, а в наиболее холодное время и до 70%, против 10–20% и менее в летний период.

"Движущей силой" процесса испарения воды в градирне является разность парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воздушного потока. При теплоотдаче соприкосновением такой движущей силой является разность температур воды и воздуха. В градирню поступает атмосферный воздух, являющийся влажным, так как всегда содержит в себе определенное количество паров воды, находящихся обычно в перегретом состоянии. Для термических расчетов градирен с достаточной степенью точности принимается, что влажный воздух, который можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяного пара, подчиняется законам смеси идеальных газов. Сухой воздух и пар занимают тот же объем, что и вся смесь.

Основными параметрами, характеризующими состояние влажного воздуха, являются давление, температура, плотность, влагосодержание, относительная влажность, энтальпия.

По закону Дальтона давление влажного воздуха, соответствующее барометрическому давлению $P_б$, равно сумме парциальных давлений сухого воздуха $P_{в.с}$ и водяного пара $P_п$:

$$P_б = P_{в.с} + P_п. \tag{3.1}$$

Парциальное давление водяного пара в градирне весьма мало сравнительно с очень незначительно меняющимся барометрическим давлением, поэтому в дальнейших выводах расчетных зависимостей принимается

$$P_{в.с} = P_б - P_п = \text{Const}. \tag{3.2}$$

Парциальные давления сухого воздуха и пара определяются из уравнения Менделеева–Клайперона:

$$P_{в.с}/\gamma_{в.с} = R_{в.с}\,T \cdot 10^{-4}; \qquad P_п/\gamma_п = R_п T \cdot 10^{-4}, \tag{3.3}$$

где T – температура, К; $\gamma_{в.с}$ – плотность сухого воздуха, кг/м³; $\gamma_п$ – плотность паров воды, кг/м³.

Плотность влажного воздуха равна сумме плотностей сухого воздуха и пара:

$$\gamma_в = \gamma_{в.с} + \gamma_п = \frac{P_б - \varphi P''_п}{R_{в.с}(\vartheta + 273{,}2)} + \varphi\gamma''_п. \tag{3.4}$$

Полезно отметить, что плотность влажного воздуха понижается с уменьшением давления, с повышением температуры и относительной влажности.

Количество водяных паров в воздухе характеризуется значением влагосодержания, представляющего собой отношение плотности водяного пара к плотности сухого воздуха, т. е.

$$x = \gamma_п/\gamma_{в.с}, \tag{3.5}$$

или

$$x = \frac{R_{в.с}}{R_п}\frac{P_п}{P_{в.с}} = 0{,}622\frac{P_п}{P_{в.с}} = 0{,}622\frac{\varphi P''_п}{P_б - \varphi P''_п}. \tag{3.6}$$

Относительной влажностью воздуха φ называется отношение плотности $\gamma_п$ водяного пара к максимальной его массе, которая могла бы содержаться в том же объеме при данной температуре. Полагая, что водяной пар подчиняется законам для идеальных газов, относительную влажность можно определить и как отношение парциального давления пара $P_п$, содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного пара $P''_п$ той же температуры:

$$\varphi = \gamma_п/\gamma''_п = P_п/P''_п. \tag{3.7}$$

Отсюда

$$P_п = \varphi P''_п; \qquad P_{в.с} = P_б - \varphi P''_п. \tag{3.8}$$

Энтальпию i влажного воздуха массой 1 кг при температуре его ϑ для расчетов градирни определяют по зависимости

$$i = c_{в.с}\vartheta + x(r + c_п\vartheta). \tag{3.9}$$

При этом с приближением, обеспечивающим достаточную точность, принимают: удельную теплоемкость сухого воздуха $c_{с.в} \approx 1$ кДж/кг (0,24 ккал/кг); теплоту парообразования $r \approx$

$\approx$ 2493 кДж/кг (595 ккал/кг) (при 0 °С); удельную теплоемкость пара $c_п \approx$ 1,97 кДж/кг (0,47 ккал/кг °С).

Связь между основными параметрами влажного воздуха для удобства практических расчетов и наглядности может быть представлена в графической форме. Наиболее широким распространением пользуются *i–d*-диаграммы, представляющие собой графические функциональные зависимости энтальпий от влагосодержаний с нанесенными линиями постоянных значений температур и относительных влажностей. Для улучшения развертывания линий φ = Const угол между осями координат принят равным 135°. Диаграммы строятся для определенных барометрических давлений 500, 740, 1000 мм рт. ст. и др. На рис. 3.1 в качестве примера показана *i–d*-диаграмма влажного воздуха при давлении 740 мм рт. ст. Это давление близко к норме для центрального района Европейской части России.

Состояние влажного воздуха по *i–d*-диаграмме определяется точкой, которая может быть найдена для данного давления по двум любым параметрам. Остальные параметры можно определить по линиям i = Const, t = Const, φ = Const, d = Const. Для определения парциального давления пара в нижней части диаграммы проведена вспомогательная кривая, опустив до которой линию d = Const можно прочесть значение парциального давления на правой ординате диаграммы. Парциальное давление воздуха согласно (3.2) находят как разность общего давления, для которого построена диаграмма, и определенного по ней парциального давления паров.

С помощью *i–d*-диаграммы можно получить наглядное представление о двух примечательных параметрах влажного воздуха, характеризующих начало конденсации паров в объеме воздуха и теоретический предел охлаждения воды воздухом.

Конденсация паров воды в воздухе (появление тумана) происходит при понижении его температуры ниже точки росы. Точкой росы называют температуру, до которой нужно охладить воздух при данных влагосодержании и давлении до состояния его насыщения. На *i–d*-диаграмме она находится в месте пересечения линии d = Const, опущенной из точки, характеризующей состояние влажного воздуха, с линией φ = = 100%.

Теоретическим пределом охлаждения воды воздухом является температура воздуха по смоченному термометру τ.

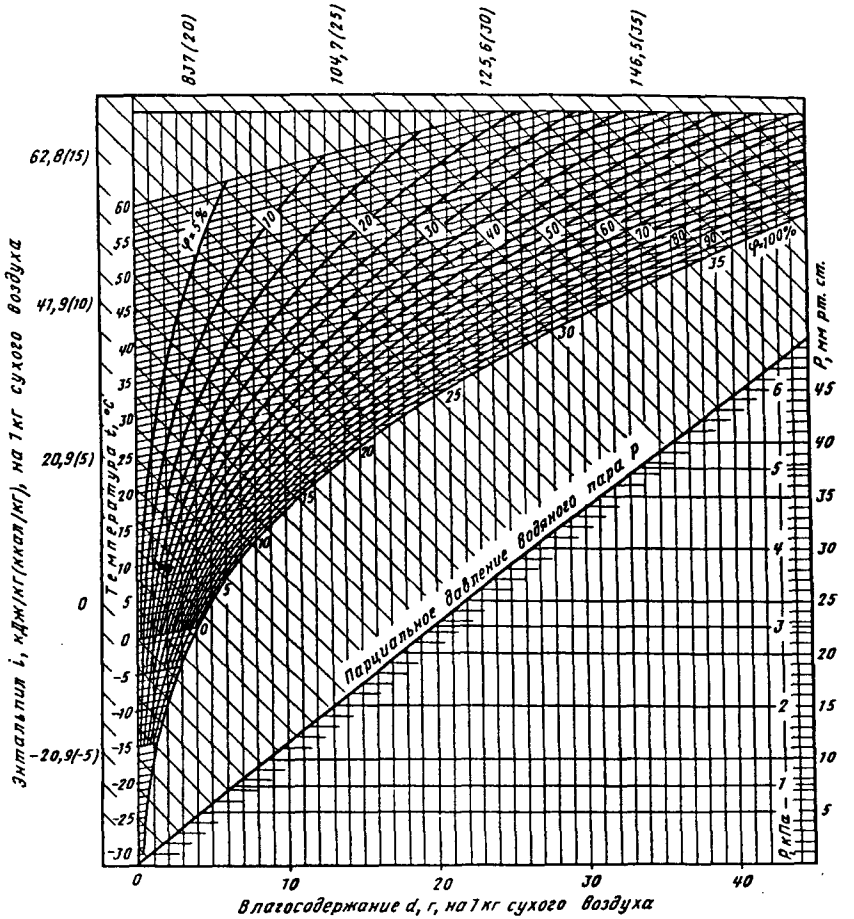


Рис. 3.1. *i–d*-Диаграмма влажного воздуха при давлении 740 мм рт. ст.

Она достигается путем увлажнения воздуха без дополнительного отвода или подвода тепла до состояния насыщения (φ = 100%), т. е. при адиабатическом испарении. На *i–d*-диаграмме значение τ определяется точкой пересечения лини i = Const, проходящей через точку, характеризующую состояние влажного воздуха, с линией φ = 100%. Из сказанного следует, что по значению τ можно однозначно определить значения энтальпии и влагосодержания воздуха.

Изложенное представление о параметре влажного воздуха τ является несколько упрощенным, но для практических расчетов охлаждающих устройств систем оборотного водоснабжения вытекающие из него следствия имеют более чем достаточную точность.

При ненасыщенном воздухе ($\varphi < 1$) температура τ всегда выше точки росы и приближается к последней с увеличением относительной влажности воздуха только при $\varphi = 1$, т. е. когда воздух насыщен водяным паром, предел охлаждения и точка росы, равные при этом и температуре воздуха ϑ по сухому термометру, совпадают между собой.

Пример 3.1. С помощью *i–d*-диаграммы требуется определить параметры влажного воздуха при $\vartheta = 26$ °С; $\varphi = 50\%$ и давлении $P_б = 740$ мм рт. ст.

На рис. 3.1 согласно выше приведенному описанию находим: точка росы составляет 15 °С; температура воздуха по смоченному термометру $\tau = 19$ °С; энтальпия $i = 54{,}4$ кДж/кг (13 ккал/кг); влагосодержание $d = 11$ г/кг, т. е. $x = 0{,}011$ кг/кг; парциальное давление водяного пара $P_п = 1{,}7$ кПа (13 мм рт. ст.).

ГЛАВА 4

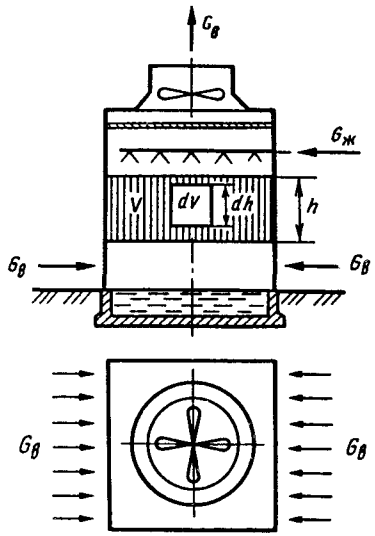
РАСЧЕТ ГРАДИРЕН

4.1. Расчетные зависимости

Градирня представляет собой теплообменный аппарат, в котором теплоноситель – вода передает тепло охлаждающему агенту – воздуху путем непосредственного контакта. Для обеспечения необходимой площади поверхности контакта градирня оборудуется специальным элементом – оросительным устройством (оросителем).

Значительный вклад в разработку методов расчета градирен внесен Ф. Меркелем, Б. В. Проскуряковым, Л. Д. Берманом, И. Лихтенштейном и другими авторами. Монография Л. Д. Бермана [27] до сегодняшнего дня является настольной книгой инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, эксплуатацией и исследованием охладителей оборотной воды. Наиболее широкое распространение и общее признание в мире получил метод Меркеля. Подробное изложение и обсуждение метода Меркеля опубликовано в ряде книг и многочисленных статьях.

Рис. 4.1. Схема противоточной градирни



В данном справочном пособии приведен в сжатом виде современный вариант вывода уравнений, описывающих процесс тепломассообмена в противоточных градирнях, применительно к практическим расчетам этих сооружений с учетом допущений, принятых Меркелем.

Баланс тепла, отдаваемого в градирне водой и воспринимаемого воздухом, представляется в следующем виде:

$$Q = c_ж[G_ж(t_1 - t_2) + G_и t_2] = G_в(i_2 - i_1). \qquad (4.1)$$

Материальный баланс (баланс влаги) определяется равенством между количеством испарившейся жидкости и приращением влагосодержания воздуха:

$$G_и = G_в(x_2 - x_1). \qquad (4.2)$$

При тепловом расчете градирен обычно задаются расходы и начальные параметры воды и воздуха, а конечные параметры t_2, i_2, x_2 остаются неизвестными. Очевидно, что двух уравнений (4.1) и (4.2) для их определения недостаточно. Поэтому приходится обращаться к уравнениям, описывающим процесс тепломассообмена между водой и воздухом в оросителе градирни. Они могут быть составлены лишь в дифференциальной форме, поскольку входящие в них параметры все время меняются по пути движения воды в оросителе.

Для элементарного объема оросителя dV с единичной площадью и высотой dh (рис. 4.1) имеем

$$dQ = \alpha(t - \vartheta)dV + i''_п dG_ж, \qquad (4.3)$$

где $i''_п = c_ж t + r$ – энтальпия пара при температуре воды t_1.

В (4.3) первый член правой части – тепло, передаваемое в элементарном объеме оросителя от воды к воздуху соприкосновением, а второй – тепло, передаваемое испарением.

Для определения количества испарившейся жидкости используют выражение

$$dG_{ж} = \beta_{xv}(x'' - x)dV, \tag{4.4}$$

подставляя которое в (4.3), получают

$$dQ = \alpha(t - \vartheta)dV + i''_{п}\beta_{xv}(x'' - x)dV. \tag{4.5}$$

Полагают, что совместные процессы тепло- и массообмена протекают в градирне при условиях, удовлетворяющих существованию аналогии между ними и соответственно соотношению Льюиса:

$$\alpha/\beta_{xv} = c_{вл}. \tag{4.6}$$

С учетом (4.6)

$$dQ = \beta_{xv}[c_{вл}(t - \vartheta) + i''_{п}(x'' - x)]dV. \tag{4.7}$$

Уравнение (4.7) с учетом известных зависимостей, характеризующих свойства влажного воздуха:

$$c_{вл} = c_{в.с} + c_{п}x; \tag{4.8}$$

$$i''_{п} \approx r + c_{п}t; \tag{4.9}$$

$$i''_{2} = c_{в.с}t + (r + c_{п}t)x''_{2}; \tag{4.10}$$

$$i_{1} = c_{в.с}\vartheta + (r + c_{п}\vartheta)x_{1}, \tag{4.11}$$

можно привести к виду

$$dQ = \beta_{xv}(i'' - i)dV, \tag{4.12}$$

или

$$Q = \beta_{xv}\int_{0}^{V}(i'' - i)dV = \beta_{xv}\Delta i_{ср}V. \tag{4.13}$$

Левую часть (4.1) несколько упрощаем путем ряда преобразований с использованием (4.2) и представляем в виде

$$Q = \frac{1}{K}G_{ж}tc_{ж}, \tag{4.14}$$

где

$$K = 1 - c_{ж}t_{2}/r. \tag{4.15}$$

Тогда из (4.13) и (4.14) имеем

$$Q = \frac{1}{K}G_{ж}\Delta tc_{ж} = G_{в}(i_{2} - i_{1}) = \beta_{xv}\Delta i_{ср}V. \tag{4.16}$$

Для элементарного объема оросителя dV, принимая с достаточной точностью $K = \text{Const}$, можно написать

$$dQ = \frac{1}{K}G_{ж}c_{ж}dt = G_{в}di = \beta_{xv}(i'' - i)dV. \tag{4.17}$$

Из уравнений (4.16) и (4.17) могут быть получены формулы для подсчета объема оросителя:

$$V = \frac{G_{ж}\Delta tc_{ж}}{K\beta_{xv}\Delta i_{ср}}; \tag{4.18}$$

$$V = \frac{G_{в}}{\beta_{xv}}\int_{i_1}^{i_2}\frac{di}{i'' - i}; \tag{4.19}$$

$$V = \frac{G_{ж}c_{ж}}{K\beta_{xv}}\int_{t_2}^{t_1}\frac{dt}{i'' - i}. \tag{4.20}$$

При этом $\Delta i_{ср}$ может быть представлено как

$$\Delta i_{ср} = \frac{\Delta t}{\int_{t_2}^{t_1} dt/(i'' - i)}; \tag{4.21}$$

$$\Delta i_{ср} = \frac{i_2 - i_1}{\int_{i_1}^{i_2} di/(i'' - i)}; \qquad (4.22)$$

$$\Delta i_{ср} = \frac{\Delta t c_ж}{K\lambda \int_{i_2}^{i_1} di/(i'' - i)}. \qquad (4.23)$$

Изменение энтальпии воздуха у поверхности воды и в основной массе потока (при противотоке) для наглядности показано графически на рис. 4.2. По оси ординат отложена энтальпия влажного воздуха, а по оси абсцисс – температура. Кривая AB представляет зависимость энтальпии насыщенного воздуха от температуры воды $i'' = f(t)$.

Линия $СД$ показывает изменение энтальпии i основной массы воздуха при движении его вдоль поверхности воды в зависимости от ее температуры, которая, пренебрегая термическим сопротивлением, принимается одинаковой и в толще потока и на его поверхности.

Из (4.16) для энтальпии уходящего воздуха имеем

$$i_2 = i_1 + \frac{G_ж \Delta t}{K G_в} = i_1 + \frac{t_1 - t_2}{K\lambda}. \qquad (4.24)$$

Подставляя в (4.24) вместо t_1 и i_2 промежуточные (текущие) значения этих величин t и i, получим следующую зависимость между энтальпией воздуха и температурой воды в каждом сечении оросителя:

$$i = i_1 + (t - t_2)/(K\lambda). \qquad (4.25)$$

Для сечения оросителя, в котором температура воды равна t, разность энтальпий воздуха $i'' - i$ определяется на рис. 4.2 отрезком "$ав$", отсюда ее значение i в интервале температур $t_1 - t_2$ соответствует прямой $СД$, наклон которой составляет $1/(K\lambda)$, т. е. при данном значении K энтальпия i зависит только от относительного расхода воздуха λ. Определив при помощи рис. 4.2 значения $i'' - i$, отвечающие различным значениям i

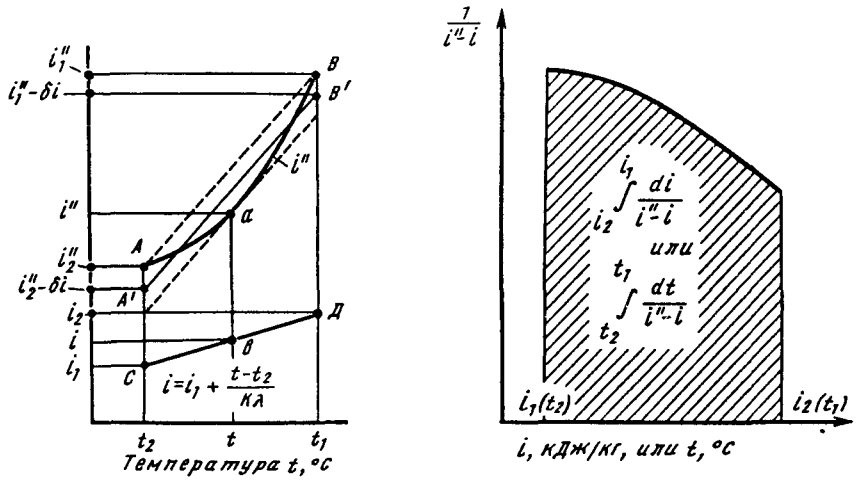


Рис. 4.2. Изменение энтальпии воздуха у поверхности воды и в основной массе потока (случай противотока)

Рис. 4.3. Схема к определению интегралов $f(i)$ или $f(t)$

или t, можно построить кривую $1/(i'' - i) = f(i)$ (рис. 4.3) или соответственно $1/(i'' - i) = f(t)$ и найти значение интеграла, равное площади, заключенной между этой кривой, осью абсцисс и ординатами i_1 и i_2 или t_1 и t_2 [см. (4.19) – (4.23)].

Определение объемного коэффициента массоотдачи. В расчетные формулы (4.18) – (4.20) для определения объема оросителя градирни входит объемный коэффициент массоотдачи β_{xv}, отнесенный к разности влагосодержаний воздуха. Теоретических методов для определения β_{xv} на сегодняшний день не существует из-за неизвестной площади поверхности контакта воды с воздухом в этом объеме. Поэтому β_{xv} находят экспериментально для каждого типа оросителя. Подсчеты его значения производят, исходя из уравнения (4.18), по формуле

$$\beta_{xv} = \frac{G_ж \Delta t c_ж}{KV \Delta i_{ср}}, \qquad (4.26)$$

в которую подставляют результаты измерений параметров работы и размеров градирни (оросителя), входящих в эту формулу.

Однако значения β_{xv}, подсчитанные по (4.26), действительны только для заданной конкретной градирни (оросителя),

работающей в тех условиях, при которых производились измерения входящих в эту формулу параметров, и не могут быть перенесены ни на другие градирни (оросители), ни на другие условия их работы. Следовательно, весьма затруднено и сопоставление различных оросителей. По значениям коэффициентов β_{xv} оросители можно сопоставлять только при одинаковых геометрических размерах, условиях и режимах работы. Чтобы результаты испытаний оросителей можно было переносить на другие условия и сопоставлять с результатами испытаний других их типов и конструкций, необходимо иметь соответствующие критерии, причем лучше в безразмерном виде.

Первые экспериментальные попытки установления таких критериев были выполнены Лихтенштейном в 1943 г. В результате многолетних исследований различных авторов и организаций отечественных и зарубежных стало к настоящему времени общепринятым в мировой практике представлять экспериментальные данные в виде графика зависимости

$$\beta_{xv}/q_{ж} = f(\lambda). \tag{4.27}$$

Этот график в логарифмических координатах представляет собой прямую линию, аналитическое выражение которой

$$\beta_{xv} = A\lambda^{m} q_{ж}. \tag{4.28}$$

Уравнение (4.28) показывает зависимость коэффициента массоотдачи β_{xv} от соотношения масс взаимодействующих воды и воздуха, а также от конструктивных особенностей оросителя градирни.

Первоначально эту зависимость представляли эмпирической формулой вида

$$\beta_{xv} = Aq_{ж}^{n} q_{в}^{m}, \tag{4.29}$$

которую иногда и теперь можно встретить в литературных источниках. Однако многочисленными опытами установлено, что $n + m = 1$. Это обстоятельство и привело к составлению уравнения (4.28).

Учитывая, что

$$G_{ж} = q_{ж}F, \tag{4.30}$$

$$V = hF, \tag{4.31}$$

и решая совместно (4.26) и (4.28), получаем

$$Ah\lambda^{m} = \frac{\Delta t G_{ж}}{K\Delta i_{ср}} = \mathrm{Me}, \tag{4.32}$$

т. е.

$$\mathrm{Me} = Ah\lambda^{m}. \tag{4.33}$$

Выражение (4.33) используется при построении графика $\mathrm{Me} = f(\lambda)$ в логарифмических координатах. Многочисленные эксперименты подтверждают, что такой график для рабочей зоны оросителя можно представить в виде прямой линии, отвечающей уравнению $\lg \mathrm{Me}/h = \lg A + m\lg\lambda$. Строго говоря, эта линия в некоторых случаях может иметь небольшой излом, что объясняется изменением режима движения воздуха от переходного к турбулентному. Место излома на оси λ зависит от конструкции оросителя и скорости воздуха между его элементами. Однако, учитывая сравнительно небольшой диапазон рабочих скоростей в градирнях, погрешность при определении значений A и m оросителя, вызываемая этим изломом, как правило, находится в пределах разброса точек результатов измерений, и обычно на практике ею пренебрегают.

По графику $\mathrm{Me} = f(\lambda)$ определяют значения A и m в формуле (4.32), которая является основным расчетным уравнением при обработке результатов испытаний охлаждающей способности оросителей градирен. Значения A и m можно также получить методом наименьших квадратов, подставляя последовательно данные нескольких опытов в (4.32).

Из (4.28), (4.32) и (4.33) имеем

$$\mathrm{Me} = \frac{\beta_{xv}h}{q_{ж}} = \frac{\Delta t c_{ж}}{K\Delta i_{ср}} \approx Ah\lambda^{m}. \tag{4.34}$$

Эти зависимости безразмерные и позволяют производить сопоставительные расчеты охлаждающей способности оросителей при различных условиях работы градирен.

Определение средней разности энтальпий воздуха и величин A и m. Расчеты градирен и обработка результатов их исследований по приведенным формулам требуют больших затрат времени и использования итерационных методов. Поэтому такие расчеты целесообразно производить на ПЭВМ. В НИИ ВОДГЕО разработан пакет программ для расчетов градирен, в

частности, для обработки результатов измерений при определении величин A и m. Для определения охлаждающей способности оросителя измеряются следующие параметры: скорость движения воздуха в свободном сечении градирни над оросителем ω, м/с; плотность орошения $q_ж$, $м^3/(м^2 \cdot ч)$; температура горячей воды на входе в градирню t_1, °С; температура охлажденной воды на выходе из градирни t_2, °С; барометрическое давление $P_б$, мм рт. ст.; температура воздуха по сухому ϑ и смоченному τ термометрам, °С. Кроме того, измеряется площадь оросителя в плане F, $м^2$, и его высота h, м.

Единицы измерения исходных данных приняты исходя из удобства работы с приборами при выполнении экспериментов. Пересчет единиц в единую систему предусмотрен в программе.

Обработка результатов измерений производится по формуле

$$Me = \frac{\Delta t c_ж}{K \Delta i_{ср}}, \tag{4.35}$$

где

$$\Delta t = t_1 - t_2. \tag{4.36}$$

Величина K подсчитывается по (4.15) как функция значения t_2:

$$K = 1 - 0{,}00173 t_2. \tag{4.37}$$

Средняя разность энтальпий воздуха может быть найдена несколькими способами. В программах реализовано два из них – приближенный по методу Л. Д. Бермана и интегральный, являющийся более точным.

Вычисление $\Delta i_{ср}$ по методу Л. Д. Бермана производится с помощью формулы

$$\Delta i_{ср} = [(i_1'' - i_2) - (i_2'' - i_1)] / \ln \frac{i_1'' - i_2 - \delta i''}{i_2'' - i_1 - \delta i''}. \tag{4.38}$$

Значения энтальпий подсчитываются следующим образом:

$$i_1'' = 0{,}24 t_1 + x_1''(595 + 0{,}47 t_1), \tag{4.39}$$

где

$$x_1'' = \frac{\varphi'' \gamma_{t_1}'' R_в (t_1 + 273{,}2)}{P_б - \varphi'' P_{t_1}''}; \tag{4.40}$$

$$i_2 = i_1 + \frac{c_ж \Delta t}{K \lambda}; \tag{4.41}$$

$$i_1 = 0{,}24 \vartheta + x_\vartheta (595 + 0{,}47 \vartheta), \tag{4.42}$$

где

$$x_\vartheta = \frac{\varphi \gamma_\vartheta'' R_в (\vartheta + 273{,}2)}{P_б - \varphi P_\vartheta''}. \tag{4.43}$$

Здесь γ_{t_1}'' и P_{t_1}'' – плотность и давление насыщенного водяного пара, которые определяются в зависимости от t_1 по табл. 4.1. Относительная влажность воздуха φ подсчитывается с помощью показаний психрометра по формуле

$$\varphi = \frac{P_\tau'' - 8{,}106(\vartheta - \tau)}{P_\vartheta''}. \tag{4.44}$$

При этом плотность γ_ϑ'' и давления P_ϑ'' и P_τ'' насыщенного водяного пара определяются по табл. 4.1 как функции соответствующих измеренных температур воздуха ϑ и τ.

Относительный расход воздуха

$$\lambda = \frac{G_в \gamma_в}{G_ж \gamma_ж} = \frac{3600 \omega \gamma_в}{q_ж}. \tag{4.45}$$

Расход воздуха

$$G_в = 3600 \omega F \gamma_в, \tag{4.46}$$

где

$$\gamma_в = \frac{P_б - \varphi P_\vartheta''}{R_в(\vartheta + 273{,}2)} + \varphi \gamma_\vartheta'', \tag{4.47}$$

а расход воды находится по (4.30).

Энтальпия и влагосодержание на выходе из градирни

$$i_2'' = 0{,}24 t_2 + x_2''(595 + 0{,}47 t_2), \tag{4.48}$$

$$x_2'' = \frac{\varphi'' \gamma_{t_2}'' R_в (t_2 + 273{,}2)}{P_б - \varphi'' P_{t_2}''}. \tag{4.49}$$

Здесь γ_{t_2}'' и P_{t_2}'' определяются при t_2 по табл. 4.1.

Таблица 4.1. **Давление и плотность насыщенного водяного пара в интервале температур −30 ÷ +100 °С**

t, °С	$P_{н.п}$ кПа	$P_{н.п}$ кг/м^2	$\gamma_{н.п} \cdot 10^3$, кг/м^3	t, °С	$P_{н.п}$ кПа	$P_{н.п}$ кг/м^2	$\gamma_{н.п} \cdot 10^3$, кг/м^3
−30	0,037	3,807	0,33	12	1,402	142,9	10,7
−29	0,041	4,228	0,37	13	1,497	152,6	11,4
−28	0,046	4,69	0,41	14	1,598	162,9	12,1
−27	0,051	5,207	0,46	15	1,705	173,8	12,8
−26	0,057	5,778	0,51	16	1,817	185,3	13,6
−25	0,063	6,403	0,55	17	1,937	197,4	14,5
−24	0,069	7,083	0,6	18	2,063	210,3	15,4
−23	0,071	7,831	0,66	19	2,197	223,9	16,3
−22	0,085	8,646	0,73	20	2,338	238,3	17,3
−21	0,093	9,53	0,8	21	2,486	253,4	18,3
−20	0,103	10,5	0,88	22	2,643	269,4	19,4
−19	0,113	11,56	0,96	23	2,809	286,3	20,6
−18	0,125	12,71	1,05	24	2,983	304	21,8
−17	0,137	13,96	1,15	25	3,167	323	23
−16	0,15	15,34	1,27	26	3,36	343	24,4
−15	0,165	16,83	1,38	27	3,564	363	25,8
−14	0,181	18,45	1,51	28	3,779	385	27,2
−13	0,198	20,2	1,65	29	4,004	408	28,7
−12	0,217	22,12	1,8	30	4,242	433	30,3
−11	0,237	24,2	1,96	31	4,492	458	32,1
−10	0,259	26,46	2,14	32	4,753	485	33,9
−9	0,283	28	2,33	33	5,029	513	35,7
−8	0,309	31,55	2,54	34	5,319	542	37,6
−7	0,338	34,42	2,76	35	5,622	573	39,6
−6	0,368	37,53	2,99	36	5,94	606	41,8
−5	0,401	40,89	3,24	37	6,274	640	44
−4	0,437	44,54	3,51	38	6,618	676	46,3
−3	0,375	48,48	3,81	39	6,99	713	48,7
−2	0,517	52,7	4,13	40	7,374	752	51,2
−1	0,562	57,3	4,47	45	9,582	977	65,4
0	0,608	62,3	4,85	50	12,33	1258	83
1	0,657	66,9	5,22	55	15,73	1605	104,3
2	0,705	71,9	5,56	60	19,92	2031	130,2
3	0,758	77,2	5,94	65	24,99	2550	161,1
4	0,813	82,9	6,4	70	31,15	3177	198,1
5	0,872	88,9	6,84	75	38,54	3931	241,8
6	0,934	95,3	7,3	80	47,33	4829	293,3
7	1,001	102,1	7,8	85	57,8	5894	353,4
8	1,073	109,3	8,3	90	70,09	7149	422,9
9	1,148	117	8,8	95	84,5	8618	504,5
10	1,228	125,1	9,4	100	101,3	10 332	597,7
11	1,312	133,8	10				

Поправка к энтальпии

$$\delta i'' = (i_1'' + i_2'' - 2i_m'')/4, \tag{4.50}$$

где

$$i_m'' = 0{,}24t_m + x_m''(595 + 0{,}47t_m). \tag{4.51}$$

Здесь

$$x_m'' = \frac{\varphi'' \gamma_m'' R_в (t_m + 273{,}2)}{P_б - \varphi'' P_{t_m}''}. \tag{4.52}$$

Средняя температура воды в градирне

$$t_m = (t_1 + t_2)/2. \tag{4.53}$$

При этом γ_{t_m}'' и P_{t_m}'' определяются как функции t_m по табл. 4.1.

По интегральному методу $\Delta i_{ср}$ подсчитывается путем интегрирования способом Симпсона выражения

$$\Delta i_{ср} = (t_1 - t_2) \Big/ \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{i'' - i}, \tag{4.54}$$

в котором i определяется как функция текущей координаты t по (4.25), а

$$i'' = 0{,}24t + x''(595 + 0{,}47t), \tag{4.55}$$

где

$$x'' = \frac{\varphi'' \gamma_t'' R_в (t + 273{,}2)}{P_б - \varphi'' P_t''}. \tag{4.56}$$

Значения t задаются шагом отрезков при вычислении интеграла.

Подставляя данные нескольких (обычно 15–25) опытов в (4.35) находят значения критерия Ме для соответствующих условий, а затем по (4.33) определяют методом наименьших квадратов значения A и m для испытанной градирни или исследованной конструкции оросителя.

Значения критерия Ме в зарубежных публикациях с некоторых пор считается наиболее удобным и достаточно точным подсчитывать четырех точечным численным методом Чебышева. (П. Л. Чебышев (1821–1894 гг.) – великий русский математик, академик. В частности, им создана теория наилучшего приближения функций с помощью многочленов, одним из практических приложений которой и является изложенный ниже метод.) Предварительно формула (4.35) путем подстановки в нее значения $\Delta i_{ср}$ из (4.21) приводится к виду

$$\text{Ме} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{c_ж\, dt}{K(i''-i)} = \frac{c_ж}{K}\int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{i''-i}. \qquad (4.57)$$

Решение интеграла (4.57) по методу Чебышева производится так:

$$\int_{t_2}^{t_1} \frac{c_ж\, dt}{K(i''-i)} = \frac{c_ж \Delta t}{4K}\left[\frac{1}{(i''-i)_1} + \frac{1}{(i''-i)_2} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{(i''-i)_3} + \frac{1}{(i''-i)_4}\right], \qquad (4.58)$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$; $(i''-i)_1$ – значение $i''-i$ при $T_1 = t_2 + 0{,}1\Delta t$; $(i''-i)_2$ – то же при $T_2 = t_2 + 0{,}4\Delta t$; $(i''-i)_3$ – то же при $T_3 = t_1 - 0{,}4\Delta t$; $(i''-i)_4$ – то же при $T_4 = t_1 - 0{,}1\Delta t$.

Значения энтальпий, соответствующие температурам T_1 – T_4, в (4.58) определяются как функции текущей координаты t по формулам (4.55) и (4.25).

Определение аэродинамического сопротивления оросителя. Подсчет аэродинамического сопротивления оросителя производится по формуле

$$\Delta P = \zeta_{ор}\, \gamma_в \omega^2/(2g). \qquad (4.59)$$

Правая часть (4.59) без $\zeta_{ор}$ представляет собой динамическое давление в потоке воздуха на входе в ороситель, т. е.

$$P_д = \gamma_в \omega^2/(2g). \qquad (4.60)$$

Отсюда значение $\zeta_{ор}$ может быть представлено в виде

$$\zeta_{ор} = \Delta P/P_д. \qquad (4.61)$$

При неизменной по высоте площади горизонтального сечения оросителя потери полного давления в нем равны разности статических давлений под и над оросителем:

$$\Delta P = P_{полн2} - P_{полн1} = (P_д + P_{ст})_2 -$$

$$- (P_д + P_{ст})_1 = P_{ст2} - P_{ст1}. \qquad (4.62)$$

Статическое давление под оросителем

$$P_{ст1} = (H_1 - H_0) \qquad (4.63)$$

и над оросителем

$$P_{ст1} = (H_2 - H_0). \qquad (4.64)$$

Зависимость аэродинамического сопротивления оросителя от плотности орошения выражается экспериментальной формулой

$$\zeta_{ор} = h(\zeta_{с.о} + K_{ор}\, q_ж). \qquad (4.65)$$

В качестве расчетных аэродинамических характеристик оросителя используются величины $\zeta_{с.о}$ и $K_{ор}$. Для их нахождения проводится серия измерений (аэродинамических исследований) при различных плотностях орошения и скоростях воздуха, в том числе и на сухом оросителе (без подачи воды). По (4.59) – (4.62) находят значения $\zeta_{ор}$ и $\zeta_{с.о}$, которые затем усредняются по результатам всех измерений или в определенном диапазоне. Затем, исходя из (4.65), определяют значение $K_{ор}$:

$$K_{ор} = (\zeta_{ор} - \zeta_{с.о})/q_ж. \qquad (4.66)$$

Значения $\zeta_{ор}$ и $\zeta_{с.о}$ в (4.66) относятся к 1 м высоты оросителя.

Для оценки гидродинамического режима потока воздуха в оросителях производят также подсчет чисел Рейнольдса Re по известной формуле. Для определения аэродинамического сопротивления оросителя и числа Re измеряют следующие параметры: скорость движения воздуха в свободном сечении

градирни над оросителем ω, м/с; плотность орошения $q_ж$, м³/(м² · ч); температуру воздуха по сухому термометру ϑ, °С; показания микроманометров от датчиков давления под H_1 и над H_2 оросителем, кг/м².

Кроме того, регистрируются: начальное (нулевое) показание микроманометра H_0, кг/м²; степень наклона трубки микроманометра N (безразмерная); характерный размер d, м.

Выходная информация расчета аэродинамических сопротивлений оросителя представляет собой таблицу, которая содержит значения расчетных коэффициентов $\zeta_{с.о}$ и $K_{ор}$. В ее заголовке помещают описание конструкции оросителя и его основные размеры, указывают дату испытаний и исполнителей. В таблице приводят также результаты измерений, промежуточные и окончательные подсчеты. Поскольку значения $\zeta_{с.о}$ и $K_{ор}$ зависят от числа Re (скорости воздуха), в нижней ее части дают усредненные значения $\zeta_{с.о}$ и $K_{ор}$ в узком рабочем диапазоне скоростей воздуха и максимальные отклонения в процентах от этих усредненных значений с указанием соответствующей скорости движения воздуха.

В литературе, в том числе проспектах и каталогах, в качестве характеристики аэродинамического сопротивления иногда указывают критерий Эйлера Eu (см. § 6.1).

4.2. Исходные данные

В расчетные зависимости, отражающие или определяющие работу градирни согласно § 4.1, входят следующие величины: расход воды; расход воздуха; температуры входящей и выходящей воды; расчетные атмосферные параметры (климатические условия), определяющие энтальпию и плотность входящего воздуха, а также предел охлаждения воды в градирне; технологические характеристики оросителя; площадь орошения оросителя (градирни).

В зависимости от задачи расчета одна из указанных величин может быть искомой, а остальные заданы. При этом климатические условия (расчетные атмосферные параметры) должны быть всегда заданы.

Расход воды (гидравлическая нагрузка $G_ж$) обычно задается технологами производства исходя из теплотехнических расчетов охлаждаемого водой оборудования – конденсаторов, холодильников, компрессоров, различных технологических

аппаратов, металлургических агрегатов и др. Расход воздуха (расчетная подача воздуха вентилятором) определяется аэродинамическим расчетом градирни (см. гл. 6 и 7).

Температуры входящей t_1 и выходящей t_2 воды устанавливаются технологами производства на основании теплотехнических расчетов с учетом характеристик охлаждаемого оборудования. Следует иметь ввиду, что температуры оборотной воды, особенно t_2, могут иметь весьма существенное влияние на параметры технологического процесса, размеры градирен, диаметры труб, подачу насосов и производительность другого оборудования, а также на потребление электроэнергии. Поэтому целесообразно определять t_2, а также расход охлаждаемой воды $G_ж$ путем технико-экономических расчетов совместной работы всех сооружений водооборотного цикла – технологического оборудования, градирен, циркуляционной насосной станции и установок для очистки и подготовки воды. Однако эти расчеты не всегда выполнимы. В этом случае при проектировании рекомендуется принимать расчетное значение t_2 исходя из условия, чтобы разность $t_2 - \tau$ была не менее 5 °С. Самые низкие значения разности $t_2 - \tau$ могут быть приняты лишь в том случае, когда это диктуется жесткими требованиями производства (см. гл. 5). По экономико-практическим соображениям во всех случаях разность $t_2 - \tau$ не должна быть меньше 2 °С.

Расчетные параметры атмосферного (входящего) воздуха задаются в соответствии с материалами, приведенными далее (см. гл. 5). Технологические характеристики оросителя (A, m, $\zeta_{с.о}$ и $K_{ор}$) принимаются по результатам его исследований или по литературным данным (см. гл. 8.1). Площадь оросителя (градирни, секции) определяется расчетом, но может быть и задана (в зависимости от назначения расчета).

4.3. Способы расчета

Технологические расчеты градирен необходимо производить при разработке новых сооружений, подборе и переработке проектов (типовых или других готовых), для привязки к условиям конкретного предприятия, при оценке работы действующей градирни в процессе эксплуатации и реконструкции.

Наиболее часто выполняются три вида расчетов: определение температуры охлажденной на градирне воды t_2, плотности

орошения $q_ж$ и площади орошения градирни F. Указанные искомые параметры находятся из совместного решения (4.26) и (4.28). В зависимости от назначения расчета изменяется состав исходных данных и применяемая формула расчета.

Определение t_2 производится по формуле

$$t_2 = t_1 - A\lambda^m h K \Delta i_{ср} / c_ж. \quad (4.67)$$

Задаются площадь орошения секции или градирни, климатические условия (ϑ, τ, φ, $P_б$), технологические и конструктивные характеристики оросителя (A, m, $\zeta_{ор}$, $K_{ор}$, h, $q_ж$).

Вычисление $q_ж$ производится по формуле

$$q_ж = \beta_{xv}/(A\lambda^m). \quad (4.68)$$

Задаются площадь орошения секции или градирни, климатические условия (ϑ, τ, φ, $P_б$), технологические и конструктивные характеристики оросителя (A, m, $\zeta_{ор}$, $K_{ор}$, h), температуры воды (t_1, t_2).

Определение F производится по формуле

$$F = \frac{G_ж \Delta t c_ж}{K h \Delta i_{ср} \beta_{xv}}. \quad (4.69)$$

Задаются климатические условия (ϑ, τ, φ, $P_б$), технологические и конструктивные характеристики оросителя (A, m, $\zeta_{ор}$, $K_{ор}$, h), температуры воды (t_1, t_2), расход охлаждаемой воды ($G_ж$).

Нахождение искомых величин по формулам (4.67) – (4.69) может быть выполнено только итерационными методами (подбором), поскольку эти величины входят в обе части уравнений и не могут быть разделены. Для решения этих уравнений может быть применен любой из трех способов расчета: с помощью ПЭВМ по специально составленным программам, по графикам или "вручную".

Программы расчета. По приведенным выше формулам и расчетным зависимостям НИИ ВОДГЕО в 1990–92 гг. составлен пакет программ для расчетов вентиляторных градирен на ПЭВМ УВМ РС/АТ. Программы широко применяются для расчетов градирен как самим институтом, так и проектными организациями, для которых они составлены. Программы позволяют определять потребную площадь орошения градирни,

число секций, плотность орошения, подачу и скорость движения воздуха, температуру охлажденной воды.

В программах приняты следующие диапазоны возможных изменений входных параметров:

Параметр	Нижний предел	Верхний предел
$q_ж$, м^3/(м^2 · ч)	1	26
t_1, °С	5	60
t_2, °С	0	45
ϑ, °С	–30	50
τ, °С	–30	40
φ, °С	1	100
$P_б$, мм рт. ст	500	800
h, м	0,1	4
A, 1/м	0,1	1,5
m	0	1

Выходные данные расчетов по программам распечатываются в следующем виде: перечень исходных данных, результаты расчетов в виде таблицы, в которой также отражена часть исходных данных. Перевод буквенных обозначений, свойственных ЭВМ, на общепринятые дан в табл. 4.2.

Таблица 4.2. **Условные обозначения**

Обозначение		Величина
общепринятое	в выходных данных программ	
F_c	F^{сек}	Площадь орошения секции градирни, м^2
$F_{общ}$	F^{общ}	Площадь орошения всей градирни, м^2
$G_в$	GB	Подача воздуха вентилятором, м^3/ч
ω	W	Скорость воздуха в градирне, м/с
ϑ	TET	Температура атмосферного воздуха по сухому термометру, °С
τ	TAU	То же по смоченному термометру, °С
φ	F1	Относительная влажность атмосферного воздуха, %
$P_б$	PB	Барометрическое давление, мм рт. ст.
h	HOR	Высота оросителя градирни, м
$G_ж$	GG	Гидравлическая нагрузка (расход оборотной воды), м^3/ч
$q_ж$	QG	Плотность орошения градирни, м^3/(м^2 · ч)
t_1	T1	Температура воды на входе в градирню, °С
t_2	T2	То же на выходе из градирни, °С
Δt	DT	Перепад воды в градирне, °С

Продолжение табл. 4.2

Обозначение		Величина
общепринятое	в выходных данных программ	
$\gamma_в$	GAM	Плотность атмосферного воздуха, кг/м^3
$\lambda = q_в/q_ж$	L	Относительный расход воздуха в градирне, кг/кг
A	A	Коэффициент в (4.28), характеризующий охлаждающую способность градирни
m	M	Показатель степени в (4.28)
Φ	Ф	Коэффициент, учитывающий влияние формы секции в плане на общее сопротивление градирни
D	D	Диаметр вентилятора, м
H_0	H0	Напор (условный) при нулевой подаче воздуха, кг/м^2
$K_х \cdot 10^{10}$	KX*10**10	Коэффициент характеристики вентилятора, определяемый согласно теории размерности в кг · ч^2/м^8
$\zeta_{вх}$	DZBX	Коэффициент сопротивления на входе в градирню
$\zeta_{ву}$	DZBY	Коэффициент аэродинамического сопротивления водоуловителя
$\zeta_{вр}$	DZBR	Коэффициент аэродинамического сопротивления водораспределителя
$\zeta_п$	DZPOD	Коэффициент аэродинамического сопротивления при подходе воздуха к вентилятору по пути от водоуловителя до обечайки
$\zeta_{ор}$	DZOR	Коэффициент аэродинамического сопротивления оросителя
$K_{ор}$	KOR	Коэффициент сопротивления дождя в оросителе
$K_{вр}$	KBR	Коэффициент сопротивления дождя в водораспределительном устройстве, принятый для трубчатого водораспределителя с тангенциальными пластмассовыми соплами НИИ ВОДГЕО по данным натурных исследований равным 0,1
l	DL	Половина длины подоросительного расстояния от воздуховходных окон до центра градирни, м
$h_{вр}$	HBR	Высота дождя в водораспределителе (обычно при соплах факелами вниз равна 0,8 м)
$\zeta_с$	DZсек	Коэффициент аэродинамического сопротивления секции градирни
$\zeta_д$	DZD	Коэффициент аэродинамического сопротивления при подаче на градирню воды
$K_з$	KZ	Коэффициент заполнения потоком воздуха площади оросителя
R	RB	Газовая постоянная для сухого воздуха, равная 287,1 кДж/(кг · К) [29,27 кгм/(кг · °С)]
$П$	П	Коэффициент размерности для перехода к безразмерному значению $\zeta_д$, равный 1 ч/м^2

Пример 4.1. Определить температуру охлажденной воды t_2 при трех значениях t_1 (32, 35 и 40 °С) для реконструируемой вентиляторной секционной градирни, построенной по ТП 901–6–30. Заданные условия: площадь орошения секции 144 м^2; климатические расчетные данные – ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57%, $P_б$ = 750 мм рт. ст; технологические и конструктивные характеристики оросителя (призма ПР50) – h = 1 м, A = 1,05 1/м, m = 0,36, $\zeta_{ор}$ = 11,44, $K_{ор}$ = 0,393; плотность орошения $q_ж$ = = 10,42 м^3/(м^2 · ч).

Решение. Этап 1. Производится аэродинамический расчет подачи воздуха вентилятором. Для этого исходные данные вносятся в расчетный бланк табл. 4.3. Отсутствующие в задании данные по аэродинамическим характеристикам градирни и вентилятора принимаются по материалам, приведенным далее (см. гл. 6).

Этап 2. Производится тепловой расчет градирни. Для этого заполняется бланк "Расчет охлаждения воды" (табл. 4.4), куда помимо исходных данных вносятся из табл. 4.5 GB = = 1 244 000 м^3/ч и W = 2,4 м/с, полученные в результате аэродинамического расчета на ЭВМ. Из табл. 4.6 имеем, что искомые значения температуры охлажденной воды для данных

Таблица 4.3. **Аэродинамический расчет подачи воздуха вентилятором**

Исходные данные:

Градирня: ТП 901–6–30
$F_с$ = 144 м^2; Φ = 1.
Вентилятор: 1ВГ 70
H_0 = 22,7 кг/м^2; $K_х \cdot 10^{10}$ = 0,055 кг · ч^2/м^8; D = 7 м.
Ороситель: Призма ПР50.

Коэффициенты сопротивления:

$\zeta_{вх}$ = 1; $\zeta_{вр}$ = 0,4;
$\zeta_{ву}$ = 4,7; $\zeta_п$ = 10;
$K_{ор}$ = 0,393; $K_{вр}$ = 0,1.

l = 3 м; $h_{вр}$ = 2,1 м.

h, м	$q_ж$, м^3/(м^2 · ч)	$\zeta_{ор}$, 1/м
1,0	10,42	11,44

Таблица 4.4. **Расчет охлаждения воды**

Исходные данные:

Градирня: ТП 901–6–30
$F_c = 144\ м^2$.
Вентилятор: 1ВГ 70
$G_в \cdot 10^{-3} = 1244\ м^3/ч$; $\omega = 2{,}4\ м/с$.
Ороситель: Призма ПР50
$A = 1{,}05\ 1/м$; $m = 0{,}36$; $h = 1\ м$.
Климатические условия:
$\vartheta = 24{,}5\ °C$; $\tau = 19\ °C$; $\varphi = 57\%$; $P_б = 750\ мм\ рт.\ ст.$
Определение: $t_2\ (t;\ q_ж;\ F_{общ})$.

t_1, °C	$G_ж$, $м^3/ч$	$q_ж$, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	t_2, °C	$F_{общ}$, $м^2$
32	1500	10,42		
35	1500	10,42		
40	1500	10,42		

Таблица 4.5. **Выходная информация**

Аэродинамический расчет

Градирня: ТП 901-6-30
$F_c = 144\ м^2$; $\Phi = 1$.
Вентилятор: 1ВГ70
$H_0 = 22{,}7\ кг/м^2$; $K_x \cdot 10^{10} = 0{,}055\ кг \cdot ч^2/м^8$; $D = 7\ м$.
Ороситель: Призма ПР50.

Коэффициенты сопротивления:

$\zeta_{вх} = 1$; $\zeta_{вр} = 0{,}4$;
$\zeta_{ву} = 4{,}7$; $\zeta_п = 10$;
$K_{ор} = 0{,}393$; $K_{вр} = 0{,}1$.

$l = 3\ м$; $h_{вр} = 2{,}1\ м$.

h, м	$q_ж$, м/ч	$\zeta_{ор}$, 1/м	ζ_D	ζ_c	$K_з$	$G_B \cdot 10^{-3}$ $м^3/ч$	ω, м/с
1	10,42	11,4	9,41	36,9	0,96	1244	2,4

Таблица 4.6. **Выходная информация**

Расчет охлаждения воды

Градирня: ТП 901-6-30
$F_c = 144\ м^2$.
Вентилятор: 1ВГ 70
$G_B \cdot 10^{-3} = 1244\ м^3/ч$; $\omega = 2{,}4\ м/с$.
Ороситель: Призма ПР50
$A = 1{,}05\ 1/м$; $m = 0{,}36$.
Климатические условия:
$\vartheta = 24{,}5\ °C$; $\tau = 19\ °C$; $\varphi = 57\%$; $P_б = 750\ мм\ рт.\ ст.$
Определение: t_2

h, м	$q_ж$, $м^3/м^2 \cdot ч$	t_1, °C	γ, $кг/м^3$	L, кг/кг	t_2, °C	Δt, °C
1	10,42	32	1,163	0,96	25,6	6,4
1	10,42	35	1,163	0,96	26,8	8,2
1	10,42	40	1,163	0,96	28,7	11,3

условий при $t_1 = 32$, 35 и 40 °C будут составлять соответственно: $t_2 = 25{,}6$; 26,8 и 28,7 °C.

Пример 4.2. Определить плотность орошения $q_ж$ для реконструируемой вентиляторной секционной градирни, построенной по ТП 901–6–61. Заданные условия: площадь орошения секции 192 $м^2$; климатические расчетные данные – $\vartheta = 27{,}9$ °C, $\tau = 19{,}3$ °C, $\varphi = 41\%$, $P_б = 750$ мм рт. ст.; технологические и конструктивные характеристики оросителя (капельно-пленочный из гофротруб ϕ 63 мм) – $h = 2{,}35$ м, $A = 0{,}36$ 1/м, $m = 0{,}28$, $\zeta_{ор} = 3{,}48$ 1/м, $K_{ор} = 0{,}026$; температуры воды заданы с разбивкой через 2 °C для $t_1 = 30 \div 40$ °C при $\Delta t = 8$ °C и $t_1 = 27 \div 35$ °C при $\Delta t = 5$ °C.

Решение. Этап 1. Производится аэродинамический расчет подачи воздуха вентилятором аналогично расчету в примере 4.1. Значение $q_ж$ для этого расчета принимается усредненным по экспертной оценке [в данном случае $q_ж = 10\ м^3/(м^2 \cdot ч)$] (табл. 4.7).

Этап 2. Производится тепловой расчет градирни. Для этого заполняется бланк "Расчет охлаждения воды" (табл. 4.8), куда помимо исходных данных вносятся из табл. 4.9 GB = = 1 428 000 $м^3/ч$ и W = 2,07 м/с, полученные в результате аэродинамического расчета на ЭВМ. В табл. 4.10 представлена вы-

Таблица 4.7. **Аэродинамический расчет подачи воздуха вентилятором**

Исходные данные:

Градирня: ТП 901–6–61 (реконструируемая)
$F_c = 192\ м^2$; $\Phi = 1{,}1$.
Вентилятор: 1ВГ 70
$H_0 = 22{,}7\ кг/м^2$; $K_\chi \cdot 10^{10} = 0{,}0550\ кг \cdot ч^2/м^8$; $D = 7\ м$.
Ороситель: Гофротрубы ϕ 63 мм.

Коэффициенты сопротивления:

$\zeta_{вх} = 1$; $\zeta_{вр} = 0{,}4$;
$\zeta_{ву} = 4{,}7$; $\zeta_п = 10$;
$K_{ор} = 0{,}026$; $K_{вр} = 0{,}1$;

$l = 4\ м$; $h_{вр} = 0{,}8\ м$.

h, м	$q_ж$, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	$\zeta_{ор}$, 1/м
2,35	10	3,48

Таблица 4.8. **Расчет охлаждения воды**

Исходные данные:

Градирня: ТП 901–6–61 (реконструируемая)
$F_c = 192\ м^2$.
Вентилятор: 1ВГ 70
$G_в \cdot 10^{-3} = 1428\ м^3/ч$; $\omega = 2{,}07$ м/с.
Ороситель: Гофротрубы ϕ 63 мм
$A = 0{,}36$ 1/м; $m = 0{,}28$; $h_{ор} = 2{,}35$ м.
Климатические условия:
$\vartheta = 27{,}9\ °C$; $\tau = 19{,}3\ °C$; $\varphi = 41{,}2\%$; $P_б = 750$ мм рт. ст.
Определение: $q_ж$ (t_2; $q_ж$; $F_{общ}$).

t_1, °C	$G_ж$, $м^3/ч$	$q_ж$, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	t_2, °C	$F_{общ}$, $м^2$
30			22	
32			24	
34			26	
36			28	
38			30	
40			32	
42			34	
27			22	
29			24	
31			26	
33			28	
35			39	

Таблица 4.9. **Выходная информация**

Аэродинамический расчет

Градирня: ТП 901-6-61
$F_c = 192\ м^2$; $\Phi = 1{,}1$.
Вентилятор: 2ВГ 70
$H_0 = 22{,}7\ кг/м^2$; $K_\chi \cdot 10^{10} = 0{,}055\ кг \cdot ч^2/м^8$; $D = 7\ м$.
Ороситель: Капельно-пленочный.

Коэффициенты сопротивления:

$\zeta_{вх} = 1$; $\zeta_{вр} = 0{,}4$;
$\zeta_{ву} = 4{,}7$; $\zeta_п = 10$;
$K_{ор} = 0{,}026$; $K_{вр} = 0{,}1$.

$l = 4$ м; $h_{вр} = 0{,}8$ м.

h, м	$q_ж$, м/ч	$\zeta_{ор}$, 1/м	ζ_D	ζ_c	$K_з$	$G_B \cdot 10^{-3}$, $м^3/ч$	ω, м/с
2,35	10	3,48	5,41	32,12	0,85	1428	2,07

Таблица 4.10. **Выходная информация**

Расчет охлаждения воды

Градирня: ТП 901-6-61
$F_c = 192\ м^2$.
Вентилятор: 1ВГ 70
$G_B \cdot 10^{-3} = 1428\ м^3/ч$; $\omega = 2{,}07$ м/с.
Ороситель: Капельно-пленочный
$A = 0{,}36$ 1/м; $m = 0{,}28$.
Климатические условия:
$\vartheta = 27{,}9\ °C$; $\tau = 19{,}3\ °C$; $\varphi = 41\%$; $P_б = 750$ мм рт. ст.
Определение: $q_ж$

h, м	t_1, °C	t_2, °C	Δt, °C	γ, $кг/м^3$	L, кг/кг	$q_ж$, $м^3/м^2 \cdot ч$
2,35	30	22	8	1,151	7,65	1,12
2,35	32	24	8	1,151	3,02	2,83
2,35	34	26	8	1,151	1,60	5,34
2,35	36	28	8	1,151	1,00	8,52
2,35	38	30	8	1,151	0,70	12,30
2,35	40	32	8	1,151	0,52	16,57
2,35	42	34	8	1,151	0,40	21,40
2,35	27	22	5	1,151	3,58	2,39
2,35	29	24	5	1,151	1,49	5,74

Продолжение табл. 4.10

h, м	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	γ, кг/м^3	L, кг/кг	$q_ж$, м^3/м^2·ч
2,35	31	26	5	1,151	0,85	10,11
2,35	33	28	5	1,151	0,56	15,22
2,35	35	30	5	1,151	0,41	20,88

Таблица 4.11. **Расчет охлаждения воды**

Исходные данные:

Градирня: ТЭП
$F_c = 360$ м^2.
Вентилятор: ВГ 104
$G_в \cdot 10^{-3} = 2700$ м^3/ч; $\omega = 2{,}08$ м/с.
Ороситель: Пленочный асбестоцементный
$A = 0{,}455$ 1/м; $m = 0{,}66$; $h_{ор} = 2{,}8$ м.
Климатические условия:
$\vartheta = 47$ °С; $\tau = 29$ °С; $\varphi = 24\%$; $P_б = 630$ мм рт. ст.
Определение: $F_{общ}$ (t_2; $q_ж$; $F_{общ}$).

t_1, °С	$G_ж$, м^3/ч	$q_ж$, м^3/(м^2 · ч)	t_2, °С	$F_{общ}$, м^2
42,7	74 500		33	

Таблица 4.12. **Выходная информация**

Расчет охлаждения воды

Градирня: ТЭП
$F_c = 360$ м^2.
Вентилятор: ВГ 104
$G_B \cdot 10^{-3} = 2700$ м^3/ч; $\omega = 2{,}08$ м/с.
Ороситель: Пленочный
$A = 0{,}455$ 1/м; $m = 0{,}66$.
Климатические условия:
$\vartheta = 47$ °С; $\tau = 29$ °С; $\varphi = 24\%$; $P_б = 630$ мм рт. ст.
Определение: $F_{общ}$.

h, м	$G_ж$, м^3/ч	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	γ, м/ч	L, кг/кг	$F_{общ}$, м^2
2,8	74 500	42,7	33	9,7	0,904	0,66	7292

ходная информация ЭВМ об искомых значениях $q_ж$, соответствующих заданным температурам воды.

Пример 4.3. Определить число секций (общую площадь) градирен ТЭП ($F_c = 360$ м^2) для работы в одной из южных стран. Заданные условия: климатические расчетные данные – $\vartheta = 47$ °С, $\tau = 29$ °С, $\varphi = 24\%$, $P_б = 630$ мм рт. ст.; технологические и конструктивные характеристики оросителя (пленочный асбестоцементный) – $h = 2{,}8$ м, $A = 0{,}455$ 1/м, $m = 0{,}66$; подача воздуха вентилятором принята номинальной, т. е. $G_в = 2\,700\,000$ м^3/ч и $\omega = 2{,}08$ м/с; температуры воды – $t_1 = 42{,}7$ °С, $t_2 = 33$ °С; расход охлажденной воды $G_ж = 74\,500$ м^3/ч.

Решение. Поскольку подача воздуха вентилятором задана, то необходимость в аэродинамическом расчете отпадает и задача решается в один этап – заполняется бланк "Расчет охлаждения воды" (табл. 4.11). После проведения вычислений на ЭВМ получаем в выходной информации (табл. 4.12) потребное значение общей площади, равное 7292,1 м^2, и соответственно число секций составляет $7292{,}1 : 360 = 20{,}3 \approx 20$ секций.

Расчетные графики. Расчет по графикам охлаждения может производиться только для тех типов и конструкций вентиляторных градирен, для которых эти графики составлены. Графики могут быть составлены или в результате выполнения расчетов или по данным натурных испытаний соответствующих градирен. При пользовании графиками необходимо учитывать, что скорость движения воздуха в оросителе, высота оросителя, форма и размеры его элементов должны быть такими же как у градирен, по испытаниям или расчетам которых составлены графики. Принимая во внимание сказанное, графики охлаждения не могут быть использованы для расчета новых конструкций градирен, а лишь пригодны для "привязки" существующих к местным условиям.

Наибольшее распространение получило использование графиков охлаждения для малогабаритных вентиляторных градирен, изготавливаемых заводским способом и поставляемых на место применения в готовом виде. Для такой градирни график охлаждения является технологическим паспортом, по которому производится ее подбор при привязке к местным климатическим условиям с учетом требований к температуре охлажденной воды и гидравлической нагрузки. Отсюда стало общепринятым за рубежом и в нашей стране, что каждая фирма, выпускающая малогабаритные градирни, составляет для них соответствующие графики охлаждения.

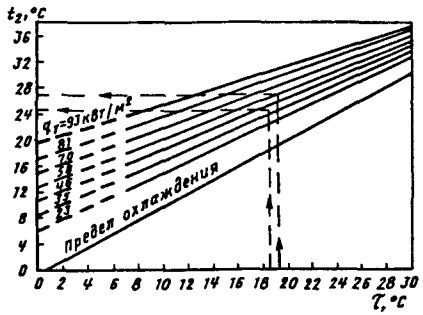


Рис. 4.4. График охлаждения воды для градирен типа ГПВ:

площади фронтальных сечений градирен, м²: ГПВ-20 – 0,44; ГПВ-40 – 0,96; ГПВ-80 – 1,88; ГПВ-160 – 3,92; ГПВ-320 – 6,5

На рис. 4.4 приведен график охлаждения воды в пленочных градирнях типа ГПВ, составленный ВНИХИ. На графике дана зависимость температуры охлажденной воды от температуры воздуха по смоченному термометру для различных удельных тепловых нагрузок. С учетом максимального экономического эффекта температуру охлажденной воды рекомендуется выбирать на 5–8 °С выше температуры воздуха по смоченному термометру. График эмпирический. Полученные по нему значения Δt имеют погрешность ± 0,5 °С.

График позволяет по заданной тепловой нагрузке и расчетной температуре τ найти t_2, а также решить обратную задачу – по заданным τ и t_2 определить теплопроизводительность градирни.

Пример 4.4. Определить температуру охлажденной воды, если температура воздуха по смоченному термометру составляет 18,5 °С и требуется охладить 16 000 кг/ч воды на 4 °С.

Тепловая нагрузка градирни

$$Q = G_ж c_ж (t_1 - t_2) = 16\,000 \times 4{,}19 \times 4 = 268\,160 \text{ кДж/ч}.$$

Для данной тепловой нагрузки наиболее приемлема градирня ГПВ-80 с площадью фронтального сечения $F_{фр}$ = 1,88 м².

Удельная тепловая нагрузка градирни

$$q_т = Q/F_{фр} = 268\,160/1{,}88 \times 3600 = 39{,}62 \text{ кВт/м}^2.$$

Температура охлажденной воды (рис. 4.4, пунктирная линия)

$$t_2 = 24{,}5 \text{ °С}.$$

Температура нагретой воды

$$t_1 = 24{,}5 + 4 = 28{,}5 \text{ °С}.$$

Пример 4.5. Определить теплопроизводительность установленной градирни ГПВ-80, если заданы температура охлажденной воды (27 °С), температура воздуха по смоченному термометру (19,1 °С), количество циркулирующей воды 18 000 кг/ч. Находим по графику (рис. 4.4) в точке пересечения соответствующих штрихпунктирных линий удельную тепловую нагрузку $q_т$ = 55,6 кВт/м².

Тепловая нагрузка градирни

$$Q = q_т F_{фр} = 55{,}6 \times 1{,}88 \times 3600 = 376\,300 \text{ кДж/ч}.$$

Температура нагретой воды

$$t_1 = t_2 + Q/(G_ж c_ж) = 27 + 376\,300/(18\,000 \times 4{,}19) = 32 \text{ °С}.$$

На рис. 4.5 представлена номограмма для определения параметров работы градирен типа "Росинка" с двухпоточным оро-

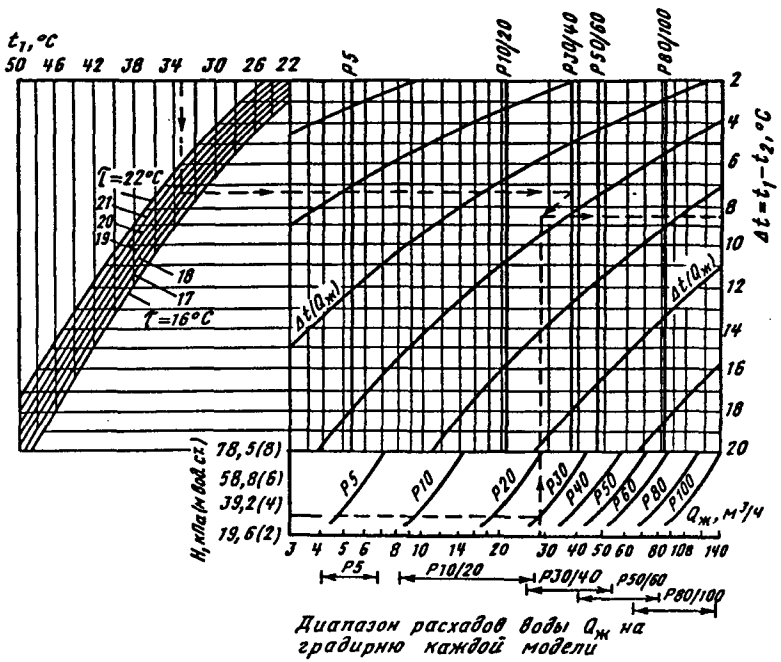


Рис. 4.5. Номограмма для определения параметров работы градирен типа "Росинка":

P5 – P100 – модели градирен

сителем из полиэтиленовых призм решетчатых ПР50, изготавливаемых Научно-производственной фирмой "Техэкопром". Конструкция градирен требует напора воды перед соплами не менее 3 м. Для этого в каждой модели таких градирен число тангенциальных сопел ВОДГЕО (см. гл. 8.3) установлено из расчета обеспечения расхода воды в определенном диапазоне (рис. 4.5) при напоре не ниже указанного минимума. Применение номограммы для определения параметров работы градирни типа "Росинка" показано на примере.

Пример 4.6. Определить перепад температур воды на градирне "Росинка" модели Р30 при следующих условиях: температура нагретой воды t_1 = 33,5 °С, температура воздуха по смоченному термометру τ = 19 °С; расход воды на градирню $Q_ж$ = 28 м³/ч.

Последовательность действий при определении показана на номограмме рис. 4.5 пунктирной линией: Δt = 8,4 °С. При этом $t_2 = t_1 - \Delta t$ = 33,5 – 8,4 = 25,1 °С и глубина охлаждения воды $t_2 - \tau$ = 25,1 – 19 = 6,1 °С. Напор воды перед соплами составляет 3,4 м, что больше требуемого минимального напора воды.

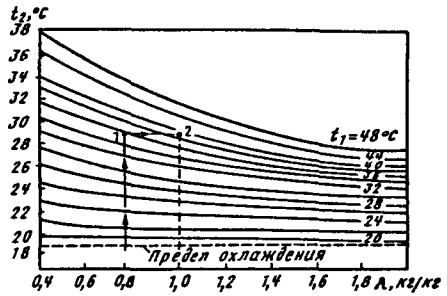
Расчетные графики диаграмм для градирен типа "Одесса", в которых оросителем является шаровая подвижная насадка, представлены на рис. 4.6 и 4.7.

Диаграмма на рис. 4.6 построена для неизменной температуры воздуха по смоченному термометру τ = 19 °С при изменяющемся соотношении массовых расходов воздуха и воды $\lambda = G_в/G_ж$ и может впрямую использоваться для определения температурного перепада по воде при ее различных температурах на входе в градирню.

Диаграмма на рис. 4.7 построена для соотношения массовых расходов воздуха и воды $\lambda = G_в/G_ж = 1$ и изменяющейся температуре воздуха по смоченному термометру и может впрямую использоваться для определения температурного перепада по воде при ее различных температурах на входе в градирню.

Если температура воздуха по смоченному термометру отличается от τ = 19 °С или соотношение массовых расходов воздуха и воды $G_в/G_ж$ не равно 1, то необходимо последовательно использовать эти диаграммы. В общем случае диаграмма на рис. 4.6 сводит исходную задачу к решению эквивалентной при $G_в/G_ж = 1$ и такой же температуре τ, а диаграмма на рис. 4.7 позволяет решать задачу о влиянии τ на t_2 при различных значениях t_1.

Рис. 4.6. График охлаждения воды для градирен типа "Одесса" $t_2 = f(\lambda)$ при τ = 19 °С



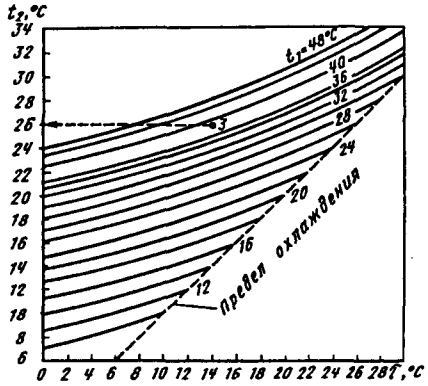


Рис. 4.7. График охлаждения воды для градирен типа "Одесса" $t_2 = f(\tau)$ при $\lambda = G_в/G_ж = 1$

Пример 4.7. Установлены две градирни Одесса-250 в соответствии с паспортными данными ($G_ж$ = 100 м³/ч, t_1 = 32 °С, τ = 19 °С, Δt = 5 °С). Необходимо определить перепад температур воды в градирнях и снимаемую тепловую нагрузку при следующих исходных данных: $G_ж$ = 80 м³/ч, τ = 14 °С, t_1 = 36 °С.

Считаем, что расход воды на каждую градирню равен половине суммарного расхода. Производительность вентилятора составляет 27 000 м³/ч.

Решение. Этап 1. Определяем соотношение массовых расходов:

$$G_в/G_ж = (27\,000 \times 1{,}142)/(40 \times 10^3) = 0{,}77$$

Этап 2. На диаграмме рис. 4.6 находим точку, образованную пересечением линий $G_в/G_ж$ = 0,77 и t_1 = 35 °С. Это будет точка *1*. Затем через точку *1* проводим горизонтальную линию до пересечения ее с линией $G_в/G_ж$ = 1. Появилась точка *2*, через которую проходит линия t_1 = 39 °С.

Этап 3. На диаграмме рис. 4.7 находим точку образованную пересечением линий $\tau = 14\,°C$ и $t_1 = 39\,°C$. Это будет точка *3*, которой соответствует температура охлажденной воды $t_2 = 26\,°C$.

Этап 4. Таким образом, при заданных условиях эксплуатации перепад температур в градирнях

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 36 - 26 = 10\,°C,$$

а снимаемая тепловая нагрузка

$$Q = 4{,}19 \cdot (2 \cdot 40) \cdot 10^3 \cdot 10 = 3352\ \text{МДж/ч}.$$

Примечания: 1. При определении фактических массовых расходов плотности воды и воздуха необходимо принимать при температуре воды на входе в градирню. 2. При расчетах параметры, входящие в формулы, необходимо привести к одной системе единиц.

Расчеты по формулам ("вручную"). Технологические расчеты по формулам (4.67) – (4.69), естественно, могут быть выполнены и "вручную" – с помощью обычных микрокалькуляторов. Однако работа эта трудоемкая и требует определенных навыков. Приходится задаваться искомым параметром, подставлять его в правую часть уравнения, производить вычисления и в случае несовпадения полученного результата с левой частью задаваться другим значением искомого параметра, снова производить вычисления и так до тех пор, пока не будет достигнуто приемлемое совпадение правой и левой части уравнения. Детальная расшифровка величин, входящих в формулы (4.67) – (4.69), приведена в § 4.1. Значения энтальпий i могут приниматься по таблице (см. табл. 5.4).

ГЛАВА 5

ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУХА ПРИ РАСЧЕТЕ ГРАДИРЕН

Градирни рассчитываются обычно на неблагоприятные для работы атмосферные условия в летние месяцы года. Однако вести расчет на наиболее высокие температуры и влажности наружного воздуха нецелесообразно, так как они могут наблюдаться в течение года лишь очень кратковременно. Чем выше расчетные температуры и влажность атмосферного воздуха,

тем больших размеров требуется градирня и соответственно выше затраты на ее сооружение. В то же время слишком низкие расчетные температуры и влажность воздуха могут привести к тому, что фактические температуры воды на выходе из градирни будут в течение длительного периода в жаркое время года превышать расчетную температуру t_2. Это повлечет за собой недоохлаждение производственного продукта в теплообменной аппаратуре. Следовательно, при выборе расчетных параметров наружного воздуха необходимо принимать во внимание допустимое повышение температуры воды t_2 сверх расчетной из условий технологического процесса производства, но ограничивать период этого повышения.

При расчете градирен рекомендуется исходить из среднесуточных значений температур и влажностей атмосферного воздуха в летние месяцы по многолетним наблюдениям. В качестве расчетных обычно принимаются такие значения ϑ и τ, которые превосходят среднесуточные в течение не более 5 дней в году, а при менее жестких требованиях – в течение не более 10 дней в году.

Для определения расчетных параметров наружного воздуха можно пользоваться имеющимися табличными данными или кривыми длительности стояния среднесуточных температур и влажностей атмосферного воздуха для района строительства градирни по данным многолетних наблюдений (не менее чем за 5–10 лет). При отсутствии готовых данных можно для построения кривых длительности стояния температур наружного воздуха предварительно составить таблицы распределения среднесуточных температур ϑ и τ по зонам, например, через 1 °С и среднесуточной влажности φ по зонам через 5%. Далее, сообразуясь с требованиями технологического процесса, необходимо задаться числом дней в году n, в течение которых допустимо превышение фактических значений ϑ, τ и φ над расчетными и по кривым определить расчетные температуры и влажность атмосферного воздуха.

Среднесуточные температуры и влажности вычисляются по данным 4-кратных измерений этих величин в течение дня: в 9, 12, 15 и 18 ч. Данные этих измерений для района строительства (или близлежащего района) можно получить в территориальных управлениях Гидрометслужбы или в Бюро гидрометеорологических расчетов и справок Центральной высотной гидрометеорологической обсерватории Госкомгидромета (109028, Москва, Подкопаевский пер., д. 5).

В целях экономии времени при обработке материалов многолетних наблюдений обычно строят кривые длительности стояния ϑ и τ (или φ) только для летнего периода (~ 100 дней) и исходя из этого определяют обеспеченность, %. Участки таких кривых в пределах, используемых для выбора расчетных параметров воздуха, можно рассматривать с достаточной степенью точности как показывающие продолжительность стояния соответствующих температур в течение всего года, так как в остальное время года эти температуры не повторяются вовсе или же наблюдаются очень кратковременно.

Изложенный способ определения расчетных параметров атмосферного воздуха требует больших затрат времени и труда. Кроме того, исходные данные не публикуются и их приходится получать в Гидрометслужбе. Для 25 пунктов (городов) стран СНГ данные о среднесуточных температурах и влажности приведены в Пособии. Однако часто требуется выполнить расчет градирен для мест значительно удаленных от этих пунктов.

Можно найти расчетные температуры и влажность атмосферного воздуха, используя СНиП по климатологии. По этому СНиПу определяются средняя температура воздуха (по сухому термометру) наиболее жарких суток $t_{н.ж}$ или $\vartheta_{н.ж}$ и средняя месячная относительная влажность воздуха φ в 13 ч наиболее жаркого месяца (июля). Пересчет $\vartheta_{н.ж}$ и φ на параметры входящего воздуха для расчета градирен производится по формулам:

для обеспеченности 1%

$$\vartheta = \vartheta_{н.ж} \times 0{,}945, \quad (5.1)$$

$$\varphi = \varphi \times 0{,}915; \quad (5.2)$$

для обеспеченности 5%

$$\vartheta = \vartheta_{н.ж} \cdot 0{,}867, \quad (5.3)$$

$$\varphi = \varphi \cdot 1{,}0; \quad (5.4)$$

для обеспеченности 10%

$$\vartheta = \vartheta_{н.ж} \cdot 0{,}822, \quad (5.5)$$

$$\varphi = \varphi \cdot 1{,}074. \quad (5.6)$$

Имея данные по ϑ и φ, можно с помощью психрометрических таблиц или диаграммы определить соответствующие им значения температур воздуха по смоченному термометру τ.

В табл. 5.1 приведены для 48 населенных пунктов значения расчетных температур и относительной влажности воздуха, найденные с использованием изложенных способов. Обеспеченности, равной 1% (табл. 5.1), соответствует продолжительность стояния температур ϑ и τ и влажности φ примерно в течение 1 дня в году, обеспеченности 5% – в течение 5 дней в году и обеспеченности 10% – в течение 10 дней в году.

Таблица 5.1. **Расчетные параметры атмосферного воздуха для различных населенных пунктов стран СНГ при обеспеченности, %**

Населенный пункт	1			5			10		
	ϑ	φ	τ	ϑ	φ	τ	ϑ	φ	τ
Алма-Ата	32	28	19,8	27,7	31	17,4	26,5	34	17
Архангельск*	23,3	58	18	23,2	63	18,6	22	68	18,2
Астрахань	30,4	52	23,2	28,8	55	22,4	27,8	56	21,6
Ашхабад	36,3	18	20,2	34,8	20	19,8	33,9	22	19,7
Баку*	30,9	42	21,7	28,4	46	20,5	26,9	49	18,3
Бишкек*	30,3	28	18,5	27,8	31	17,4	26,4	33	16,7
Волгоград	31	33	20	28,9	37	19,3	27,6	42	19,2
Вологда*	24,5	56	18,8	22,5	61	17,8	21,3	65	17,2
Грозный*	29,8	43	21	27,3	47	19,8	25,9	50	19,1
Дудинка*	22,9	59	17,9	21	64	16,8	19,9	69	16,5
Душанбе*	32	22	18,4	29,4	24	17,1	27,9	26	16,5
Екатеринбург	25,8	49	18,8	23,2	57	17,8	21,5	62	17
Ереван*	29,4	29	18,1	27	32	17	25,6	34	16,3
Иркутск	22	63	17,6	20,5	68	16,9	19,7	71	16,5
Казань	26,8	43	18,7	24,6	51	18,2	23,4	55	17,8
Киев*	26,7	48	19,4	24,5	52	18,2	23,3	56	17,8
Кишинев*	27,9	41	19,2	25,6	45	18,1	24,2	48	17,4
Краснодар	28	55	21,6	26,5	57	20,6	25,5	59	20,1
Красноярск	24,4	55	18,6	22,5	61	17,8	21,4	64	17,2
Кустанай*	29,5	41	20,4	27,1	45	19,4	25,6	48	18,5
Луганск	30,1	30	18,8	27	37	17,8	25,7	44	18
Магадан*	19,5	61	15,2	17,7	67	14,3	16,9	72	14,1
Минск*	24,9	51	18,4	22,8	56	17,4	21,6	60	16,9
Мончегорск*	24,6	53	18,5	22,5	58	17,4	21,4	62	18
Москва	27	55	20,8	24,5	57	19	22,9	59	17,9
Мурманск*	22	58	17	20,2	63	16	19,2	68	15,7

Продолжение табл. 5.1

Населенный пункт	1			5			10		
	ϑ	φ	τ	ϑ	φ	τ	ϑ	φ	τ
Нижний Новгород	26,8	48	19,6	24	52	17,8	22,7	56	17,3
Новосибирск	25,4	54	19,3	23,3	59	18,2	22	63	17,6
Омск	27,4	44	19,4	24,1	50	17,6	22,5	55	17
Петрозаводск*	24,5	58	19,1	22,5	63	17,8	21,3	68	17,6
Петропавловск* на Камчатке	19,4	69	16	17,8	75	15,2	16,9	81	15
Ростов-на-Дону*	29,2	37	19,5	26,8	41	18,4	25,4	44	17,7
Салехард*	23,7	57	18,3	21,8	62	17,3	20,6	67	16,9
Самара*	28,5	44	20,2	26,2	48	19	24,8	52	18,5
Санкт-Петербург	26	56	20,1	23,2	60	18,3	21,7	63	17,4
Сыктывкар*	25,1	49	18,3	23,1	54	17,3	21,9	58	16,9
Ташкент	31,2	37	21	29,4	38	19,8	28,6	40	19,6
Тбилиси*	30,1	37	20,2	27,7	40	18,9	26,2	43	18,2
Тобольск*	26,5	53	20,0	24,3	58	18,9	23	62	18,3
Томск	24,3	60	19,2	22,3	64	18	21	68	17,4
Тула	25,5	56	19,6	23,1	60	18,2	21,6	63	17,3
Уфа	27,6	44	19,5	25,3	48	18,3	23,8	53	17,8
Ханты-Мансийск*	26,5	55	20,3	24,3	60	19,2	23	64	18,6
Харьков	28,5	38	19,2	26,4	45	18,8	24,9	52	18,6
Челябинск	26	51	19,4	23,7	54	15,8	22,4	58	17,3
Чита*	25	48	18	23	53	17,1	21,8	57	16,6
Якутск*	26,3	40	17,8	24,1	44	16,7	22,9	47	16,2
Ярославль*	24,8	53	18,7	22,7	58	17,6	21,5	62	17,1

* Значения, определенные с использованием СНиП по климатическим параметрам.

При выборе обеспеченности метеорологических параметров для расчетов градирен следует учитывать влияние превышения температуры охлажденной воды над расчетной на работу технологического оборудования. Подразделяют потребителей охлажденной воды на три категории по уровню требований к ее температуре.

Выбор для них обеспеченности параметров атмосферного воздуха производят с учетом табл. 5.2.

Таблица 5.2. **Категории потребителей по уровню требований к температуре охлажденной воды**

Категории потребителя воды	Влияние превышения температуры охлажденной воды над расчетной на работу технологического оборудования	Обеспеченность метеорологических параметров при расчете градирен, %
I	Нарушение технологического процесса производства в целом и значительные убытки	1
II	Допускаемое временное нарушение технологического процесса отдельных установок	5
III	Временное снижение экономичности технологического процесса производства в целом и отдельных установок	10

Опыт использования данных табл. 5.2 при проектировании и эксплуатации градирен показал, что наиболее часто применяемой и обеспечивающей достаточную надежность работы градирен является обеспеченность, составляющая 5%, т. е. 5 дней в году в жаркое летнее время.

Значение энтальпии входящего воздуха i_1 находится из известных формул по значениям ϑ и φ (табл. 5.3). Эти же значения ϑ и φ определяют плотность входящего воздуха для подсчета относительного расхода воздуха по известным таблицам или графикам. Задаваемые значения ϑ и φ являются достаточными климатическими параметрами для расчетов вентиляторных и башенных градирен. Однако в последнее время для расчетов вентиляторных градирен получает все большее распространение использование только значения τ. Это допустимо, учитывая следующие два обстоятельства: значение i_1, ккал/кг, однозначно определяется по значению τ с помощью *i–d*-диаграммы или может быть подсчитано с учетом $\varphi = 1$ по формуле

$$i_1 = 0{,}24\tau + \frac{\gamma''_\tau R_в(\tau + 273{,}2)}{P_б - P''_\tau}(595 + 0{,}47\tau), \qquad (5.7)$$

где γ''_τ и P''_τ – плотность и давление насыщенного водяного пара как функции температуры воздуха (в данном случае по смоченному термометру τ), определяемые по табл. 4.1.

Таблица 5.3. **Требующаяся плотность орошения вентиляторной градирни (ϑ = 26,1 °С, τ = 18,7 °С, φ = 46% и $P_б$ = 745 мм рт. ст.)**

Тип оросителя	Номер на рис. 8.4	h, м	A, 1/м	m	$\zeta_{ор}$, 1/м	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	ω, м/с	λ, кг/кг	$t_2 - \tau$, °С	$q_ж$, м³/(м²·ч)
БОС ПНД	22, *л*	0,84	1,373	0,55	6,5	37	25	12	2,07	1,48	6,3	5,79
		0,84	1,373	0,55	6,5	36	24	12	2,07	1,75	5,3	4,89
		1,26	1,121	0,55	6,5	37	25	12	2,06	1,18	6,3	7,22
		1,26	1,121	0,55	6,5	36	24	12	2,06	1,35	5,3	6,31
БОП ПНД	21	0,8	1,021	0,72	14,1	37	25	12	2,05	1,94	6,3	4,38
		0,8	1,021	0,72	14,1	36	24	12	2,05	2,25	5,3	3,78
		1,6	0,722	0,72	14,1	37	25	12	1,97	1,39	6,3	5,85
		1,6	0,722	0,72	14,1	36	24	12	1,97	1,60	5,3	5,09

Аналогично плотность воздуха $\gamma_в$, кг/м³, можно в этом случае подсчитать по формуле

$$\gamma_в = \frac{P_б - P''_\tau}{R_в(\tau + 273{,}2)} + \gamma''_\tau. \qquad (5.8)$$

Расход воздуха в вентиляторной градирне не зависит от его температуры и определяется только количеством, подаваемым вентилятором, так как вентилятор – машина объемная и перекачивает заданное количество воздуха вне зависимости от его плотности. Поэтому подача воздуха вентилятором измеряется в м³/ч, а не в кг/ч. В башенных градирнях необходимо задаваться значениями ϑ и φ, так как тяга зависит от разности плотностей воздуха на входе и выходе из башни, определяемых по указанным параметрам.

Температура воздуха по смоченному термометру τ является теоретическим пределом охлаждения воды в градирне. Учитывая, что с приближением расчетной температуры воды к теоретическому пределу охлаждения τ потребуется больший размер градирни, при их проектировании рекомендуется принимать расчетную температуру t_2 исходя из условия: разность $t_2 - \tau$ должна быть не менее 4 °С для вентиляторных градирен и 8 °С для башенных. Более низкие значения разностей $t_2 - \tau$ принимаются лишь в тех случаях, когда это диктуется требованиями технологического процесса производства.

С приближением t_2 к пределу охлаждения требующиеся размеры охладителя сильно растут. Нередко, однако, при назначении исходных данных для конкретного производства задают слишком низкую ("с запасом") температуру охлажденной воды t_2, уменьшая при этом разность $t_2 - \tau$. Для башенных градирен уменьшение $t_2 - \tau$ с 10 до 5 °С приводит к необходимости снижения требующейся для охлаждения воды плотности орошения $q_ж$ в 2–2,2 раза. Производительность вентиляторных градирен при условиях, принятых для расчета (табл. 5.3), уменьшается, что и требует для охлаждения заданного объема воды увеличения их площади. Поэтому не следует без особой к тому необходимости принимать слишком малое значение $t_2 - \tau$. Оптимальными условиями для работы испарительных градирен считаются условия, когда $t_2 - \tau \approx \Lambda t$.

Влияние барометрического давления при обычных его значениях, колеблющихся в пределах примерно 720–760 мм рт. ст.,

сравнительно невелико, и его можно не принимать во внимание при практических расчетах градирен. Однако для высокогорных местностей, где барометрическое давление может понижаться до значений 600–650 мм рт. ст., следует уже учитывать его влияние. Понижение барометрического давления приводит при прочих неизменных условиях к некоторому снижению интенсивности испарительного охлаждения, но в случае вентиляторных градирен это компенсируется и даже перекрывается уменьшением сопротивления градирни и увеличением скорости воздуха вследствие уменьшения его плотности. В башенных градирнях уменьшение разности плотностей поступающего и уходящего воздуха, влекущее за собой и уменьшение силы тяги, оказывается более значительным, чем уменьшение абсолютных значений плотности воздуха, и при понижении барометрического давления охладительный эффект градирни несколько снижается.

В табл. 5.4 приведены значения энтальпий входящего воздуха i_1 при $t_1 = 0 \div 48$ °С, $\varphi = 1$ и $P_б = 745$ мм рт. ст. При других значениях барометрического давления значение i_1 следует подсчитывать по (5.7). Естественно, что табл. 5.3 можно пользоваться и при определении энтальпии насыщенного воздуха ($\varphi = 1$) у поверхности воды при соответствующих ее температурах нагретой t_1 и охлажденной t_2 воды. При этом в качестве температуры T принимается значение t_1 или t_2.

Таблица 5.4. **Значения энтальпий входящего воздуха i_1, кДж/кг**

T, °С	Доля градуса									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	9,6	9,6	10	10,5	10,5	10,5	10,9	10,9	11,3	11,3
1	11,3	11,7	11,7	12,2	12,2	12,6	12,6	13	13	13,4
2	12,4	13,4	13,8	14,2	14,2	14,7	14,7	14,7	15,1	15,1
3	15,5	15,5	15,5	15,9	16,3	16,3	16,3	16,8	16,8	17,2
4	17,2	17,6	17,6	17,6	18	18,4	18,8	18,8	18,8	19,3
5	19,3	19,3	19,3	19,3	19,7	19,7	20,1	20,1	20,5	20,5
6	21	21	21,4	21,4	21,8	21,8	22,2	22,2	22,6	23
7	23	23,5	23,5	23,8	23,9	23,9	24,3	24,7	24,7	25,1
8	25,1	25,6	26	26	26,4	26,4	26,8	26,8	27,2	27,2
9	27,6	27,6	28,1	28,5	28,5	28,9	28,9	29,3	29,3	29,7
10	29,7	30,2	30,6	30,6	31	31,4	31,4	31,8	31,8	32,3
11	32,3	32,7	33,1	33,1	33,5	33,9	34,4	34,4	34,8	34,8
12	35,2	35,2	35,6	35,6	36	36	36,4	36,9	37,3	37,3

Продолжение табл. 5.4

T, °С	Доля градуса									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
13	37,7	37,7	38,1	38,5	38,5	39	39	39,4	39,8	40,2
14	40,2	40,6	41,1	41,1	41,5	41,9	42,3	42,3	42,3	42,7
15	42,7	43,2	43,6	43,6	44	44,4	44,8	45,2	45,2	45,7
16	45,7	46,1	46,5	46,9	46,9	47,3	47,8	48,2	48,2	48,6
17	49	49,4	49,9	50,3	50,3	50,7	50,7	51,1	51,1	51,5
18	52	52,4	52,8	53,2	53,6	54	54,5	54,9	54,9	54,9
19	55,3	55,3	55,7	56,1	56,1	56,6	57	57,4	57,4	57,8
20	58,2	58,7	58,7	59,1	59,5	59,9	60,3	60,7	61,2	61,2
21	61,6	62	62,4	62,8	63,3	63,7	63,7	64,1	64,5	64,9
22	65,4	65,8	66,2	66,6	67	67,5	67,9	67,9	68,7	68,7
23	68,7	69,5	70	70,8	71,2	71,6	72,1	72,1	73,5	72,9
24	73,3	73,7	74,2	74,6	75	75,4	75,8	76,3	76,7	77,1
25	77,5	77,9	78,3	78,8	79,2	79,6	80	80,4	80,9	81,3
26	81,7	82,5	83	83,4	83,8	84,2	84,6	85,1	85,5	85,9
27	86,3	86,7	87,6	88	88,4	89,2	89,7	90,1	90,5	90,9
28	91,3	92,2	92,6	93,4	93,9	94,3	94,7	95,1	95,5	95,9
29	96,4	96,8	97,6	98	98,5	99,3	99,7	100,1	100,6	101
30	101,4	101,8	102,2	102,6	103,1	103,5	103,9	104,7	105,2	105,6
31	106,4	106,8	107,3	108,1	108,5	108,9	109,8	110,2	110,6	111
32	111,9	112,7	113,1	114	114,8	115,2	115,6	116,5	117,3	117,7
33	118,2	119	119,4	119,8	120,7	121,5	121,9	122,8	123,2	123,6
34	124	124,9	125,7	126,5	127,4	127,8	128,2	128,6	129,5	129,9
35	130,7	131,6	132	132,8	133,7	134,1	134,9	135,8	136,6	137,4
36	137,8	138,7	139,1	139,9	140,4	141,2	142	142,9	143,7	144,1
37	145	145,8	146,6	147,5	148,3	149,2	150	150,8	151,7	152,5
38	152,9	153,8	154,6	155	155,9	156,7	157,5	158,4	159,2	160,1
39	161,7	161,7	162,6	163,4	164,2	165,1	165,9	166,3	167,6	168,4
40	168,9	169,7	170,5	171,8	172,6	173,5	174,3	175,1	176	177,2
41	178,1	178,9	179,7	180,6	181,4	182,3	183,1	184,4	185,2	186
42	186,9	187,7	188,5	189,8	190,6	191,5	192,7	193,6	194,8	195,7
43	196,9	197,8	198,6	199,4	200,3	201,1	202	202,8	204	205,7
44	207	207,8	209,1	209,5	210,3	212,4	213,3	214,1	215,8	216,6
45	217,9	218,7	219,6	220,8	222,1	223,3	224,2	225,4	226,3	227,5
46	228,3	229,6	230,9	232,1	233,4	234,6	235,9	236,7	238	238,8
47	240,1	241,8	242,6	243,4	244,7	245,9	247,6	248,9	250,1	251,4
48	253,9	255,6	256,9	258,1	259,8	260,6	261,9	263,6	264,2	266,1

ГЛАВА 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИРНЯХ

6.1. Аэродинамический расчет подачи вентиляторов градирен

Задача определения расхода воздуха может возникнуть при проектировании и привязке градирен, а также во время эксплуатации для проведения работ по реконструкции. С этой целью производят аэродинамический расчет градирни. Для его выполнения необходимо знать тип и конструкцию градирни, марку вентилятора, основные размеры градирни (секции), ее входных окон, воздухораспределителя, оросителя, водораспределителя и водоуловителя. Полезно также иметь заводскую графическую характеристику вентилятора, представляющую собой зависимость между подачей воздуха, создаваемым давлением, мощностью и коэффициентом полезного действия данного вентилятора.

В данной главе предложена усовершенствованная методика расчета подачи вентиляторов градирен, разработанная НИИ ВОДГЕО. Скорректирована формула для определения полного аэродинамического сопротивления градирни. Входящие в нее величины приведены в соответствие с реально значимыми и измеряемыми. Учтено наличие зон завихрений по площади орошения градирни и их влияние на подачу вентилятора. Заводские графические характеристики вентиляторов градирен представлены аналитически в виде, удобном для расчетов на ПЭВМ. Даны примеры расчетов расходов воздуха в типовых градирнях.

Материалы натурных и лабораторных исследований позволяют выразить общее сопротивление секции или одновентиляторной градирни следующим образом:

$$P_c = (P_{вх} + P_{ор} + P_{вр} + P_{ву} + P_{п.в})\Phi + P_д, \qquad (6.1)$$

где сопротивления элементов градирни обозначены: $P_{вх}$ – входа в градирню, включая воздухораспределитель, с учетом поворота потока воздуха в ороситель; $P_{ор}$ – оросителя; $P_{вр}$ – водораспределителя; $P_{ву}$ – водоуловителя; $P_{п.в}$ – подхода воздуха к вентилятору на пути от водоуловителя до обечайки; $P_д$ – сопротивление, добавляемое при подаче на градирню

воды. Это сопротивление зависит от гидравлической нагрузки, типа оросителя, водораспределителя и размеров секции; Φ – коэффициент, учитывающий влияние формы секции в плане на общее сопротивление градирни (табл. 6.1). Подсчет сопротивления секции, кг/м^2, производится по формуле

$$P_c = \frac{\gamma\omega^2}{2g}\zeta_c, \qquad (6.2)$$

где ω – скорость движения воздуха в свободном сечении градирни, м/с; γ – плотность воздуха, кг/м^3, принимается такой же, что указана в характеристике вентилятора, обычно равна 1,2 кг/м^3*; ζ_c – коэффициент сопротивления секции градирни, определяемый по формуле

$$\zeta_c = \Sigma\zeta = (\zeta_{вх} + \zeta_{ор}h + \zeta_{вр} + \zeta_{ву} + \zeta_{п.в})\Phi + \zeta_д, \qquad (6.3)$$

где коэффициенты сопротивления ζ обозначены по аналогии с типовыми проектами. Все они безразмерные, кроме коэффициента $\zeta_{ор}$, который, как принято, имеет размерность 1/м; h – высота оросителя, м.

В табл. 6.2 приведены значения ζ отдельных элементов и результаты аэродинамического расчета некоторых характерных типов градирен. Значения $\zeta_{ор}$ и $\zeta_{ву}$ берутся такими же, как и в соответствующих проектах. Значение $\zeta_{вр}$ принято по данным натурных исследований этих элементов на опытной установке. Значения $\zeta_{вх} = 6784e^{-21,7}F_{вх}/F_c$ определены на основании исследований на моделях с учетом натурных измерений, которые при различных отношениях площади входных окон $F_{вх}$

---

* Осевой вентилятор – "объемная машина", которая при любой плотности воздуха подает одно и то же его количество (расход). С изменением плотности воздуха меняется только давление (разряжение), создаваемое вентилятором. Целью аэродинамического расчета градирни является, как известно, определение расхода воздуха в ней и средней по объему скорости движения воздуха в сечении оросителя, которая входит в теплотехнический расчет и находится излагаемым методом. Если принимать другое значение γ, то нужно предварительно пересчитать на это значение и характеристику вентилятора, что в данном случае будет лишней работой, так как давление как таковое в дальнейших расчетах не используется. При подсчете в теплотехническом расчете массовой скорости воздуха γ следует принимать согласно фактическим расчетным (или измеренным) метеоданным.

Таблица 6.1. **Значения коэффициента Ф, отражающего влияние формы градирни в плане на ее аэродинамическое сопротивление**

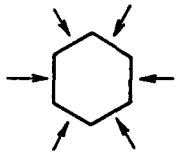
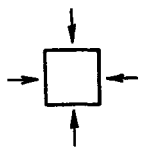
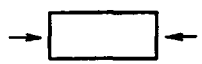
Форма градирни в плане (стрелками указано направление потоков воздуха)	Соотношение сторон	Коэффициент Ф
	1 : 1	1
	–	0,8
	1 : 1	0,9
	3 : 4 2 : 3 1 : 2	1,1 1,2 1,3

Таблица 6.2. **Значения ζ отдельных элементов и результаты аэродина**

Марка вентилятора	Тип оросителя	Номер проекта, по которому приняты F_c и h	F_c, м²	$F_{вх}/F_c$	l, м	h, м	$q_ж$, м³/(м²·ч)	$K_{ор}$
1ВГ 25	Пленочный деревянный	901-6-39	16	0,4	1	3,76	4	0,075
			16	0,4	1	3,76	12	0,075
	Капельный деревянный	901-6-НВ1	16	0,4	1	3,88	4	0,137
			16	0,4	1	3,88	9	0,137

к площади орошения секции F_c приведены ниже:

$F_{вх}/F_c$	0,5	0,48	0,46	0,44	0,42	0,4
$\zeta_{вх}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$F_{вх}/F_c$	0,38	0,36	0,34	0,32	0,3	
$\zeta_{вх}$	2,0	3,0	5	7	10	

Значение $\zeta_{п.в}$ принято по данным анализа натурных исследований, а $\zeta_д$ определено по формуле

$$\zeta_д = q_ж(0{,}2l + K_{ор}h + K_{вр}h_{вр})П, \qquad (6.4)$$

где 0,2 – коэффициент удельного сопротивления дождя под оросителем, отнесенный к скорости воздуха в свободном горизонтальном сечении градирни так же, как и все другие коэффициенты сопротивления в (6.2) – (6.4); l – половина длины воздухораспределителя, м; $K_{вр}$ – коэффициент сопротивления дождя в водораспределительном устройстве, принятый для трубчатого водораспределителя с тангенциальными пластмассовыми соплами ВОДГЕО по данным натурных исследований равным 0,1; $h_{вр}$ – высота дождя в водораспределителе, при соплах факелами вниз обычно равна 0,8 м, факелами вверх – 2,35 м; $П$ – коэффициент размерности для перехода к безразмерному значению $\zeta_д$, при единицах измерения, принятых в данном случае, равен 1 ч/м²; $K_{ор}$ – коэффициент сопротивления дождя в оросителе, принимаемый в соответствии

мического расчета характерных типов градирен

Коэффициенты аэродинамического сопротивления								ω, м/с	$G_в \cdot 10^{-3}$, м³/ч	$P_п$
$\zeta_{вх}$	$\zeta_{ор}$	$\zeta_{вр}$	$\zeta_{ву}$	$\zeta_{п.в}$	$Ф$	$\zeta_д$	ζ_c			
1	0,84	0,4	4,7	10	1	3	22,3	2,63	151,2	9,43
1	0,84	0,4	4,7	10	1	9,1	28,4	2,47	142	10,6
1	11,60	0,4	4,7	10	1	4	65,1	1,89	108,6	14,22
1	11,60	0,4	4,7	10	1	9,1	70,2	1,83	105,6	14,38

Марка вентилятора	Тип оросителя	Номер проекта, по которому приняты F_c и h	F_c, м²	$F_{вх}/F_c$	l, м	h, м	$q_ж$, м³/(м²·ч)	$K_{ор}$
1ВГ 50	Пленочный деревянный	901-6-51	64	0,4	2	3,36	4	0,075
			64	0,4	2	3,36	12	0,075
	Капельный деревянный	901-6-51	64	0,4	2	3,48	4	0,137
			64	0,4	2	3,48	9	0,137
2ВГ 70	Пленочный деревянный	901-6-48	144	0,4	3	3,36	4	0,075
			144	0,4	3	3,36	12	0,075
	Капельный деревянный	901-6-46	192	0,4	4	3,64	4	0,137
			192	0,4	4	3,64	9	0,137
	Брызгальный	901-6-43	192	0,4	4	3,6	4	0,61
			192	0,4	4	3,6	7	0,61
1ВГ 25	Брызгальный	–	16	0,4	1	3,6	4	0,61
			16	0,4	1	3,6	7	0,61

с данными, приведенными ниже:

Тип оросителя

Пленочный деревянный	0,075
Пленочный асбестоцементный	0,29
Пленочный пластмассовый из волнистых листов	0,12
Капельный деревянный	0,137
Брызгальный	0,61

Характеристика рабочей зоны вентилятора на градирне, т. е. в пределах отклонений от номинальной подачи 10–25%, аналитически может быть выражена следующей зависимостью:

$$H = H_0 - K_x G_в^2, \qquad (6.5)$$

где H – давление воздуха, создаваемое вентилятором, Па (кг/м²); H_0 – давление (условное) при нулевой подаче воздуха, Па (кг/м²); K_x – коэффициент характеристики вентилятора, (кг · ч²)/м⁸.

Продолжение табл. 6.2

Коэффициенты аэродинамического сопротивления								ω, м/с	$G_в \cdot 10^{-3}$, м³/ч	$P_п$
$\zeta_{вх}$	$\zeta_{ор}$	$\zeta_{вр}$	$\zeta_{ву}$	$\zeta_{п.в}$	Φ	$\zeta_д$	ζ_c			
1	0,77	0,4	4,7	10	1	4,5	23,2	2,64	609,4	9,89
1	0,77	0,4	4,7	10	1	13,6	32,3	2,47	569,7	12,05
1	10,70	0,4	4,7	10	1	5,4	58,7	2,12	487,5	16,14
1	10,70	0,4	4,7	10	1	12,2	65,5	2,05	471,4	16,84
1	0,77	0,4	4,7	10	1	6,1	24,8	2,76	1430,1	11,55
1	0,77	0,4	4,7	10	1	18,4	37,1	2,47	1277,9	13,84
1	10,70	0,4	4,7	10	1,1	8,7	69,3	1,82	1256,9	14,04
1	10,70	0,4	4,7	10	1,1	19,6	80,2	1,74	1199,8	14,85
1	0,92	0,4	4,7	10	1,1	15,5	36,9	2,16	1490,3	10,53
1	0,92	0,4	4,7	10	1,1	27,1	48,5	2,02	1392,9	12,1
1	0,92	0,4	4,7	10	1	10,7	30,1	2,43	139,7	10,87
1	0,92	0,4	4,7	10	1	18,7	36,7	2,26	130,3	11,9

Значения величин H_0 и K_x определяются по характеристикам вентиляторов. Для вентиляторов типовых градирен они приведены в табл. 6.3.

Из зависимостей (6.2) и (6.5) с учетом

$$G_в = 3600 F_c \omega \qquad (6.6)$$

получаем формулу для подсчета подачи вентилятора, м³/ч:

$$G_в = \sqrt{\frac{H_0}{K_x + \gamma\zeta_c/[(3600F_c)^2\, 2g]}}. \qquad (6.7)$$

Изложенный аналитический метод аэродинамического расчета вентиляторных градирен является приближенным в той части, что сопротивления отдельных элементов градирни, особенно подхода воздуха к вентилятору, еще недостаточно изучены и могут быть уточнены. В формуле (6.7) также не учитывается наличие в градирнях зон завихрений, образующихся при малых сопротивлениях оросительной части, например,

Таблица 6.3. **Аэродинамические характеристики вентиляторов градирен**

Марка вентилятора	Угол наклона лопастей α, град.	Номинальная подача воздуха $G_в$, тыс. м^3/ч	Полное давление, Па (кг/м^2)	Частота вращения n, мин$^{-1}$	H_0, Па (кг/м^2)	$K_х \cdot 10^{10}$, (кг·ч^2)/м^8
1ВГ 25	16	120	137 (14)	380	189 (19,2)	4,29
2ВГ 50	16	500	147 (15)	178	265 (27)	0,46
2ВГ 70	16	1100	157 (16)	170	217 (22,7)	0,055
(К-100)ВГ 104	13	2700	167 (17)	110	253 (25,8)	0,0182
Бальке 4Е-18	–	10 000	147 (15)	74	306 (31,2)	0,00162
3ВГ 25	22	156	137 (14)	365	198 (20,2)	2,49
06-300 № 12,5	–	45	157 (16)	730	286 (29,2)	62,22
06-300 № 8	–	23	235 (24)	1410	471 (47,9)	430,556
06-300 № 8	–	15	98 (10)	930	196 (20)	425,287

Таблица 6.4. **Пример расчета расхода воз**

Марка вентилятора	Номер проекта	F_c, м^2	Тип оросителя	h, м	Расчетные коэффициенты						
					$\zeta_{б.ор}$	$\zeta_{ор}$	Φ	l, м	$K_{ор}$	$K_{вр}$	$h_{вр}$
2ВГ 70	901-6-43	192	Капельный	3,8	16,1	10,7	1,1	4	0,137	0,1	0,8
			Брызгальный	3,6	16,1	0,92	1,1	4	0,61	0,1	2,35
2ВГ 70	901-6-47	144	Пленочный	4	16,1	1,18	1	3	0,075	0,1	0,8
1ВГ 50	901-6-29	64	Пленочный	3,68	16,1	1,08	1	2	0,075	0,1	0,8
			Капельный	3,68	16,1	12,5	1	2	0,137	0,1	0,8
			Брызгальный	3,8	16,1	0,92	1	2	0,61	0,1	0,8
1ВГ 25	901-6-59	16	Пленочный	3,42	16,1	0,93	1	1	0,075	0,1	0,8
			Капельный	3,46	16,1	11,6	1	1	0,137	0,1	0,8
			Брызгальный	3,4	16,1	0,92	1	1	0,61	0,1	0,8
ВГ 104	901-6-65	324	Пленочный	3,5	16,1	1,18	1	4,5	0,075	0,1	0,8
3ВГ 25	–	24	Брызгальный	1,76	16,1	0,92	1,1	1,5	0,61	0,1	0,8

у брызгальных, пленочных деревянных градирен, и снижающих фактический расход воздуха.

Можно подсчитать площадь растекания $F_р$ потока воздуха по оросителю и затем коэффициенты заполнения сечений по формуле

$$K_з = F_р/F_с. \tag{6.8}$$

С учетом наличия в градирнях зон завихрений, образующихся при малых сопротивлениях некоторых типов оросителей, например, брызгальных, пленочных, разреженных, снижающих фактический расход воздуха, формулу (6.7) для подсчета подачи вентилятора можно переписать в следующем виде:

$$G_в = \sqrt{\frac{H_0}{K_х + \gamma\zeta_с/[(3600K_з F_с)^2\, 2g]}}. \tag{6.9}$$

духа для некоторых типов градирен

$q_ж$, м^3/(м^2·ч)	$F_в/F_с$	$\zeta_д$	$\zeta_с$	$K_з$	$G_в \cdot 10^{-3}$, м^3/ч
4–9	0,2	5,6–12,6	68–75	0,99–1	1256–1222
4–7	0,2	12,9–22,6	34,3–44	0,88–0,94	1426–1388
4–12	0,267	3,9–11,8	24,7–32,6	0,86–0,93	1316–1270
4–12	0,307	3–9,1	23,1–29,2	0,92–0,96	590–572
4–9	0,307	3,9–8,9	66–71	1	470–460
4–7	0,307	11,2–19,6	30,8–39,2	0,97–1	568–543
4–12	0,307	2,2–6,4	21,4–25,7	0,9–0,94	145–141
4–9	0,307	3–6,8	59,2–63	1	112–110
4–7	0,307	9,4–16,5	28,6–35,7	0,96–0,99	138–132
4–12	0,262	5–14,9	25,2–35,1	0,85–0,94	2762–2674
4–7	0,204	5,8–10,2	25,3–29,7	0,76–0,83	182–180

Площадь растекания потока воздуха по секции градирни (оросителю) и соответственно $K_з$ во многом зависят от ее сопротивления $\zeta_с$ и отношения площадей поперечных сечений вентилятора $F_в$ и секции $F_с$. Эта зависимость по данным исследований может быть выражена эмпирической формулой

$$K_з = \text{th}\{[2{,}19(F_в/F_с)^2 - 0{,}84(F_в/F_с) + 0{,}12]\zeta_с\}. \quad (6.10)$$

Значение $K_з$ по данным исследований для существующих градирен колеблется от 0,76 до 1.

Расчет подачи вентилятора (расхода воздуха через секцию) может быть теперь выполнен по (6.9) с использованием значений Ф и отдельных элементов, приведенных выше. Примеры расчета расхода воздуха для нескольких типовых градирен приведены в табл. 6.4. Коэффициент сопротивления брызгального оросителя $\zeta_{б.ор}$ подсчитан по данным табл. 6.2:

$$\zeta_{б.ор} = \zeta_{вх} + \zeta_{вр} + \zeta_{п.в} + \zeta_{ву} = 1 + 0{,}4 + 10 + 4{,}7 = 16{,}1.$$

Погрешность при определении расхода воздуха, возникающая вследствие вариаций $\zeta_с$ и $K_з$, вызываемых особенностями форм потока и аэродинамических сопротивлений, создаваемых различными конструкциями градирни, согласно проведенным подсчетам не превышает в среднем 3%.

По изложенной методике выполнены подсчеты подачи воздуха вентиляторами в типовых проектах градирен, приведенные в табл. 6.5, а также составлены алгоритмы для программы расчетов градирен на ПЭВМ.

Для оценки падения давления при проходе воздуха через градирню или ее элементы иногда используют критерий Эйлера Eu, численно равный половине коэффициента сопротивления ζ, т. е. $\zeta = 2\text{Eu}$. Обычно им пользуются при исследованиях на моделях градирен, так как согласно теории подобия при вынужденном движении гидравлическое сопротивление, вызывающее падение давления движущейся среды в канале или при обтекании тел, должно быть связано с другими величинами, характеризующими условия течения, функциональной зависимостью

$$\text{Eu} = f(\text{Re}), \quad (6.11)$$

Таблица 6.5. **Технологические характеристики типовых вентиляторных градирен**

Марка вентилятора	Номер проекта	Площадь секции, м^2	Тип оросителя	h, м	A, м$^{-1}$	m	$\zeta_{с.о}$, м$^{-1}$	$K_{ор} \cdot 10^3$, м · ч/кг	$G_в \cdot 10^{-3}$, м^3/ч
ВГ 104	901-6-65 и 901-6-66	324	Пленочный	3,5	0,35	0,365	1,18	0,075	2720
2ВГ 70	901-6-43	192	Капельный	3,8	0,293	0,45	10,7	0,137	1240
			Брызгальный	3,6	0,252	0,29	0,92	0,61	1400
2ВГ 70	901-6-46	192	Капельный	3,64	0,293	0,45	10,70	0,137	1250
			Брызгальный	3,7	0,222	0,29	0,92	0,61	1400
2ВГ 70	901-6-48	144	Пленочный	3,36	0,31	0,38	0,77	0,075	1290
2ВГ 70	901-6-61	192	Капельный	3,67	0,359	0,45	17,19	0,137	1130
2ВГ 70	901-6-62	192	Брызгальный	2,0	0,261	0,29	0,77	0,61	1425
1ВГ 50	901-6-29	64	Пленочный	3,68	0,341	0,38	1,08	0,075	580
			Капельный	3,68	0,309	0,45	12,5	0,137	465
			Брызгальный	3,8	0,255	0,29	0,92	0,61	550
1ВГ 50	901-6-34	64	Пленочный	3,68	0,341	0,38	1,08	0,075	580
			Капельный	3,38	0,309	0,45	12,5	0,137	470
1ВГ 50	901-6-51	64	Пленочный	3,36	0,31	0,38	0,77	0,075	585
			Капельный	3,48	0,293	0,45	10,7	0,137	490
			Брызгальный	3,0	0,255	0,29	0,92	0,61	570
2ВГ 25	901-6-59	16	Пленочный	3,42	0,324	0,38	0,93	0,075	140
			Капельный	3,6	0,302	0,45	11,6	0,137	110
			Брызгальный	3,4	0,257	0,29	0,92	0,61	135

Продолжение табл. 6.5

Марка вентилятора	Номер проекта	Площадь секции, м²	Тип оросителя	h, м	A, м$^{-1}$	m	$\zeta_{с.о}$, м$^{-1}$	$K_{ор} \cdot 10^3$, м · ч/кг	$G_в \cdot 10^{-3}$, м³/ч
1ВГ 25	901-6-39	16	Пленочный	3,76	0,318	0,38	0,84	0,075	140
			Капельный	3,78	0,302	0,437	11,6	0,137	110
2ВГ 25	901-6-60	16	Пленочный деревянный	2,97	0,357	0,38	1,18	0,075	140
			Пленочный винипластовый	2,64	0,363	0,7	5,27	0,419	130
			Капельный	3,0	0,374	0,45	11,6	0,137	115
2ВГ 25	901-6-56	16	Пленочный	3,81	0,351	0,38	1,21	0,075	140
			Капельный	3,86	0,302	0,45	11,6	0,137	110
			Брызгальный	2,5	0,25	0,29	0,92	0,61	140
2ВГ 25	901-6-58	16	Пленочный асбестоцементный	3,5	0,344	0,59	2,73	0,29	130
3ВГ 25	901-6-67.83	24	Брызгальный	1,76	0,25	0,29	0,92	0,61	180
06-300 № 12,5	901-6-5/75	8	Пленочный	3,08	0,363	0,7	5,27	0,419	53
			Капельный	3,45	0,293	0,45	10,7	0,137	50
06-300 № 12,5	901-6-49	8	Пленочный	3,68	0,335	0,38	1,02	0,075	56
			Капельный	3,54	0,302	0,45	11,6	0,137	49
06-300 № 12,5	901-6-50	8	Пленочный	3,36	0,338	0,38	1,04	0,075	56
			Капельный	3,54	0,302	0,45	11,6	0,137	49
06-300 № 8	901-6-52	2	Пленочный	3,42	0,339	0,38	1,06	0,075	15

Продолжение табл. 6.5

Марка вентилятора	Номер проекта	Площадь секции, м²	Тип оросителя	h, м	A, м$^{-1}$	m	$\zeta_{с.о}$, м$^{-1}$	$K_{ор} \cdot 10^3$, м · ч/кг	$G_в \cdot 10^{-3}$, м³/ч
			Капельный	3,43	0,309	0,45	12,5	0,137	12
06-300 № 8	901-6-53	2	Пленочный	3,4	0,352	0,38	1,24	0,075	15
			Капельный	3,43	0,309	0,45	12,5	0,137	20
06-300 № 8	901-6-55	2	Пленочный	3,21	0,363	0,7	5,27	0,419	13

или при обычной степенной форме

$$\mathrm{Eu} = c\mathrm{Re}^m, \tag{6.12}$$

где $\mathrm{Eu} = \Delta Pg/(\gamma\omega^2)$ – критерий Эйлера.

Отсюда

$$\zeta = \Delta P2g\ /(\gamma\omega^2) = 2\mathrm{Eu}. \tag{6.13}$$

6.2. Вентиляторные установки

Одним из необходимых условий эффективной работы вентиляторных градирен является правильный выбор экономичных вентиляторов.

Для градирен обычно используются специальные осевые отсасывающие или нагнетательные вентиляторы. При применении отсасывающих вентиляторов обеспечивается более равномерное распределение воздуха по поперечному сечению в основании градирни, чем при использовании нагнетательных, так как вход воздуха и поворот его под прямым углом для движения вверх осуществляется при меньших скоростях. Снижение скорости движения воздуха при входе достигается благодаря осуществлению входных окон большого сечения со всех или с двух сторон градирни. Равномерность распределения воздуха является важным фактором в получении охладительного эффекта градирни.

При отсасывающих вентиляторах имеется меньше возможностей для попадания влажного теплого воздуха, поступающего градирню, в ее входные окна. Отсасывающие вентиляторы выбрасывают воздух вверх со скоростью 6–10 м/с, и (по наблюдениям за работой действующих градирен) вертикальное направление потока влажного воздуха после вентиляторов сохраняется на участке высотой 10–12 м, что почти исключает возможность рециркуляции воздуха. При нагнетательных вентиляторах воздух выходит из градирни со скоростью около 1,7–2,5 м/с, и уже сравнительно слабый ветер может приводить к задуванию уходящего теплого влажного воздуха вниз и засасыванию его вентилятором, что ведет к резкому ухудшению охладительной способности и требует увеличения размеров градирни.

При нагнетательных вентиляторах требуется больший по высоте размер входных окон, что вызывает необходимость в повышенном напоре для подачи воды на градирню. Поэтому нагнетательные вентиляторы применяются для градирен с площадью орошения не более 16 м². В холодную погоду лопасти нагнетательного вентилятора могут обмерзать, так как на них попадают вместе с холодным воздухом частицы воды, выносимые из градирни. В отсасывающих вентиляторах возможность обмерзания исключается, так как лопасти их постоянно омываются теплым воздухом.

С конструктивной точки зрения установка нагнетательных вентиляторов более проста и они более устойчивы ввиду того, что их можно располагать на фундаментах, непосредственно на земле. Облегчается доступ для их ремонта и обслуживания, проще соединения с электродвигателем, чем у всасывающих вентиляторов. С несущего каркаса градирни снимается нагрузка от вентилятора, редуктора и двигателя, что облегчает каркас и исключает возможности вибрации во время работы вентилятора. Последний недостаток вентиляторных градирен с всасывающими вентиляторами относится не ко всем их типам, так как есть конструкции вентиляторных градирен, в которых редуктор и электродвигатель устанавливаются под ними, а нагрузка от вентилятора, выполненного из легкого алюминиевого сплава, передается в основном на вертикальный вал, соединяющий вентилятор с редуктором. Тихоходные вертикальные электродвигатели, посаженные на одном валу с вентилятором, почти полностью устраняют вибрацию и в

значительной степени облегчают конструкцию каркаса градирни.

При использовании отсасывающих вентиляторов имеется возможность значительного увеличения диаметра рабочего колеса, что позволяет снижать число вентиляторных установок для больших градирен, увеличивать их экономичность и уменьшать создаваемый шум. В случае установки осевого нагнетательного вентилятора увеличение диаметра рабочего колеса связано с увеличением высоты подачи воды, а следовательно, и расхода электроэнергии на циркуляционные насосы.

Во избежание вибрации и частных расцентровок рекомендуется обеспечивать достаточную жесткость опорной конструкции вентилятора, надежность крепления и соединения его с электродвигателем. Для предохранения оборудования и конструкции градирни от повреждения вследствие возникновения внезапной вибрации, например, при нарушении балансировки вентилятора, поломки лопастей и других причинах, в оборудование градирен иногда включаются вибрационные предохранительные выключатели. Конструкции их могут быть весьма разнообразны. Вентиляторы и редукторы должны быть доступными для осмотра и ремонта, а электродвигатели – надежно защищены от воздействия влаги. Для монтажа механического оборудвания в отдельных случаях предусматриваются подъемные механизмы, но чаще применяются передвижные подъемные краны.

Лопасти вентиляторов могут изготавливаться из алюминиевых сплавов, пластмасс, нержавеющей стали или обыкновенной стали со специальным антикоррозионным покрытием. В особых случаях они гуммируются. При выборе материала для изготовления лопастей и других элементов вентиляторной установки необходимо обращать внимание на их стойкость против коррозии, особенно в случае устройства отсасывающих вентиляторов.

Вследствие значительных изменений параметров наружного воздуха, которые влияют на степень охлаждения воды в градирне, желательно, чтобы количество подаваемого вентилятором воздуха можно было регулировать соответственно этим изменениям. Такая регулировка подачи вентиляторов осуществляется изменением частоты вращения (что достигается применением гидромуфт или двухскоростных многополюсных

электродвигателей), а также поворотом лопастей или изменением их числа.

В построенных по отечественным проектам градирнях для создания искусственной тяги применены серийно изготавливающиеся осевые вентиляторы марки ВГ (вентиляторы градирен) и осевые вентиляторы общепромышленного назначения марки 06-300. Технические характеристики выпускавшихся на конец 1990 г. этих вентиляторов приведены в табл. 6.6. В обозначении вентиляторов марки ВГ первая цифра указывает номер модификации, цифры после букв ВГ – условный диаметр рабочего колеса в дециметрах.

Срок службы вентиляторов установлен не менее 10 лет. Ресурс работы до первого капитального ремонта – не менее

Таблица 6.6. **Характеристики вентиляторов градирен**

Марка вентилятора	Номинальная подача воздуха $G_в$, тыс. м^3/ч	Номинальное давление, Па	Частота вращения, мин$^{-1}$	Мощность электродвигателя, кВт	Масса вентилятора, кг
Вентиляторы для градирен					
3ВГ 25	156	137	365	11	830
2ВГ 50	500	147	178	30	4960
2ВГ 70	1100	157	178	75	9300
1ВГ 104	2700	167	110	200	16 250
Фирмы "Нема" с диаметром 10,4 м	2700	196	91	250	14 500
Фирмы "Бальке" с диаметром, м:					
10,4	2700	196	127	250	–
20	10000	157	65	800	–
Вентиляторы общепромышленного назначения					
06-300 № 4	6	250	2850	0,75	16,1
06-300 № 5	5,5	95	1410	0,37	22
06-300 № 6,3	11	150	1410	1,5	34
06-300 № 8	15	98	930	0,8	67,5
06-300 № 8	23	23,5	1410	3	86
06-300 № 10	30	180	950	3	146
06-300 № 12,5	45	157	730	4	207

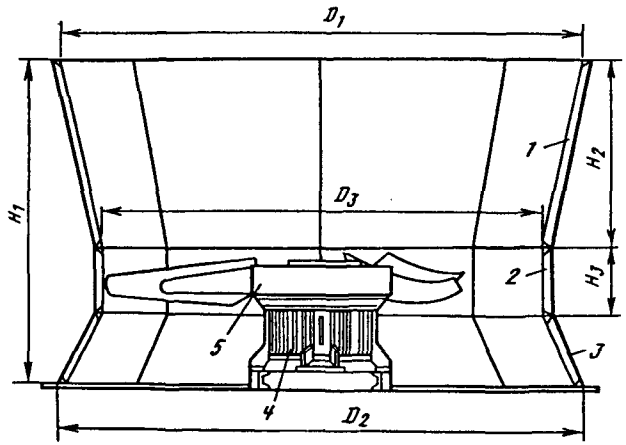


Рис. 6.1. Вентиляторная установка марки ВГ:
1 – диффузор; *2* – корпус; *3* – коллектор; *4* – привод; *5* – рабочее колесо

20 000 ч. На рис. 6.1 приведена обобщенная схема вентиляторных установок ВГ 25, ВГ 50, ВГ 70. Их габариты даны в табл. 6.7.

Лопасти вентиляторов 2ВГ 50 и 2ВГ 170 изготовлены из стали марки Ц3-04, а 3ВГ 25 – из алюминия марки К-121а, ВГ 104 – литые из алюминиевого сплава К-100. Привод вентиляторов ВГ – тихоходный электродвигатель вертикального исполнения. Последняя буква в марке двигателя указывает на вид его охлаждения: О – воздушное, В – водяное.

В обозначении вентилятора общепромышленного назначения номер указывает значение условного диаметра рабочего колеса в дециметрах. Лопасти вентиляторов 06-300 стальные, привод – асинхронный электродвигатель горизонтального ис-

Таблица 6.7. **Габариты вентиляторных установок**

Марка вентилятора	Размеры, мм					
	D_1	D_2	D_3	H_1	H_2	H_3
ВГ 25	3000	3000	2520	1870	1000	480
ВГ 50	6000	5910	5040	3720	2200	700
ВГ 70	8400	8400	7050	5150	3000	1000

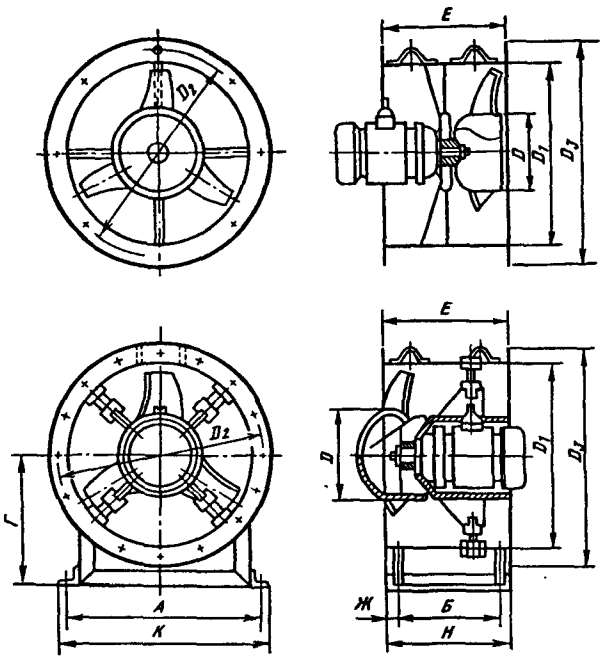


Рис. 6.2. Осевые вентиляторы марки 06-300 общепромышленного назначения

полнения. Вентиляторы № 4–6,3 изготавливали без станин, № 8–12,5 – со станинами. Конструктивные размеры вентиляторов общепромышленного назначения (рис. 6.2) приведены в табл. 6.8. В индивидуальных проектах градирен могут применяться и другие марки вентиляторов.

Все вентиляторы типа ВГ были изготовлены Ашхабадским заводом нефтяного машиностроения ("Ашнефтемаш"), а вентиляторы 06-300 – Крюковским вентиляторным заводом. Аэродинамические схемы и характеристики вентиляторов марок ВГ и 06-300 были разработаны ЦАГИ. Конструктивное оформление вентиляторов ВГ выполнено институтом ВНИИНефтемаш совместно с "Ашнефтемашем", а вентиляторов 06-300 – непосредственно Крюковским вентиляторным заводом. В табл. 6.6 приведены также характеристики вентиляторов германских фирм "Нема" и "Бальке", достаточно широко применявшихся до 1990 г. в проектах градирен для нефтехимической и химической промышленности.

Таблица 6.8. **Конструктивные размеры вентиляторов общепромышленного назначения**

Номер вентилятора	Диаметр рабочего колеса вентилятора, мм	Размеры, мм										
		D	D_1	D_2	D_3	A	$Б$	$Г$	E	$Ж$	K	H
4	400	160	403	430	460	–	–	–	200	–	–	–
5	500	200	503	530	560	–	–	–	250	–	–	–
6,3	630	252	633	650	690	–	–	–	315	–	–	–
8	800	320	805	830	860	750	250	550	320	32,5	806	315
10	1000	400	1006	1035	1060	900	330	670	400	32,0	960	394
12,5	1250	500	1258	1285	1320	1100	400	850	500	47,0	1160	494

К настоящему времени вентиляторное оборудование, установленное в основном в 70–80-е годы, на большинстве градирен отработало свой ресурс и вышло из строя. Замена его при реконструкции градирен в новых экономических условиях и новых государственных границах представляет определенные трудности. Появились новые изготовители вентиляторного оборудования, а старые видоизменились. Иностранные фирмы предлагают свое оборудование по стоимости в 2–3 раза дороже отечественного.

Вентиляторы общепромышленного назначения имеют теперь несколько новые обозначения. Однако характеристики их соответствуют значениям приведенным в табл. 6.6. В традиционном металлическом исполнении их по-прежнему выпускает Крюковский вентиляторный завод, входящий с недавнего времени в АО "Мовен" (г. Москва). Такие же вентиляторы, но из композиционных материалов изготавливает АО "Комвен" (г. Москва), которое принимает также заказы на вентиляторы, отличающиеся от серийных по аэродинамическим характеристикам или условиям эксплуатации.

Вентиляторное оборудование типа ВГ выпускается несколькими фирмами. Здесь уместно отметить, что цифры перед буквами ВГ, обозначавшие различные модификации этих вентиляторов, в новой транскрипции опущены. Характеристики всех "новых" вентиляторов ВГ соответствуют или во всяком случае должны соответствовать по подаче и давлению значениям, приведенным в табл. 6.6. Необходимость соответствия

характеристик обусловлена основным их назначением – установке вместо вышедших из строя серийных вентиляторов Ашхабадского завода.

Вентиляторы ВГ 25 в настоящее время изготавливает ТОО "Питон" (г. Москва). Кроме варианта с тихоходным электродвигателем ВАСОМ10-19-16 завода "Электромашина" (г. Улан-Удэ) возможна их поставка с редукторным приводом, разработанным совместно специалистами Московского вертолетного завода им. Миля, ВНИИНефтемаша и "Ашнефтемаша". Изготовитель редукторов – завод "Красный Октябрь" (г. Санкт-Петербург). По желанию заказчика диффузоры могут быть изготовлены из стали или стеклопластика. Колесо вентилятора включает ступицу из алюминиевого сплава и четыре лопасти из композиционных материалов. Угол наклона лопастей регулируется. Такие лопасти прочнее и долговечнее алюминиевых производства завода "Ашнефтемаш".

Вентиляторы ВГ 50 со стальными колесами и диффузорами изготавливает АО "Сафоновский электромашиностроительный завод" ("СЭЗ") (г. Сафоново Смоленской обл.). Он же изготавливает и тихоходные электродвигатели 2АСВО710S32 к этим вентиляторам. Отдельно стеклопластиковые диффузоры к ВГ 50 более 20 лет изготавливает предприятие УЛ 314-24 (г. Петровское Луганской обл.). Вентиляторы ВГ 70 со стальными колесом и диффузором, а также тихоходным электродвигателем новой конструкции 2АСВО710L34 выпускает АО "СЭЗ". ТОО "Надежда" (г. Москва) освоило выпуск колес вентиляторов с лопастями, аналогичными выпускавшимся длительное время заводом "Ашнефтемаша" – с верхним креплением лонжерона к листу лопасти (модификации 2ВГ 70 и 6ВГ 70) и стальных диффузоров.

ТОО "Питон" (г. Москва) освоен выпуск рабочих колес ВГ 70-ЛС с четырьмя лопастями объемного профиля из стеклопластика. Лопасти разработаны ЦАГИ по техническому заданию ВНИИНефтемаша и спроектированы специалистами Московского вертолетного завода им. Миля. Масса колеса по сравнению с серийным колесом со стальными лопастями снижена в 3,5 раза. Лопасти легки, прочны, антикоррозионны. Колесо может быть установлено на вал электродвигателя непосредственно на градирне без применения подъемного крана. С 1996 г. ТОО "Питон" поставляет редукторные приводы для вентиляторов ВГ 50 и ВГ 70 с вынесенным за пределы диффузора быстроходным электродвигателем, проектирование и изготовление которых осуществляется совместно специалистами институтов НИИПТУглемаш, ВНИИНефтемаш и Московского вертолетного завода им. Миля.

Вентиляторы ВГ 104 на сегодняшний день в России не изготавливаются, а стоимость импортных (фирм "Нема", "Бальке" и др.) с такими параметрами в большинстве случаев не соответствует финансовым возможностям наших предприятий. В создавшихся условиях при реконструкции градирен типа СК-400 получает все большее распространение использование взамен вышедших из строя колес ϕ 10,4 м колес с вертолетными лопастями. Эти лопасти, отработали свой летный ресурс, но имеют значительный запас прочности, позволяющий им отработать в условиях градирен по оценке специалистов еще не менее 20 лет. Такие лопасти значительно дешевле импортных, менее материалоемки и должны обеспечивать долговечность за счет высокого качества материала и тщательной их сборки. Шестилопастные колеса для вышедших из строя вентиляторов фирмы "Нема" и ВГ 104 диаметром 10,4 м с лопастями вертолета МИ-6 изготавливает НПФ "Эковинт" (г. Москва), а с лопастями вертолета МИ-8 и облегченной ступицей – АО "Казанский вертолетный завод". Вентиляторы ϕ 10,4 с вертолетными лопастями работают на АО "Казаньоргсинтез", Саратовском заводе "Нитрон" и других предприятиях.

Естественно, что аэродинамические характеристики серийных вентиляторов ВГ и вентиляторов с вертолетными лопастями не вполне совпадают. Вместе с тем, как показывают проведенные натурные испытания, их рабочие точки по подаче воздуха могут быть достаточно близки, что позволяет обеспечить требуемую в конкретных случаях степень охлаждения воды на реконструируемых градирнях. Дело в том, что устанавливаемые в реконструируемых градирнях пластмассовые оросители и водоуловители в ряде случаев создают меньшее сопротивление проходу воздуха, чем ранее применявшиеся, под которые в свое время были разработаны вентиляторы марки ВГ. Поэтому несколько меньшая подача воздуха вентиляторами с вертолетными лопастями по сравнению с серийными не столько ограничивает их область применения, сколько настоятельно диктует необходимость в каждом конкретном случае, как, впрочем, и при вентиляторе любого типа, аэродинамического и теплового расчета градирни с компоновкой ее проточной части под подачу воздуха этим вентилятором.

Делаются попытки использования вертолетных лопастей и самолетных винтов, отработавших летный ресурс, для изготовления вентиляторов и других диаметров – взамен серийных (прежде всего ВГ 70 и ВГ 50). Например, на АО "Казанский вертолетный завод" изготовлен промышленный образец вентилятора ϕ 4 м на базе рулевого винта вертолета МИ-8 для специальных градирен. Этот вентилятор предназначен для установки с горизонтальным расположением оси, что следует учитывать при реконструкции градирен. В то же время эти попытки при всей кажущейся перспективности и экономической привлекательности в условиях недогруженности авиазаводов по своему прямому назначению требуют весьма серьезного подхода к делу. При недостаточно обоснованном принятии решений желаемый результат получить не удается.

Применение вертолетных лопастей и самолетных винтов для изготовления колес вентиляторов градирен может оказаться перспективным при всесторонней проработке создаваемых конструкций с учетом требований по значению подачи воздуха на конкретных градирнях и надежности эксплуатации.

Таким образом, в настоящее время имеется возможность оснащения всех типов реконструируемых градирен вентиляторами отечественного производства. Реконструкцию градирен с заменой вентиляторного оборудования для достижения требуемых технологических показателей необходимо производить с помощью ВНИИНефтемаш, НИИ ВОДГЕО и Союзводоканалпроекта.

ГЛАВА 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА И ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАЖДЕННОЙ ВОДЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГЕ

7.1. Башенные градирни

Существуют виды градирен, в которых движение воздуха создается не вентиляторами, а с помощью естественной тяги. К таковым можно отнести башенные, эжекторные и открытые градирни, а также вентиляторные градирни при отключенных вентиляторах. В каждом из этих видов природа и организация движения воздуха имеют свои особенности.

В башенных градирнях естественная тяга возникает вследствие разности масс столбов наружного воздуха и нагретого и увлажненного воздуха внутри градирни. Расчет тяги и тепловой расчет башенной градирни не могут быть отделены друг от друга и должны производиться совместно. Это усложняет задачу потому, что заранее не известен расход воздуха, зависящий в башенной градирне как от начального состояния воздуха, так и от степени его нагрева и увлажнения в оросителе.

Проектированием и научными исследованиями башенных градирен долгие годы занимались отделы Технического водоснабжения и охладителей ТЭС ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и Проектирования градирен Ленинградского отделения ВГПИ "Теплоэлектропроект" (позже ЛОАТЭП). Этими организациями на основании обобщения большого материала, накопленного за два десятилетия работы в указанном направлении, разработаны Технические указания (ТУ) ВСН 14-67 [15], которые распространяются на вновь проектируемые и модернизируемые противоточные градирни производительностью 3000–30 000 м^3/ч с площадью орошения 500–4000 м^2; ТУ стали первым опытом выполнения такой работы по башенным градирням.

В основном в соответствии с ТУ ВСН 14-67 математической лабораторией ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева выполнены на ЭВМ технологические расчеты типовых башенных градирен для построения графиков охлаждения воды. Каждый типовой проект имеет свой график, являющийся технологическим паспортом градирни, по которому определяется температура охлажденной воды или выбирается типоразмер градирни.

Ленинградским отделением Атомтеплоэлектропроекта (ЛОАТЭП) совместно с ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева разработаны проекты двух серий башенных градирен, условно названных "новая" и "старая". Все эти градирни испарительные. Градирни новой серии имеют площадь орошения 1100, 1600, 2300 и 3200 м^2; старой серии – 1200, 1600, 2100, 2600, 3200 и 4000 м^2. В градирнях обеих серий устанавливается двухъярусный асбестоцементный ороситель с ярусом высотой 1,2 м, расстояниями между ярусами 0,05 м и между асбестоцементными листами в свету 0,025 м. Проекты старой серии исключены из каталога – перечня типовых проектов и могут применяться как материалы для проектирования.

Температуру охлажденной воды башенных градирен новой серии следует определять по графикам, приведенным на рис. 7.1–7.4, а градирен старой серии – по графикам, данным на рис. 7.5–7.16. Графики составлены для барометрического давления 0,0984 МПа [736 мм рт. ст. или 1 кгс/см² (1 ат)].

Температура охлажденной воды, определенная по графикам, соответствует условиям работы градирен при штиле. Поправочная кривая в условиях ветра составляется по данным натурных исследований градирен в процессе их эксплуатации.

Расчетные графики для градирен новой серии (рис. 7.1–7.4) позволяют определять для каждого ее типоразмера гарантийную температуру охлажденной воды t_2 в зависимости от температуры наружного воздуха по сухому термометру ϑ_1 и его относительной влажности φ_1, плотности орошения $q_ж$ и температурного перепада Δt в следующих диапазонах: $\vartheta_1 = -10 \div +40$ °С; $\varphi_1 = 20 \div 100\%$; $q_ж = 6 \div 10$ м³/(м² · ч); $\Delta t = 6 \div 12$ °С.

Расчетные графики для градирен старой серии (рис. 7.5–7.16) для каждого ее типоразмера состоят из основного и вспомогательного графика поправок на температурный перепад. По основному графику температура t_2 определяется в зави-

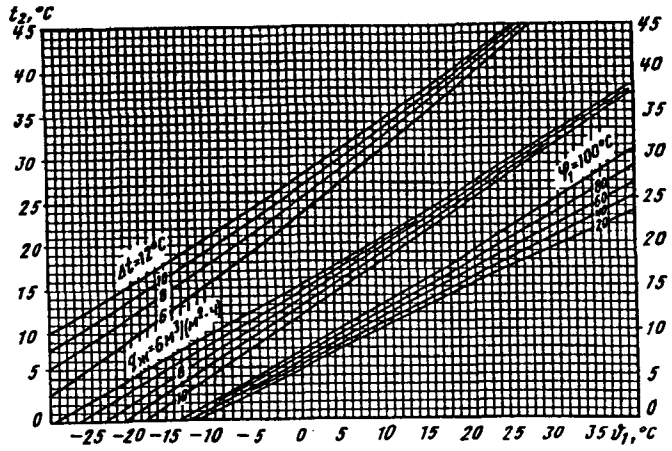


Рис. 7.1. График охлаждения воды для башенной градирни с площадью орошения $F_{ор}$ = 1100 м² (высота градирни 52 м; высота воздуховходных окон 4,5 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 38,2 м; диаметр выходного сечения башни 25 м)

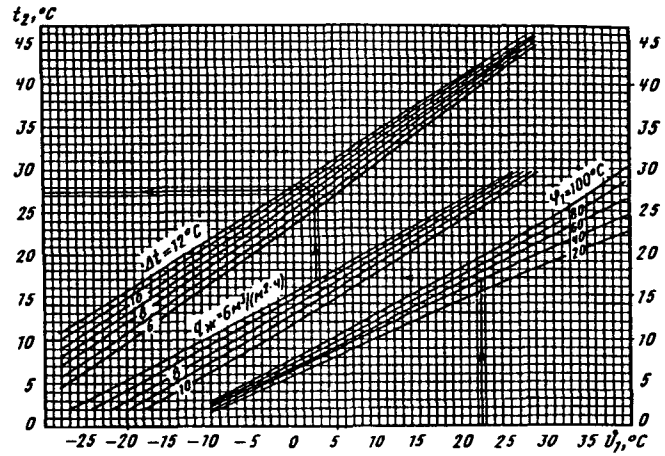


Рис. 7.2. График охлаждения воды для башенной градирни с площадью орошения $F_{ор}$ = 1600 м² (высота градирни 62 м; высота воздуховходных окон 5,5 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 46 м; диаметр выходного сечения башни 30 м)

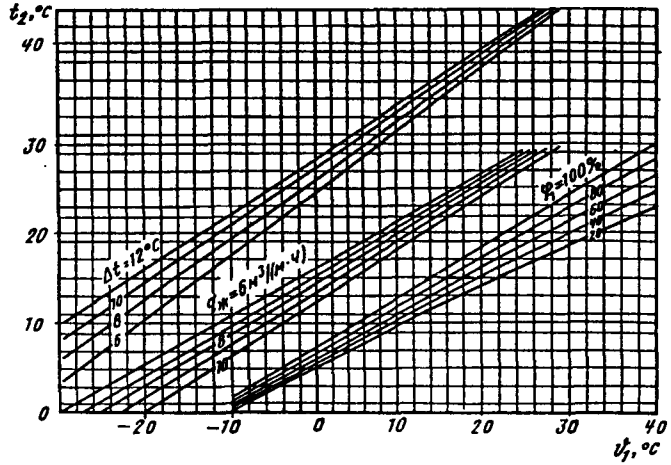


Рис. 7.3. График охлаждения воды для башенной градирни с площадью орошения $F_{ор}$ = 2300 м² (высота градирни 75 м; высота воздуховходных окон 6,5 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 55 м; диаметр выходного сечения башни 36 м)

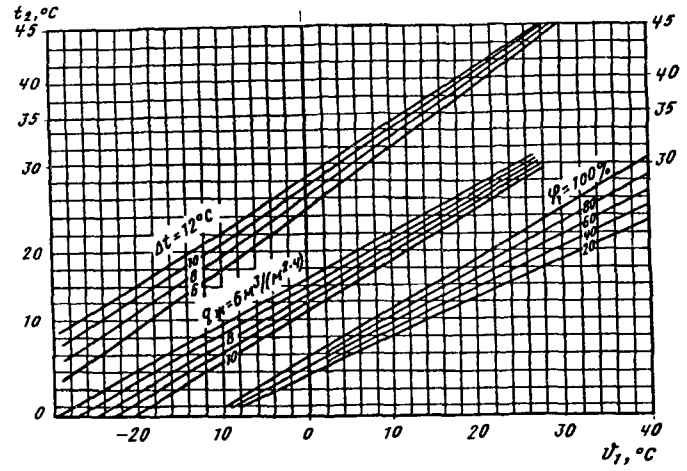


Рис. 7.4. График охлаждения воды для башенной градирни с площадью орошения F_{op} = 3200 м^2 (высота градирни 88 м; высота воздуховходных окон 7,5 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 65 м; диаметр выходного сечения башни 42 м)

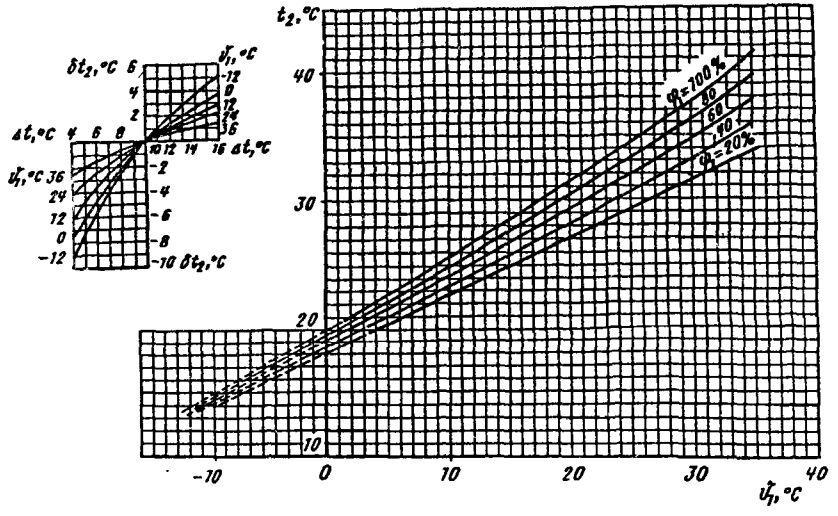


Рис. 7.5. График охлаждения воды и поправок на Δt для градирен с площадями орошения F_{op} = 1200; 1600; 2600 м^2 (соответственно высота градирен 48,4; 53,7; 71 м; высота воздуховходных окон 3,3; 3,3; 4,3 м; диаметр башен на уровне верха оросителя 40; 46; 58,2 м; диаметр выходного сечения башен 26; 30,4; 37,9 м; плотность орошения $q_ж$ = 6 м^3/(м^2 · ч); перепад температур воды Δt = 10 °С; для градирни с F_{op} = 2600 м^2 к температуре охлажденной воды t_2, определенной по графику, вводится поправка $\delta t_2 = -0{,}2$ °С)

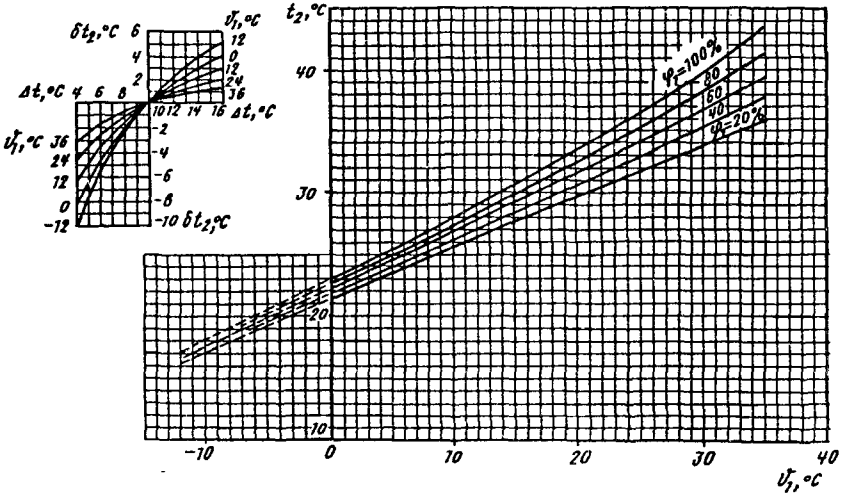


Рис. 7.6. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирен с площадями орошения F_{op} = 1200; 1600; 2600 м^2 (все размеры и Δt те же, что на рис. 7.5; плотность орошения $q_ж$ = 8 м^3/(м^2 · ч); для градирни с F_{op} = 2600 м^2 к температуре охлажденной воды t_2, определенной по графику, вводится поправка $\delta t_2 = -0{,}2$ °С)

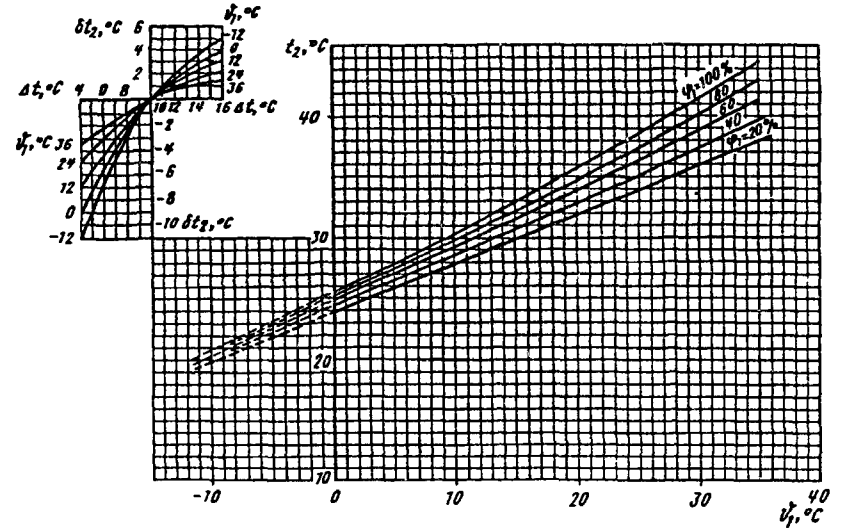


Рис. 7.7. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадями орошения F_{op} = 1200; 1600; 2600 м^2 (все размеры и Δt те же, что на рис. 7.5; плотность орошения $q_ж$ = 10 м^3/(м^2 · ч); для градирни с F_{op} = 2600 м^2 к температуре охлажденной воды t_2, определенной по графику, вводится поправка $\delta t_2 = -0{,}2$ °С)

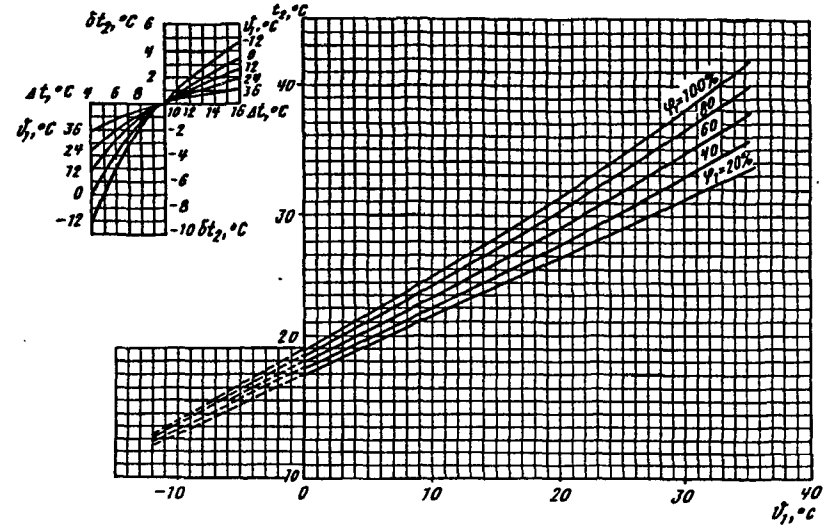


Рис. 7.8. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 2100 м^2 (высота градирни 64,8 м; высота воздуховходных окон 3,8 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 52,2 м; диаметр выходного сечения башни 33 м; плотность орошения $q_ж$ = 6 м^3/(м^2 · ч); перепад температур воды Δt = 10 °С)

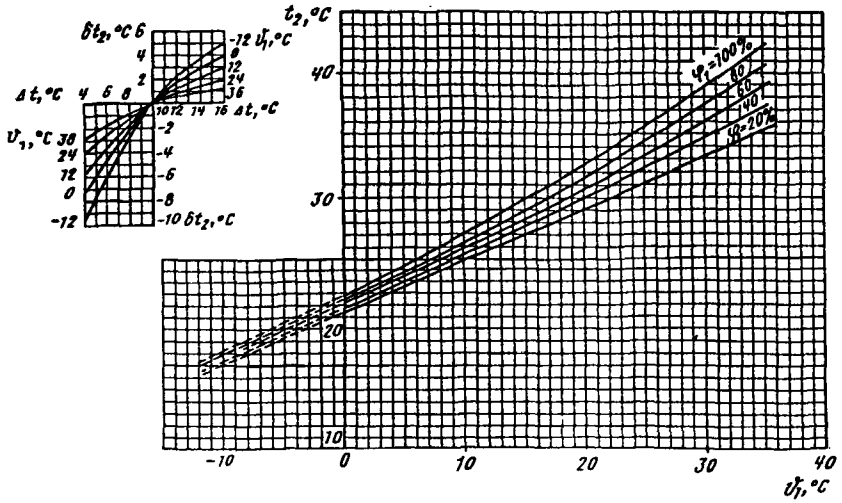


Рис. 7.9. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 2100 м^2 [все размеры и Δt те же, что на рис. 7.8; плотность орошения $q_ж$ = 8 м^3/(м^2 · ч)]

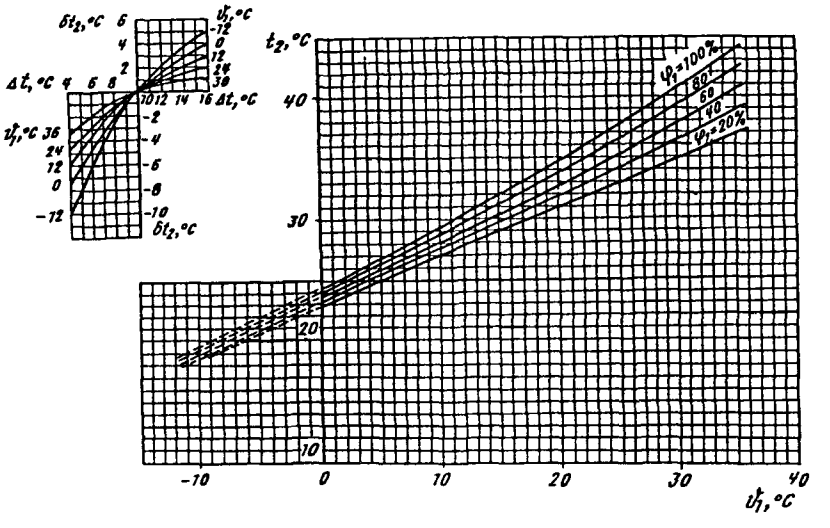


Рис. 7.10. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 2100 м^2 [все размеры и Δt те же, что на рис. 7.8; плотность орошения $q_ж$ = 10 м^3/(м^2 · ч)]

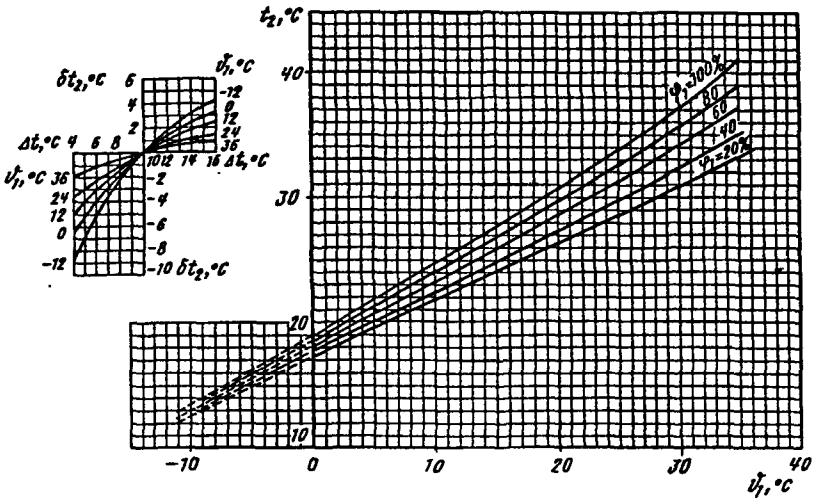


Рис. 7.11. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 3200 м^2 (высота градирни 81 м; высота воздуховходных окон 5 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 64,4 м; диаметр выходного сечения башни 40,4 м; плотность орошения $q_ж$ = 6 м^3/(м^2 · ч); перепад температур воды Δt = 10 °С)

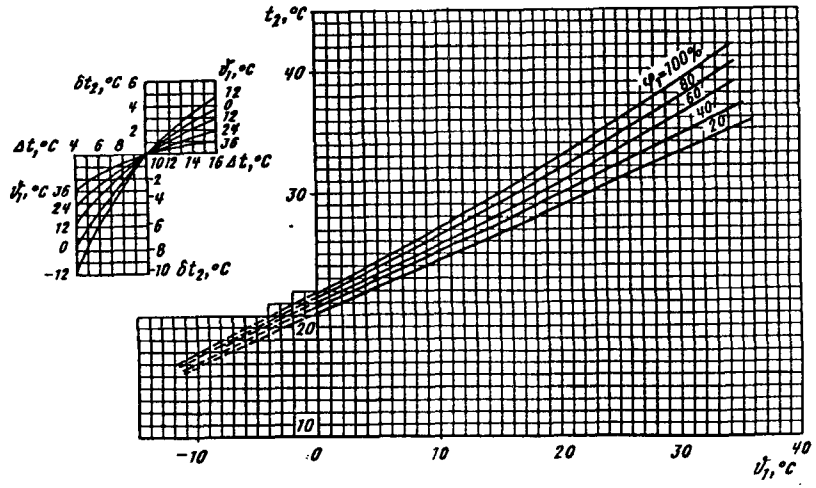


Рис. 7.12. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 3200 м^2 [все размеры и Δt те же, что на рис. 7.11; плотность орошения $q_ж$ = 8 м^3/(м^2 · ч)]

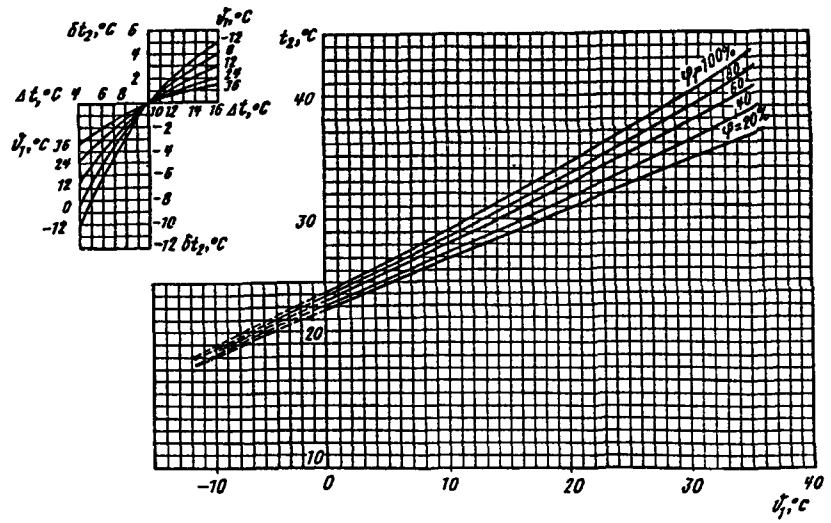


Рис. 7.13. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 3200 м² [все размеры и Δt те же, что на рис. 7.11; плотность орошения $q_ж$ = 10 м^3/(м^2 · ч)]

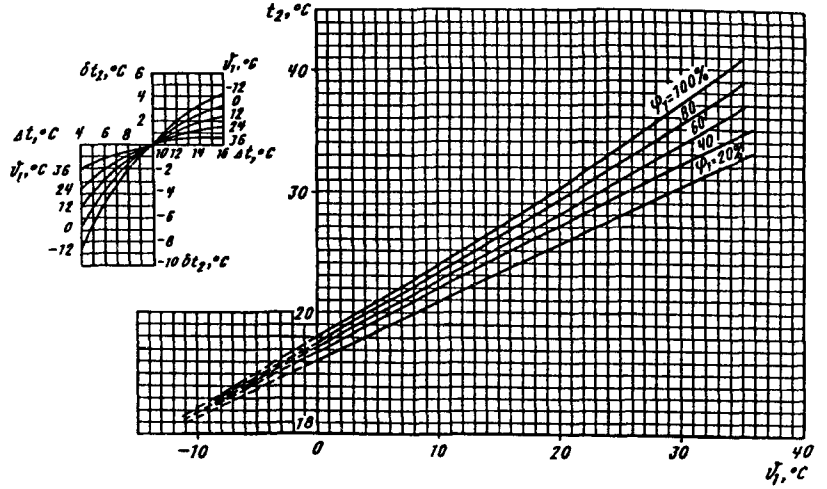
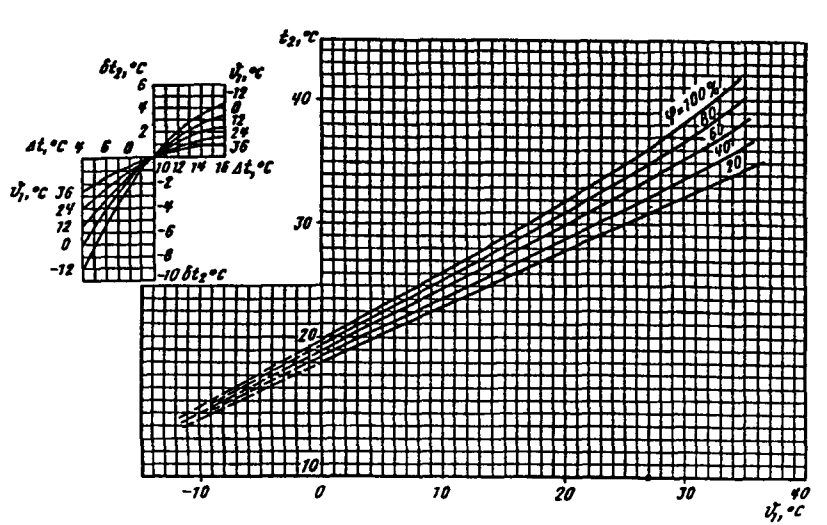


Рис. 7.14. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 4000 м^2 (высота градирни 91,5 м; высота воздуховходных окон 5,5 м; диаметр башни на уровне верха оросителя 72 м; диаметр выходного сечения башни 41,6 м; плотность орошения $q_ж$ = 6 м^3/(м^2 · ч); перепад температур воды Δt = 10 °С)



Рнс. 7.15. График охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 4000 м^2 [все размеры те же, что на рис. 7.14; плотность орошения $q_ж$ = 8 м^3/(м^2 · ч)]

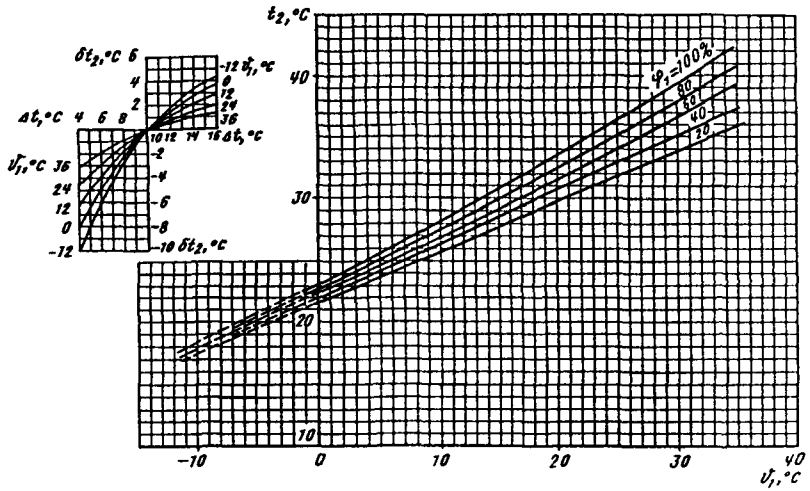


Рис. 7.16. Графики охлаждения воды и поправок на Δt для градирни с площадью орошения F_{op} = 4000 м^2 [все размеры те же, что на рис. 7.14; плотность орошения $q_ж$ = 10 м^3/(м^2 · ч)]

симости от ϑ_1, φ_1, $q_ж$ и Δt в следующих диапазонах: $\vartheta_1 = -10 \div +35$ °С; $\varphi_1 = 20 \div 100\%$; $q_ж = 6 \div 10$ м^3/(м^2 · ч); $\Delta t = 10$ °С.

Для значений Δt, отличающихся от 10 °С (в диапазоне 4 – 16 °С), к температуре воды t_2 вводится поправка, определяемая по вспомогательному графику в зависимости от Δt и ϑ_1.

При определении температур охлажденной воды, если температура наружного воздуха отрицательна, необходимо иметь в виду, что температура охлажденной воды в зимнее время не должна опускаться ниже определенного уровня во избежание обледенения конструкций градирен. Для типовых башенных градирен ЛОАТЭП и ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева минимальная температура охлажденной воды поддерживается на уровне 10–12 °С.

При реконструкции градирен с заменой оросителя, например на пластмассовый, модернизацией водораспределительной и противообледенительной системы, установкой водоуловителя к графику охлаждения воды каждой конкретной градирни должны быть введены корректировочные коэффициенты. Для их определения НИИ ВОДГЕО рекомендует производить натурные испытания градирен, введенных в действие после реконструкции.

Примеры определения температуры охлажденной воды по графикам. Пример 7.1. Градирня новой серии. Площадь орошения F_{op} = 3200 м^2. Плотность орошения $q_ж$ = 8 м^3/(м^2 · ч). Перепад температур воды Δt = 8 °С. Температура атмосферного воздуха по сухому термометру ϑ_1 = 24 °С. Относительная влажность атмосферного воздуха φ_1 = 60%.

По графику, данному на рис. 7.4, для F_{op} = 3200 м^2 находим t_2 в зависимости от ϑ_1, φ_1, $q_ж$, Δt. При этом t_2 = 29,4 °С.

Пример 7.2. Градирня старой серии. Площадь орошения F_{op} = = 3200 м^2. Плотность орошения $q_ж$ = 6 м^3/(м^2 · ч). Перепад температур воды Δt = 8 °С. Температура воздуха по сухому термометру ϑ_1 = 24 °С. Относительная влажность воздуха φ_1 = 60%.

По основному графику, приведенному на рис. 7.11, для F_{op} = = 3200 м^2 находим t_2' в зависимости от ϑ_1, φ_1 при Δt = 10 °С. При этом t_2' = 30,8 °С. Поправка к t_2' на перепад температуры Δt, отличающейся от 10 °С, при Δt = 8 °С и ϑ_1 = 24 °С по поправочному графику рис. 7.11 $\delta t_2 = -1$ °С. Следовательно, $t_2 = t_2' - \delta t_2 = 30{,}8 - 1 = 29{,}8$ °С.

В ряде случаев возникает задача определения температуры охлажденной воды t_2 по тем же параметрам, что и в примерах 7.1 и 7.2, за исключением перепада температур воды Δt. Вместо Δt в этом случае задается расчетное значение температуры воды t_1 на входе в градирню. Эта задача может быть решена с помощью графиков для градирен новой и старой серий. Она иллюстрируется для старой серии на примере.

Пример 7.3. Градирня старой серии. Площадь орошения F_{op} = = 1200 м^2. Плотность орошения $q_ж$ = 8 м^3/(м^2 · ч). Температура воздуха по сухому термометру ϑ_1 = 15,5 °С. Относительная влажность воздуха φ_1 = 73%. Температура воды, поступающей на градирню, t_1 = 38,4 °С.

По основному графику (рис. 7.6) для F_{op} = 1200 м^2 находим t_2' в зависимости от $q_ж$, ϑ_1, φ_1 при Δt = 10 °С. При этом t_2' = 29,7 °С. Далее задаемся тремя значениями перепада температур: Δt_1 = 8 °С, Δt_2 = 12 °С и Δt_3 = 16 °С.

По поправочному графику (рис. 7.6) определяем поправку δt_2 к температуре t_2' при ϑ_1 = 15,5 °С и каждом принятом значении Δt:

при Δt_1 = 8 °С $\quad \delta t_2 = -1{,}5$ °С;
при Δt_2 = 12 °С $\quad \delta t_2 = +1{,}1$ °С;
при Δt_3 = 16 °С $\quad \delta t_2 = +2{,}8$ °С.

Температура охлажденной воды для этих условий $t_2 = t_2' - \delta t_2$:

при $\Delta t_1 = 8$ °С $\quad t_2 = 29{,}7 - 1{,}5 = 28{,}2$ °С;
при $\Delta t_2 = 12$ °С $\quad t_2 = 29{,}7 + 1{,}1 = 30{,}8$ °С;
при $\Delta t_3 = 16$ °С $\quad t_2 = 29{,}7 + 2{,}8 = 32{,}5$ °С.

Температура поступающей воды $t_1 = t_2 + \Delta t$:

при $\Delta t_1 = 8$ °С $\quad t_1 = 28{,}2 + 8 = 36{,}2$ °С;
при $\Delta t_2 = 12$ °С $\quad t_1 = 30{,}8 + 12 = 42{,}8$ °С;
при $\Delta t_3 = 16$ °С $\quad t_1 = 32{,}5 + 16 = 48{,}5$ °С.

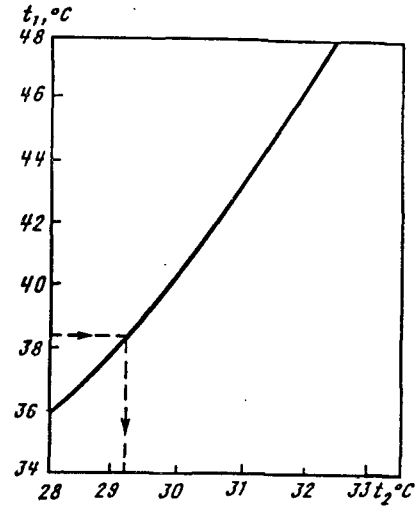
Строим график зависимости t_2 от t_1 при трех значениях $\Delta t = 8$; 12 и 16 °С (рис. 7.17). По этому графику определяем искомое значение t_2 при заданном значении $t_1 = 38{,}4$ °С. При этом $t_2 = 28{,}1$ °С, тогда перепад температур воды $\Delta t = 38{,}4 - 29{,}1 = 9{,}3$ °С.

НИИ ВОДГЕО совместно с ОРГРЭС, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, Мосэнерго, многими ТЭС и другими организациями участвует в работах по реконструкции башенных градирен. Одной из основных составляющих этих работ является замена асбестоцементных и деревянных оросителей на пластмассовые с выполнением соответствующих технологических расчетов. В ходе работ выяснилось, что технологический расчет градирен, приведенный в ТУ ВСН 14-67, не учитывает более поздних разработок в части методики подсчета коэффициентов массоотдачи, определения коэффициентов сопротивления оросителей и не ориентирован на использование компьютерной техники. Сложное совместное решение уравнений тяги и тепла в ТУ ВСН 14-67 предлагается осуществлять методом подбора в результате трудоемких последовательных вычислений вручную и составления по их результатам таблиц и графиков для определения искомых значений температуры охлажденной воды и скорости воздуха в башенной градирне.

В 1991 г. НИИ ВОДГЕО для ОРГРЭС выполнена модернизация расчета башенных градирен, представленных в ТУ ВСН 14-67, и на этой основе разработана "Программа расчета высоты оросителя при реконструкции башенной градирни".

Высота пластмассовых оросителей определяется в зависимости от их технологических характеристик и требующихся условий охлаждения. Задачей программы расчетов на ПЭВМ является определение высоты оросителя, необходимой для

Рис. 7.17. График поправок (к примеру 7.3)



охлаждения воды при заданных условиях. Поверочным расчетом определяется температура охлажденной воды. Расчеты выполняются по методике, учитывающей тепломассообмен в активном объеме оросителя. При расчете использованы результаты исследований НИИ ВОДГЕО. В качестве исходных данных для расчетов принят набор параметров, входящих обычно в задание на реконструкцию башенной градирни.

Технологические характеристики оросителя (A, m, $\zeta_{с.о}$, $K_{ор}$) принимаются по результатам его исследований или по литературным данным. В задании на расчет можно указывать одну или три, четыре и более высоты оросителя, определяемые по конструктивным соображениям. Программой предусмотрен подсчет температуры охлажденной воды для каждой указанной в задании высоты оросителя. Эти данные являются выходными. По ним определяется на основе технико-экономических расчетов наиболее подходящая высота оросителя для заданных условий работы градирни.

Расчетный параметр t_2 находится по (4.67) с учетом зависимостей, приведенных в гл. 4.

Сила тяги в башенной градирне с высотой башни $H_б$ определяется по формуле

$$z = (H_б + 0{,}5h)(\gamma_{в1} - \gamma_{в2}). \qquad (7.1)$$

Плотность входящего в градирню и выходящего из нее воздуха находится по формулам

$$\gamma_{в1} = \frac{P_б - \varphi_1 P''_{\vartheta_1}}{R_в(\vartheta_1 + 273{,}2)} + \varphi_1 \gamma''_{\vartheta_1}; \qquad (7.2)$$

$$\gamma_{в2} = \frac{P_б - \varphi_2 P''_{\vartheta_2}}{R_в(\vartheta_2 + 273{,}2)} + \varphi_2 \gamma''_{\vartheta_2}. \qquad (7.3)$$

Температура выходящего воздуха

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + (t_{ср} - \vartheta_1)\frac{i_2 - i_1}{i''_m - i_1}, \qquad (7.4)$$

где $t_{ср}$ вычисляется по (4.53) (обозначена как t_m).

Полное сопротивление башенной градирни определяется по формуле

$$z' = \zeta_{общ}\frac{\gamma_{в.ср}\omega^2_{ор.ср}}{2g} = \zeta_{общ}\frac{K\zeta\omega^2_{ор}}{2g}\left(\frac{\gamma_{в1} + \gamma_{в2}}{2g}\right). \qquad (7.5)$$

Общий коэффициент аэродинамического сопротивления градирни $\zeta_{общ}$ находится на основании ее лабораторных аэродинамических исследований.

При предварительных аэродинамических расчетах градирен с площадью орошения 500–3000 м², конструктивно соответствующих градирням, представленным схематично на рис. 7.18–7.20, общие коэффициенты аэродинамического сопротивления могут быть определены по графикам, приведенным на этих

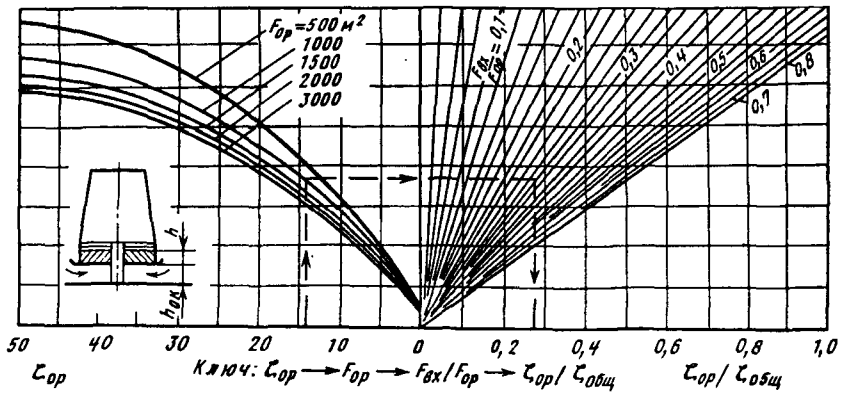


Рис. 7.18. Графики для определения общих коэффициентов аэродинамического сопротивления башенных противоточных градирен с площадями орошения $F_{ор}$ = 500 ÷ 3000 м² с оросительным устройством постоянной высоты и воздухонаправляющим козырьком (по опытам Ю. С. Недвиги)

рисунках. Графики выражают зависимости коэффициентов сопротивления от площадей (высот) воздуховходных окон и коэффициентов сопротивления оросительного устройства (конструкций оросителя и плотностей орошения). Градирни, для которых составлены рис. 7.18–7.20, имеют следующую конструктивную характеристику: плановая конфигурация – пра-

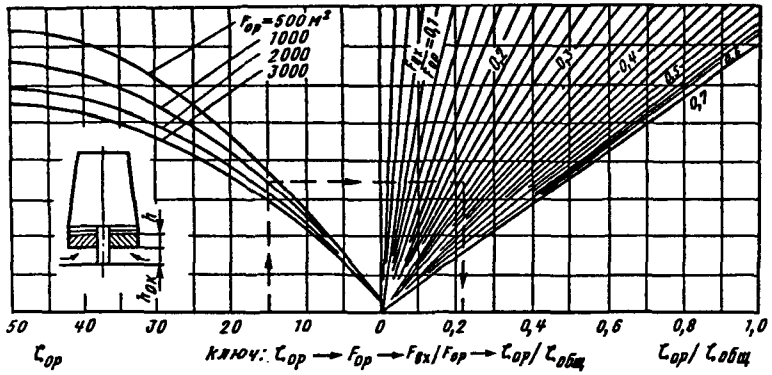


Рис. 7.19. Графики для определения общих коэффициентов аэродинамического сопротивления башенных противоточных градирен с площадями орошения $F_{ор}$ = 500 ÷ 3000 м² и оросительным устройством постоянной высоты без воздухонаправляющего козырька (по опытам Ю. С. Недвиги)

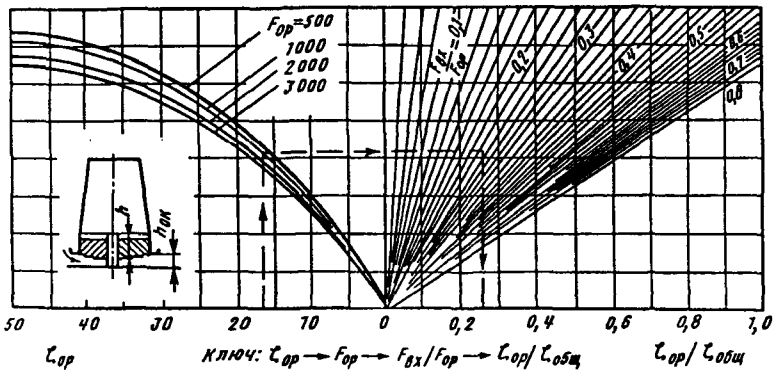


Рис. 7.20. Графики для определения общих коэффициентов аэродинамического сопротивления башенных противоточных градирен с площадями орошения $F_{ор}$ = 500 ÷ 3000 м² с оросительным устройством ступенчатого профиля и воздухонаправляюшим козырьком (по опытам Ю. С. Недвиги)

вильный многоугольник (восьми–шестнадцатиугольник); форма башни – пирамидальная; плановая компоновка оросительного устройства – секторная с расположением щитов или блоков оросителя параллельно граням градирни; система водораспределения – лотковая; водоуловитель отсутствует.

Алгоритм решения (7.5) сводится к нахождению скорости движения воздуха ω в рабочем диапазоне (0,5–1,5 м/с) и температуры воды t_2, при которых $z = z'$. Сравнение z и z' идет до тех пор, пока разница $z - z'$ будет меньше или равна заданной погрешности. Значения h и соответствующие им значения t_2, а также характеристики (для контроля) A и Ah и значения ω и ϑ_2, помещенные в таблицу, являются выходными данными расчета.

Пример 7.4. Определить температуру охлажденной воды для оросителя ПР50 при трех высотах (1; 1,25 и 1,5 м) в реконструируемой башенной градирне с площадью орошения $F_{ор} = 1600$ м^2 (рис. 7.18). Заданные условия: высота башни (от верха оросителя до выходного сечения) $H_б = 43$ м; площадь входных окон $F_{вх} = 530$ м^2; условия охлаждения – $G_ж = 10\,000$ м^3/ч; $t_1 = 35$ °С; $t_2 = 27$ °С (требуемая по предварительной экспертной оценке); климатические условия – $\vartheta_1 = 24{,}5$ °С; $\tau = 19$ °С; $\varphi_1 = 57\%$; $P_б = 745$ мм рт. ст. Для оросителя высотой $h = 1$ м технологические и конструктивные характеристики: $A = 0{,}971$ 1/м; $m = 0{,}36$; $\zeta_{ор} = 11{,}44$; $K_{ор} = 0{,}393$.

Определение значения A при других высотах оросителя заложено в программе и производится в ходе решения задачи на ПЭВМ.

Решение. Исходные данные вносятся в расчетный бланк (табл. 7.1). При этом $\zeta_{общ}$ определяются по рис. 7.18 для каждой

Таблица 7.1. **Расчет высоты оросителя башенной градирни при реконструкции**

Объект: ТЭЦ — Дата: 21.05.96

Исходные данные:

Градирня:	Рис. 7.18
Ороситель:	ПР50
Площадь орошения:	$F_{ор} = 1600$ м^2
Высота башни:	$H_б = 43$ м
Площадь входных окон:	$F_{вх} = 530$ м^2
	$F_{вх}/F_{ор} = 0{,}334$

Продолжение табл. 7.1

Условия охлаждения:	$G_ж = 10\,000$ м^3/ч
	$t_1 = 35$ °С
	$t_2 = 27$ °С
Климатические условия:	$\vartheta_1 = 24{,}5$ °С
	$\tau_1 = 19$ °С
	$\varphi_1 = 57\%$
	$P_б = 745$ мм рт. ст.
	$\varphi_2 = 100\%$

Ороситель:

$h = 1$ м	$\zeta_{ор} = 11{,}44$ 1/м
$A = 0{,}971$ 1/м	$K_{ор} = 0{,}393$
$m = 0{,}36$	$K\zeta = 1{,}1$

Определить t_2 при различных значениях h.

Номер варианта	h, м	$\zeta_{ор}$	$\zeta_{общ}$
1	1	11,4	49,5
2	1,25	14,3	53
3	1,5	17,2	55,5

Таблица 7.2. **Расчет высоты оросителя башенной градирни при реконструкции**

Объект: ТЭЦ — Дата: 21.05.96

Исходные данные:

Градирня:	Рис. 7.18
Ороситель:	ПР50
Площадь орошения:	$F_{ор} = 1600$ м^2
Высота башни:	$H_б = 43$ м
Площадь входных окон:	$F_{вх} = 530$ м^2
	$F_{вх}/F_{ор} = 0{,}334$
Условия охлаждения:	$G_ж = 10\,000$ м^3/ч
	$t_1 = 35$ °С
	$t_2 = 27$ °С
Климатические условия:	$\vartheta_1 = 24{,}5$ °С
	$\tau_1 = 19$ °С
	$\varphi_1 = 57\%$
	$P_б = 745$ мм рт. ст.
	$\varphi_2 = 100\%$

Продолжение табл. 7.2

Ороситель:	h = 1 м	$\zeta_{ор}$ = 11,44 1/м	
	A = 0,971 1/м	$K_{ор}$ = 0,393	
	m = 0,36	K_{ζ} = 1,1	

Варианты исходных данных						Результаты расчета		
Номер варианта	h, м	$\zeta_{ор} \cdot h$	$\zeta_{общ}$	A	$A \cdot h$	ω	ϑ_2	t_2
1	1	11,4	49,5	0,971	0,971	0,68	30,5	27,6
2	1,25	14,3	53	0,865	1,081	0,67	30,7	27,3
3	1,5	17,2	55,5	0,786	1,18	0,66	30,9	27,1

высоты оросителя. После проведения вычислений на ПЭВМ получаем в выходной информации (табл. 7.2) то, что требуемую температуру охлажденной воды 27 °С с точностью до 0,1 °С будем иметь в заданных условиях при высоте оросителя h = = 1,5 м.

Представленные в табл. 7.2 результаты расчета позволяют также с помощью технико-экономического анализа оценить, что более целесообразно для конкретных случаев иметь h = = 1,5 м и t_2 = 27 °С или h = 1 м и t_2 = 27,5 °С. Методика такой оценки приведена далее (см. гл. 17).

7.2. Открытые градирни

Эффект охлаждения воды в открытых градирнях в большой степени зависит от силы и направления ветра. Поэтому их применение ограничивается возможностью размещения на открытой площадке хорошо продуваемой ветром, а также допустимостью кратковременного повышения температуры охлаждаемой воды в период штиля. Располагать открытые градирни следует длинной стороной перпендикулярно господствующему направлению ветра в летний период. Градирни открытого типа, как правило, имеют капельный ороситель. Брызгальные открытые градирни в настоящее время практически не применяются.

Расчет открытых капельных градирен производится по эмпирическим графикам охлаждения воды (рис. 7.21). Графики составлены для следующих расчетных данных: число рядов решетника (ярусов оросителя) $n_р$ = 10; τ_1 = 20 °С; ω = 1,5 м/с. Угол наклона жалюзи составляет 45°, ширина градирен без учета жалюзи равна 4 м. При других значениях $n_р$, τ_1 и ω к данным графиков вносятся поправки с помощью коэффициентов, определяемых по графикам поправок (рис. 7.22).

Расчет градирни сводится к определению требуемой ее площади орошения $F_{ор}$ или температуры охлажденной воды t_2.

Пример 7.5. Требуется определить площадь орошения градирни при условиях: $G_ж$ = 60 м³/ч; τ_1 = 19 °С; t_2 = 28 °С; Δt = = 12 °С; ω = 1 м/с; $n_р$ = 10.

По графикам, приведенным на рис. 7.21, для Δt = 12 °С и $t_2 - \tau_1$ = 28 − 19 = 9 °С определяется плотность орошения $q'_ж$ = = 4,8 м³/(м² · ч).

По графикам, данным на рис. 7.22, принимаются коэффициенты: α_τ = 0,95; α_ω = 0,9; α_n = 1.

Расчетная площадь орошения с поправками будет равна $q_ж$ = 4,8 · 0,95 · 0,9 · 1 = 4,1 м³/(м² · ч). Требуемая площадь оро-

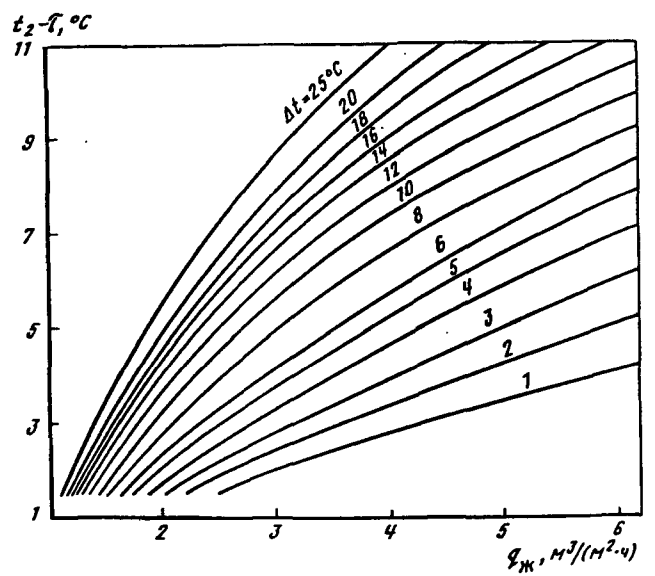


Рис. 7.21. График охлаждения воды для открытой капельной градирни

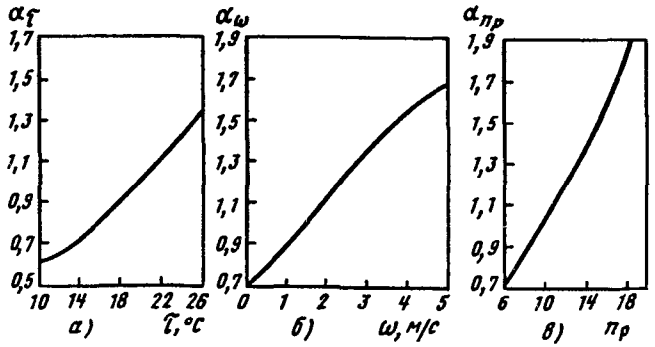


Рис. 7.22. Графики поправок к расчету открытой капельной градирни:
а – поправка к плотности орошения на температуру по смоченному термометру; *б* – то же на скорость ветра; *в* – то же на число рядов решеток оросителя

шения градирни $F_{ор} = 60/4{,}1 = 14{,}6$ м². К установке принимается градирня с площадью орошения 16 м².

Пример 7.6. Требуется определить температуру охлажденной воды при следующих условиях: $G_ж = 60$ м³/ч; $F_{ор} = 16$ м²; $\Delta t = 12$ °С; $\omega = 1$ м/с; $n_р = 10$; $\tau_1 = 19$ °С.

Расчетная плотность орошения составляет $q'_ж = 60/16 = 3{,}75$ м³/(м² · ч). Коэффициенты по графикам (рис. 7.22): $\alpha_\tau = 0{,}95$; $\alpha_\omega = 0{,}9$; $\alpha_n = 1$.

Плотность орошения $q_ж$, приведенная к условиям графика

$$q_ж = \frac{q'_ж}{\alpha_\tau \alpha_\omega \alpha_n} = \frac{3{,}75}{0{,}95 \cdot 0{,}9 \cdot 1} = 4{,}38 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

По графику, данному на рис. 7.21, при $\Delta t = 12$ °С и $q_ж = 4{,}38$ м³/(м² · ч) принимается разность температур $t_2 - \tau_1 = 8{,}4$ °С. Искомая температура охлажденной воды на градирне $t_2 = 19 + 8{,}4 = 27{,}4$ °С.

Проектирование открытых градирен и определение размеров их технологических и конструктивных элементов производится в соответствии с установившейся практикой для той конструкции, к которой относится расчетный график. При проектировании градирен, соответствующих графикам рис. 7.21 и 7.22, необходимо придерживаться следующих положений.

Высота оросителя открытой капельной градирни принимается не более 10 м при числе ярусов решетника от 10 до 12.

Расстояние между щитами решетника по высоте принимается от 0,75 до 0,9 м.

Ширина активной зоны оросителя без учета жалюзей должна быть не более 4 м (из условий продуваемости ветром).

Щиты решетника изготавливаются из нестроганных планок шириной 60–80 мм и толщиной 8–10 мм.

Планки крепятся к брускам щитов решетника в два ряда так, чтобы вода, стекая с планки верхнего ряда, попадала на середину планки нижнего ряда.

Щиты в градирне устанавливаются с переменой направления планок на 90° в соседних по высоте ярусах.

Жалюзи в открытых градирнях изготовляются в виде дощатых щитов шириной 1000–1500 мм и устанавливаются на градирне наклонно под углом 60° с заходом по высоте один над другим на 150–200 мм для уменьшения уноса воды или вертикально, выполненными из решетчатых вертикальных жалюзи типа аэратор.

Распределение воды по площади оросителя осуществляется в виде напорной трубчатой системы с водоразбрызгивающими соплами или безнапорной системы с применением желобов со сливными трубками и разбрызгивающими розетками.

В современных проектах открытых градирен применяется в основном напорная система, обеспечивающая больший охладительный эффект. Водораспределительная система, как правило, выполняется двухзонной: верхняя (расчетная) – для летних условий эксплуатации и нижняя – для зимних. Нижняя зона водораспределения имеет упрощенную конструкцию без разбрызгивания с разливом воды из перфорированных дырчатых труб (или из переливных желобов с зубчатыми бортами). Для предупреждения переохлаждения воды следует предусматривать трубы для сброса теплой воды непосредственно в бассейн, минуя ороситель.

В безнапорной системе насадки (сливные трубки) в водораспределительных желобах устанавливаются равномерно по всей площади сечения оросителя на расстоянии 500–700 мм одна от другой.

Высота падения струи от насадки до розетки должна быть не менее 500 мм, считая от нижнего края насадки.

Диаметр сливной трубки d_c следует определять, исходя из расчетного расхода воды, по формуле

$$d_c = 8{,}9 \sqrt{q_ж f_c / (\mu \sqrt{H_c})}, \qquad (7.6)$$

где f_c – площадь оросителя, обслуживаемая одной сливной трубкой, м²; H_c – высота уровня воды над устьем трубки, м.

Коэффициент расхода μ следует принимать:

При остром выходном крае трубки	0,82
При слегка закругленном крае трубки ,	0,9
При хорошо закругленном крае трубки	0,95

Внутренний диаметр сливных трубок должен быть не менее 15 мм во избежание их быстрого засорения. Слой воды над дном рабочего желоба должен составлять при расчетном режиме не менее 120 мм. Высота бортов желоба над уровнем воды в них принимается не менее 50 мм или определяется необходимостью пропуска форсированного расхода охлаждаемой воды.

Градирни значительных размеров рекомендуется разделить на отдельные секции, допускающие их отключение на время ремонта или очистки водосборного бассейна. В этом случае высоту рабочих водораспределительных желобов следует принимать из условия пропуска всего (форсированного) расхода воды на оставшиеся в работе секции градирни.

В открытых брызгальных градирнях оросительное пространство остается свободным от решетника для беспрепятственного падения капель воды в водосборный бассейн.

Водораспределительная система выполняется трубчатой с соплами различной конструкции, применяемыми для других типов градирен или брызгальных бассейнов.

Расстояние между рядами сопел принимается в зависимости от их конструкции. При ширине градирни 4 м расстояние между рядами сопел принимаеся 0,8–1 м и от крайних сопел до жалюзи должно быть не менее 0,5 м с учетом диаметра факела разбрызгивания сопла. Сопла следует устанавливать на высоте 2 м от уровня воды в водосборном бассейне с направлением факела разбрызгивания вверх или на высоте 4 м с направлением факела разбрызгивания вниз.

Водосборный бассейн открытых градирен выполняется под всем оросителем на ширину активной зоны. В зонах жалюзей предусматривается водосборная розетка с уклоном в сторону бассейна для стока воды и ограждающим по внешнему контуру бортиком.

Размещение градирен на генплане промышленного предприятия должно осуществляться только в один ряд с учетом беспрепятственного доступа к ним воздуха. Расстояние между отдельными градирнями в ряду следует принимать не менее 5 м. Градирни нужно располагать длинной стороной перпендикулярно господствующему направлению ветра в летний период. Направление ветра в зимний период по возможности должно обеспечивать унос паров и капель воды в сторону от близрасположенных сооружений и дорог.

ГЛАВА 8

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГРАДИРЕН

8.1. Оросители

Оросители являются основным конструктивным элементом градирни, определяющим ее охлаждающую способность. Конструкция оросителя должна обеспечивать получение достаточной площади поверхности охлаждения при оптимальном аэродинамическом сопротивлении. В зависимости от характера преобладающей поверхности охлаждения оросители могут быть: пленочные, капельные (капельно-пленочные), комбинированные и брызгальные. Каждый тип оросительного устройства может иметь весьма разнообразные конструкции отдельных элементов и размеры, а также может выполняться из различных материалов.

При выборе типа оросительного устройства в каждом конкретном случае должно производиться сопоставление охлаждающей способности и стоимости градирни. Значение потерь напора при движении воздуха в оросителе также является неотъемлемым показателем его работы, так как оно характеризует эксплуатационные затраты на градирню. Необходимо учитывать и ряд других показателей – долговечность, изнашиваемость материала, прочность и массу оросителя, легкость установки, доступность ремонтов и осмотров, а также наличие в охлаждаемой воде взвешенных веществ и агрессивных примесей.

Основным типом оросителей, обеспечивающих наиболее высокий эффект охлаждения, является пленочный, но он чувствителен к наличию в воде нефтепродуктов, взвешенных веществ и других примесей, вызывающих зарастание зазоров между элементами. При пленочных оросителях концентрация нефтепродуктов в воде не должна превышать 25 мг/л, а кон-

центрация взвешенных веществ – 50 мг/л. При наличии в оборотной воде жиров, смол и нефтепродуктов, общая концентрация которых составляет 25–120 мг/л, применяют капельные или капельно-пленочные оросители, выполненные из сетчатых элементов, а при концентрации указанных веществ в отдельности, равной более 120 мг/л, – брызгальные.

При наличии в охлаждающей воде примесей, агрессивных по отношению к материалам конструкций градирен, экономически целесообразно предусматривать обработку и очистку воды с целью исключения или уменьшения степени агрессивности и загрязненности.

Оросительные устройства вентиляторных и башенных градирен по своей конструкции аналогичны. Вентиляторные градирни с пленочным оросителем выполняются, как правило, противоточными. Наряду с пленкой в оросителях такого типа образуется определенное количество капель и мелких брызг, свободная поверхность которых, как и поверхность пленки, участвует в тепло- и массообмене между водой и воздухом.

За последнее время стали применяться чисто пленочные оросители ячеистой и листовой конструкций, в которых количество капель сводится до минимума или полностью исключается. Щиты и решетки пленочных оросителей могут изготавливаться из различных материалов: дерева, асбестоцемента, пластмассы, металла, бумаги и картона, пропитанных различными смолами, и др. Долгое время основными материалами для изготовления оросительных устройств служили дерево и асбестоцемент.

Пленочные оросители. Деревянные оросительные устройства пленочного типа выполняются из прямоугольных брусков толщиной 8–13 мм и шириной до 100 мм. Из них изготавливаются щиты высотой 1,25–2,6 м и шириной до 2,5 м за счет крепления досок широкой гранью к двум–трем вертикальным рейкам с промежутками в 40–150 мм. Доски по высоте в соседних щитах могут располагаться в одной плоскости или "вразбежку". Применение отдельных щитов для монтажа пленочных оросителей не оправдало себя на практике, поэтому они собираются, как правило, в жесткие блоки. Расстояния между щитами блочного деревянного оросителя 20–80 мм. Блоки по высоте устанавливаются в один или два яруса на горизонтальные опорные балки каркаса оросителя или подвешиваются к ним на стальных тягах. Щиты в блоках двухъярусного оросителя

могут устанавливаться во взаимноперпендикулярном направлении.

При устройстве оросителя из отдельных щитов они располагаются вертикально или под небольшим углом к вертикали (до 15°). При этом направление наклона щитов меняется на обратное при переходе от яруса к ярусу. Наклонное положение щитов несколько повышает сопротивление проходу воздуха в сравнении с вертикальным, но при этом исключается возможность проскока капель и струек воды на значительную глубину без соприкосновения с планками оросителя.

Щиты обычно изготовляются из нестроганной древесины хвойных пород деревьев, пропитанной антисептиком, или мягколиственных пород деревьев, модифицированной. Крепежные изделия применяются с антикоррозийным покрытием (оцинковка, омеднение и др.).

Характеристиками охлаждающей способности оросителя являются величины A и m, которые согласно (4.28) не зависят от гидравлической нагрузки и температурных условий его работы, а также климатических факторов. Приняв в этой формуле $\lambda = 1$, что соответствует, в частности, $q_ж = 10\,000$ кг/(м² · ч) и $\omega = 2{,}3$ м/с (при $\gamma = 1{,}2$ кг/м³) имеем

$$A = \beta_{x\gamma} \cdot 10^{-4}. \tag{8.1}$$

Таким образом, при одинаковых условиях можно с достаточной полнотой и большой наглядностью сопоставлять охлаждающую способность оросителей по значению A (см. рис. 14.1). Экспериментально установлено, что A пропорционально удельной площади контактной поверхности пленки $F_{пл}$, м²/м³, или, что то же самое, насыщенность S, м³/м³, оросителя элементами его конструкции – планками, щитами и др., т. е.

$$A = x + \alpha F_{пл}, \tag{8.2}$$

или

$$A = y + \beta S. \tag{8.3}$$

В НИИ ВОДГЕО экспериментально установлена зависимость коэффициента A и $\zeta_{с.о}$ от $F_{пл}$ и S для пленочных деревянных оросителей

$$A = 0{,}215 + 0{,}0112F_{пл}; \tag{8.4}$$

$$\zeta_{с.о} = 0{,}44 + 15{,}94S. \tag{8.5}$$

Указанные зависимости A и ζ от степени насыщения S справедливы только при гомогенной структуре оросителя, т. е. при относительно равномерном заполнении его элементами сравнительно небольшого сечения, употребляемыми обычно в оросителях.

Оросители из дерева имеют следующие недостатки: древесина чувствительна к химическому и биологическому воздействию, а планки оросителей не могут быть тоньше 10 мм из-за коробления и разрушения древесины в результате вымывания водой из нее лигнина (делигнификация). В результате этого для связи клеток в древесине остается лишь целлюлоза и она становится непрочной. Процесс делигнификации идет более интенсивно при высоких значениях pH и значительном содержании в воде активного хлора.

Асбестоцементные оросители. Изготавливаются из стандартных плоских или волнистых листов. Асбестоцемент, как и дерево, хорошо смачивается водой, он гигроскопичен, впитывает в себя воду в количестве до 12% собственной массы. Благодаря этим качествам по его листам обеспечивается хорошее растекание пленки воды, что является важным свойством в улучшении охладительного эффекта оросителя.

Расстояние между асбестоцементными листами оросительного устройства обычно принимается 15–45 мм. Учитывая, что толщина асбестоцементных листов меньше, чем деревянных, активная поверхность соприкосновения пленок воды с воздухом в единице объема асбестоцементного оросителя при одинаковых расстояниях между щитами выше, чем деревянного. Это обстоятельство позволяет уменьшить высоту оросителя, а следовательно, и снизить высоту подачи воды. Расстояние между листами менее 15 мм нежелательно, так как может произойти засорение промежутков, что вызовет заметное дополнительное сопротивление движению воздуха и увеличение массы оросителя. Асбестоцементные листы в оросителе следует устанавливать преимущественно вертикально, так как при наклонном положении обращенная книзу поверхность не полностью смачивается.

Применяется, как правило, блочная конструкция оросителей из асбестоцементных листов. При сборке блоков из плоских листов или волнистых с параллельным расположением волн устанавливаются разделительные элементы (фарфоровые, пластмассовые и др.), фиксирующие расстояния между

листами. В оросительных устройствах из волнистых листов с чередующимися вертикальным и горизонтальным расположениями волн расстояние между листами определяется высотой волн, поэтому разделительные элементы не требуются.

Недостатком асбестоцементных оросителей является сравнительно большая масса на единицу площади, что вызывает утяжеление несущих конструкций, его канцерогенные свойства и склонность к зарастанию поверхности листов солями карбоната кальция.

Максимальные размеры стандартных асбестоцементных листов: плоских 1200 × 1600 мм, волнистых 994 × 2500 и 994 × × 2800 мм. Толщина плоских и волнистых непрессованных листов составляет 8–10 мм, плоских прессованных – 6 мм.

Пластмассовые пленочные оросители. Такие оросительные устройства являются одним из наиболее прогрессивных и распространенных типов. Пластмасса противостоит химическому воздействию многих растворов, кислот, щелочей и солей, что выгодно отличает ее от древесины. Однако в охлаждаемой воде содержатся углеводороды, как, например, на нефтеперерабатывающих заводах, в этом случае таких пластмасс, как полистирол, следует избегать.

Ведущие зарубежные фирмы по строительству градирен "Бальке-Дюрр" (Германия), "Хамон" (Франция), "Марли" (США), "Мунтерс" (Швеция) и другие активно ведут разработку пластмассовых оросителей и применяют их в действующих градирнях. Эти разработки усиливаются в связи с дефицитом дерева, плохими экологическими свойствами асбестоцемента и удорожанием энергии. К созданию оптимального профиля указанные фирмы идут разными путями в зависимости от вида материала, его толщины, принятых по условиям прохода воздуха и воды размеров ячеек и т. п. Все большее применение находят пластмассы для изготовления оросителей в Болгарии, Венгрии, Румынии, Чехии, Словакии и Китае.

Пленочные (сотовые или ячеистые) оросители из пластмассы, а точнее из бумаги, впервые начали применять в небольших серийных градирнях заводского изготовления 30 лет тому назад. Пытаясь реализовать большую производительность в малом объеме, изготавливали оросители с удельной площадью поверхности 500 м^2/м^3. Получили очень высокую производительность, но ороситель часто закупоривался. Исходя из указанных соображений, в Германии применяют пленочные оро-

сители с расстояниями между листами 12; 15; 19 и 27 мм, с удельной площадью поверхности обмена соответственно 240; 180; 140 и 110 м²/м³.

Однако не только удельная площадь поверхности определяет охлаждающую способность оросителя. Большое значение имеют следующие условия: вода должна стекать по оросителю ровной пленкой, а не отдельными ручейками или струйками; соприкасающаяся с воздухом поверхность водяной пленки должна непрерывно обновляться путем турбулентного перемешивания.

Для изготовления пластмассовых оросителей используют поливинилхлорид, полиэтилен низкого давления, насыщенные полиэфирные смолы, ударопрочный полистирол, полимер стирола и акрилнитриала и др. Все эти исходные материалы – листы или пленки обычно имеют гладкую гидрофобную поверхность. Чтобы изготовить из них оросители, удовлетворяющие указанным выше условиям, необходимо видоизменить их поверхность и форму.

В НИИ ВОДГЕО проведено множество испытаний оросителей из полимерных материалов различной конфигурации, чтобы выявить и выделить по возможности в чистом виде конструктивные факторы, влияющие на эффективность оросителя. Обобщенные данные испытаний наиболее подходящих конструкций приведены в табл. 8.1. Они показывают насколько эффективны различные методы интенсификации оросителей из пластмассовых листов или пленки.

Интенсификация охлаждающей способности пластмассовых оросителей может быть осуществлена путем использования таких приемов, как создание шероховатой, пористой или волнистой поверхности, подбор оптимального числа и формы волн, перфорирование листов или замена их сетками, а также устройство разрывов по ходу движения воды и воздуха, обеспечивающих чередование капельных и пленочных режимов движения воды и за счет этого перераспределение и дополнительную турбулизацию взаимодействующих потоков и повышение тепломассообмена. Наибольший эффект интенсификации охлаждения достигается за счет комбинирования указанных выше приемов. Например, сочетание в конструкции пористой поверхности с подбором оптимального числа и формы волн увеличивает эффективность охлаждения в 2,7 раза по сравнению с оросителем из гладких плоских листов. Перспек-

Таблица 8.1. **Сопоставление технологических характеристик оросителей при различных способах интенсификации**

Материал и конструкция	Толщина листа δ, мм	$\beta_{xv}/F_{пл}$, 1/м³	m	ζ, 1/м	$A/A_{п.г}$	$\zeta/\zeta_{п.г}$	$P_{ор}$, кг/м³
Плоские листы:							
ПВХ – гладкие	0,6	45	0,25	3	1	1	34
ПШУПС – пористые	2,4	62	0,41	4,42	1,38	1,47	62
Плоские сетки:							
ТТ0203	2,5	45	0,69	4,54	1	1,51	20
ТА0101	3	63	0,60	7,36	1,4	2,45	21
ТТ0309	4,3	75	0,63	8,58	1,67	2,86	37
Волнистые листы, ПВХ, гладкие, 17 волн:							
перекрестно под углом 90°	0,6	80	0,62	12,38	1,78	4,13	34
перекрестно под углом 60°	0,6	51	0,44	5,51	1,13	1,84	34
Полиэтилен волны – гофры с насечками – канавками:							
перекрестно под углом 60°	1	87	0,72	14,11	1,93	4,7	57
с отверстиями 10 × 20	1	108*	0,72	14,52	2,4	4,84	50
с отверстиями 15 × 30	1	107*	0,63	13,14	2,38	4,38	49
ПШУПС – пористые перекрестно под углом 90°:							
5 волн	2,4	85	0,65	12,02	1,89	4	90
9 волн	2,4	122	0,73	20,41	2,71	6,8	90
12 волн	2,4	108	0,64	21,73	2,4	7,1	90
18 волн	2,4	92	0,77	23,65	2,04	7,9	90

* За $F_{пл}$ сеток принята полная (с двух сторон) площадь поверхности полотна, включая отверстия.

Примечание. В соответствии с (8.1) $\beta_{xv} = A \cdot 10^{-4}$; $A_{п.г}$ – коэффициент плоского гладкого листа.

тивными направлениями дальнейших конструктивных поисков интенсификации охлаждающей способности оросителей являются применение сеток вместо листов и устройство турбулизирующих разрывов по ходу движения воды и воздуха. Эти направления еще недостаточно разработаны, но таким путем можно получить экономию материалов в 1,5–2 раза при сохранении и даже увеличении охлаждающей способности. За базу при сопоставлении оросителей в табл. 8.1 приняты технологические характеристики $A_{п.г}$ и $\zeta_{п.г}$ оросителя из гладких листов ПВХ. Листы имели вертикальные волны, но поскольку на путях движения воды и воздуха не было никаких препятствий, их можно рассматривать как плоские.

Из данных табл. 8.1 следует, что созданием пористости – шероховатости можно повысить охлаждающую способность оросителя примерно в 1,4 раза. Аналогичного и даже большего эфекта до $1{,}7A/A_{п.г}$ можно достигнуть, применяя вместо листов сетки; причем сетки по сравнению с листами при одинаковой охлаждающей способности могут иметь в 1,5–3 раза меньшую массу и соответственно требуют меньше материала для изготовления.

На рис. 8.1 показаны схемы и общий вид указанных в табл. 8.1 сетчатых оросителей, приведены размеры сеток и их конструкции. Заметно большей удельной охлаждающей способностью обладают при одинаковой высоте оросители из сеток марок ТТ0309 и ТА0101. В обеих этих сетках конфигурация ячеек образована как бы переплетением толстых нитей, что создает лучшие условия для турбулизации потоков воды и воздуха по сравнению с относительно плоской сеткой марки ТТ0203. В то же время следует отметить, что влияние конфигурации и размеров ячеек сеток на охлаждающую способность оросителей в настоящее время изучено еще недостаточно и соответствующие зависимости (судя по литературе) еще не установлены.

Устройством волн на гладких листах в зависимости от их направления можно увеличить значение A в 1,1–1,8 раза. Дальнейшая интенсификация может быть осуществлена путем создания на волнах-гофрах канавок, насечек и отверстий, способствующих замедлению движения пленки по поверхности листов, увеличению ее растекания и усилению турбулизации. Этими способами можно достичь увеличения $A(\beta_{xv})$ в 1,9 – 2,4 раза. Причем число, форма и размеры отверстий должны быть оптимизированы (табл. 8.1).

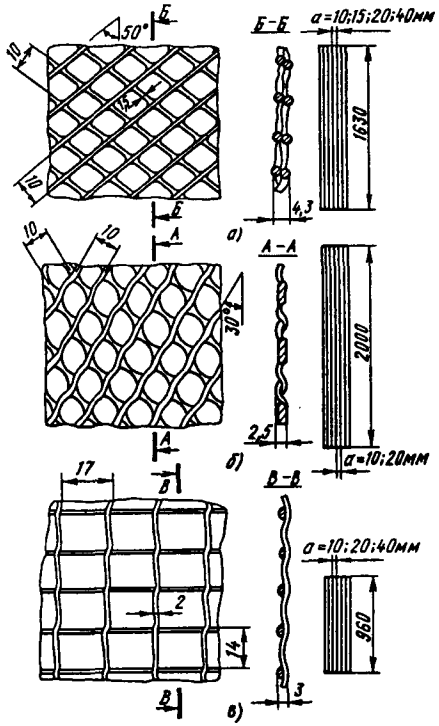


Рис. 8.1. Схемы оросителей из плоских сеток различных марок:
а – ТТ0309; *б* – ТТ0203; *в* – ТА0101

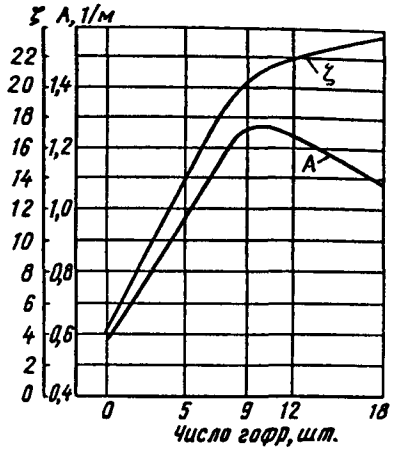


Рис. 8.2. Зависимости коэффициентов A и ζ от числа гофр на 1 м высоты пленочного оросителя

Применение пористых волнистых листов вместо гладких при примерно равном числе волн может повысить $A/A_{п.г}$ с 1,8 до 2, т. е. эффект несколько меньший, чем при замене плоских гладких листов пористыми. Однако следует иметь в виду, что в данном случае (табл. 8.1) имело место также и изменение форм волн, количественное влияние которого на A пока не установлено. Были проведены исследования пленочных оросителей из пористого шероховатого ударопрочного полистирола (ПШУПС) с числом двухсторонних гофр на 1 м длины листа от 0 (табл. 8.1, плоские листы) до 18 (волнистые листы). Результаты этих испытаний (рис. 8.2) показали, что по мере увеличения числа гофр возрастает аэродинамическое сопротивление оросителя, причем очень сильно на начальном

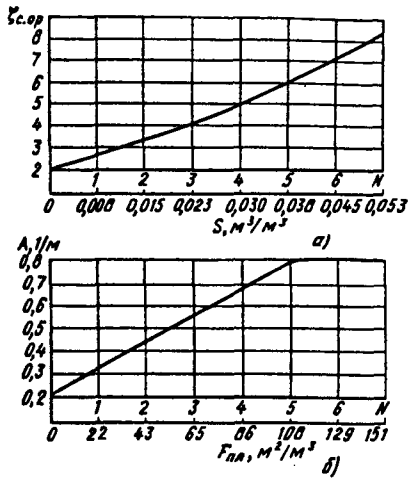
участке кривой (до 9 гофр), а затем возрастание ζ заметно спадает. При наличии до девяти гофр на 1 м высоты листа коэффициент A, определяющий охлаждающую способность оросителя, возрастает аналогично сопротивлению, а затем уменьшается. Это позволяет считать, что существует оптимальное число гофр (возмущений), определяющих режимы движения потоков воды и воздуха и степень их перемешивания. Следовательно, путем определенного сочетания вдоль листов по ходу воды и воздуха плоских и волнистых участков можно добиться значительно большей охлаждающей способности оросителя, чем при сплошных волнистых или плоских листах. В данном случае за счет применения пористого материала и оптимизации числа волн удалось повысить значение A по сравнению с оросителем из гладких плоских листов в 2,7 раза (табл. 8.1).

Значительная интенсификация охлаждающего эффекта за счет дополнительной турбулизации потоков воды и воздуха, лучшего их перераспределения и перемешивания согласно ряду экспериментов различных исследователей может быть достигнута путем разрыва сплошных листов по высоте. В табл. 8.2 и на рис. 8.3 демонстрируется, что рациональным размещением разрывов можно при равной охлаждающей способности добиться значительного уменьшения количества материалов на устройство сотового оросителя из пленки ПКНП толщиной $\delta = 0{,}7$ мм и снизить его аэродинамическое сопротивление по сравнению с оросителем из сплошных по высоте сотовых блоков с прямыми вертикальными канавками. Экономия материлов на устройство оросителя при этом может достигать 30% без какого-либо ущерба для охлаждающей способности оросителя.

Таблица 8.2. **Влияние разрывов по высоте на охлаждающую способность сотового пластмассового оросителя**

Пленочная часть: число ярусов N	Пленочная часть: $h_{п.ч}$, м	Число разрывов	Высота разрыва $h_р$, м	A, 1/м	ζ, 1/м	$\frac{A \cdot 10^4}{F_{пл}}$, 1/м³	$P_{ор}$, кг/м³
7	1,0	0	0	0,785	8,25	52	52
6	0,85	1	0,14	0,811	7,11	63	44
5	0,70	2	0,15	0,784	5,90	73	37
4	0,55	3	0,15	0,642	5,48	75	29
3	0,4	2	0,3	0,549	4,27	84	22
2	0,3	1	0,7	0,461	3,50	107	15
1	0,15	–	–	0,310	2,81	141	7

Рис. 8.3. Влияние числа ярусов N по высоте на аэродинамическое сопротивление (*а*) и охлаждающую способность (*б*) сотового пластмассового оросителя



Устройство разрывов по высоте в оросителях, состоящих из решетчатых пластмассовых элементов, малоэффективно.

Увеличение охлаждающей способности оросителей обычно сопровождается увеличением их аэродинамических сопротивлений, что, как правило, считается нежелательным. Однако этого не всегда следует опасаться, так как для обеспечения равномерного и полного растекания потока воздуха по сечению оросителя он должен обладать определенным сопротивлением (см. гл. 6). Поэтому для окончательной оценки эффективности и рациональности применения конкретного оросителя целесообразно проводить технико-экономические расчеты с учетом всех влияющих факторов. Основными из них являются охлаждающая способность и аэродинамическое сопротивление оросителя.

Капельно-пленочные оросители. Выполненные из дерева оросители состоят из двух или более частей, располагаемых непосредственно друг над другом. По своей конструкции капельная и пленочная части такого оросителя не отличаются от обычных капельных и пленочных. Конструкции капельно-пленочных оросителей из полимерных материалов могут быть аналогичны деревянным. Однако более перспективными являются конструкции капельно-пленочных оросителей, выполненные из пластмассовых сеток, сформированных в виде призм, гофролистов и др. По возможности работать на загрязненной воде капельно-пленочные оросители, выполнен-

ные из сетчатых элементов, имея значительно уменьшенную высоту (~ 1 м), не уступают капельным деревянным высотой 2–3 м, а некоторые конструкции и превосходят их.

При реконструкции градирен с целью максимального использования сохранившихся элементов могут применяться и комбинированные капельно-пленочные оросители, например, из асбестоцементных листов в нижнем ярусе и полимерных сеток или листов различных видов в верхнем.

Капельные оросители. Эти оросители конструктивно представляют собой объемную решетку из планок или реек. Основным материалом для их изготовления служит древесина хвойных пород деревьев, пропитанная антисептиком, или мягколиственных пород деревьев, модифицированная. Планки имеют в сечении прямоугольную или треугольную форму. Появившаяся было тенденция к изготовлению капельных оросителей традиционной конструкции из синтетических материалов в нашей стране развития не получила. Они были быстро вытеснены сетчатыми капельно-пленочными оросителями, с успехом применяющимися на такой же загрязненной воде, как и капельные, но имеющими больший охлаждающий эффект и лучшую технологичность изготовления и монтажа.

Насыщенность S капельного деревянного оросителя при сечении планок 50×10 мм принимается $S = 0{,}015 \div 0{,}02$ м^3/м^3. В случае сечения планок 50×6 мм (из модифицированной древесины) $S_м = 0{,}009 \div 0{,}011$ м^3/м^3. Число планок и расположение их по объему оросителя в обоих случаях соответственно одинаково. Расчетные скорости движения воздуха в типовых капельных градирнях составляют 1,6–2,1 м/с. Зная насыщенность или задаваясь ею, значения A и ζ конкретного капельного деревянного оросителя согласно (8.3) могут быть подсчитаны по следующим эмпирическим формулам:

при толщине планок $\delta = 10$ мм

$$A = 0{,}17 + 7{,}7S, \tag{8.6}$$

$$\zeta_{с.о} = 1{,}1 + 656{,}7S; \tag{8.7}$$

при толщине планок $\delta = 6$ мм

$$A = 0{,}17 + 12{,}8S_м, \tag{8.8}$$

$$\zeta_{с.о} = 1{,}1 + 1091{,}7S_м. \tag{8.9}$$

Пособие по проектированию градирен ориентирует на удельные гидравлические нагрузки для градирен с капельным оросителем $q_ж = 6 \div 10$ м^3/(м^2 · ч). В реальной практике проектирования капельные градирни в зависимости от условий охлаждения воды рассчитывают на $q_ж = 4 \div 9$ м^3/(м^2 · ч), а иногда и более.

Брызгальные оросители. Это оросительные устройства заполненные воздухонаправляющими щитами, предназначенными для улучшения распределения воздушного потока. Щиты выполняются в виде спаренных блоков из досок, волнистых асбестоцементных листов или листового стеклопластика. Расстояние между щитами принимается обычно 0,4–0,5 м. Поскольку щиты несколько увеличивают поверхность соприкосновения воды с воздухом, в отдельных случаях при необходимости увеличения эффективности охлаждения расстояния между ними уменьшают до 0,2 и даже до 0,1 м. Тогда этот брызгальный ороситель работает как разреженный пленочный. Охлаждающая способность брызгальных оросителей примерно на 20% ниже капельных при таком же расходе материала (дерева). Это обуславливает целесообразность применения градирен с такими оросителями только при невысоких требованиях к температуре охлажденной воды, содержащей большое количество механических загрязнений или вещества, способные образовать трудно удаляемые отложения на элементах капельного или пленочного оросителя. Поэтому брызгальные градирни находят применение, в основном, на металлургических предприятиях в системах оборотного водоснабжения доменных и конверторных газоочисток, прокатных цехов, газогенераторных производств, аглофабрик и т.п. Удаление из брызгальной градирни воздухонаправляющих щитов снижает охлаждающую способность в 2–2,5 раза (табл. 8.3). Близки к ним по этому показателю эжекционные градирни.

Технологические характеристики. Для основных типов оросителей, из числа наиболее широко применяющихся в странах СНГ, технологические характеристики приведены в табл. 8.3. Схемы этих оросителей показаны на рис. 8.4. Значения коэффициента A указаны для конкретных высот, имеющихся в таблице. Из анализа и обобщения результатов многочисленных экспериментальных исследований известно, что значение A при $h < 2{,}8$ м зависит от высоты оросителя. Эта зависимость может быть выражена полученной в НИИ ВОДГЕО

Таблица 8.3. **Технологические характеристики оросителей**

Номер на рис. 8.4	Тип, конструкция	Материал	h, м	A, 1/м	m	$\zeta_{с.о}$, 1/м	$K_{ор} \cdot 10^3$, (м · ч)/кг	Объемная плотность/Поверхностная плотность, (кг/м^3)/(кг/м^2)
			Пленочные					
1	ТП 901-6-29, щиты	Дерево	3,7	0,341	0,38	1,08	0,075	82/303
1	ТП 901-6-60, щиты	–"–	3,0	0,357	0,38	1,18	0,075	93/279
2	ЛОАТЭП, плоские листы	Асбестоцемент	2,4	0,479	0,66	4,36	0,37	371/890
3	ТПВВ, ТЭП–ПОЛИС–ВНИИГ–НИИ ВОДГЕО	ПВХ	0,7	1,178	0,44	10,2	0,432	16/11
			1,4	0,759	0,44	10,2	0,432	16/22
4	ОП-2Г1М, гофролисты	–"–	1,4	1,03	0,60	28	0,94	20/28
–	БОВ-1, ЭКО-сервис К	–"–	0,8	1,021	0,72	14,1	0,137	–
5	Комбинированный (ТПВВ + ПР50)	ПВХ + ПНД	1,2 (0,7 + 0,5)	0,846	0,41	10,71	0,415	24/29
6	Комбинированный (ЛОАТЭП + ТПВВ)	Асбестоцемент + ПВХ	1,9 (1,2 + 0,7)	0,635	0,55	5,09	0,114	240/456
7	Комбинированный (ЛОАТЭП + "Бальке-Дюрр")	Асбестоцемент + + ПНД	1,65 (1,2 + 0,45)	0,608	0,66	5,97	0,308	281/464
8	Комбинированный (ЛОАТЭП + ПР50)	–"–	1,7 (1,2 + 0,5)	0,621	0,57	6,44	0,377	272/462
9	ЯПВ-60 (ячеистый), ПОЛИФЕР–НИИ ВОДГЕО	ПВХ	1	1,389	0,61	12,4	0,307	15/15
10	Типа "Мунтерс" (Евроформ)	–"–	1	1,072	0,71	13,7	0,427	21/21
			0,5	1,516	0,71	13,7	0,427	21/10,5
			Капельно-пленочные					
11	Гипрокаучука, планки и щиты	Дерево	4,7	0,324	0,73	4,64	0,086	32/150
12	Трубчатый, гофротрубы (витые) ϕ 44	ПНД	1,4	0,614	0,62	7,32	0,123	48/67
13	Трубчатый, гофротрубы (дренажные) ϕ 63	–"–	1,8	0,485	0,51	3,6	0,266	35/63
14	ТР 60, сетчатые трубы	–"–	1,5	0,641	0,59	11,7	0,245	26/39
15	"Бальке-Дюрр", сетчатые листы	–"–	0,9	0,935	0,65	10,25	0,142	42/38
			1,35	0,757	0,65	10,25	0,142	42/57
16	ПР50, сетчатые призмы, НИИ ВОДГЕО – Техэкопром	–"–	1	0,971	0,36	11,44	0,393	34/34
			1,25	0,865	0,36	11,44	0,393	34/43
			1,5	0,786	0,36	11,44	0,393	34/51
–	ПР50-У*	–"–	1	1,482	0,54	24,7	1,068	41/41
17	ПР50-Д (двухпоточный)**, НИИ ВОДГЕО	–"–	1	1,5	0,36	11,4	0,462	34/34
18	Р500, сетчатые рулоны		1	0,648	0,56	10,63	0,468	35/53
		–"–	1,5	0,504	0,56	10,63	0,468	35/53
19	ТА 0101, плоские сетки (15 × 15 мм)	Полимер	1	0,833	0,63	6,1	0,148	21/21
			Капельные					
20	ТП 901-6-29, планки (50 × 10 мм)	Дерево	3,7	0,309	0,45	12,5	0,137	18/67
20	ТП 901-6-60, планки (50 × 10 мм)	–"–	3	0,374	0,45	18,2	0,137	26/78
21	БОП ПНД, решетки, ЭКО-сервис К – НИИ ВОДГЕО	ПНД (негорючая композиция)	2	0,662	0,4	16,6	0,295	22/55
		–"–	0,95	0,981	0,4	17,5	0,213	22/26

Продолжение табл. 8.3

Номер на рис. 8.4	Тип, конструкция	Материал	h, м	A, 1/м	m	$\zeta_{с.о}$, 1/м	$K_{ор} \cdot 10^3$, (м · ч)/кг	Объемная плотность/Поверхностная плотность, (кг/м^3)/(кг/м^2)
22, к	БОС ПНД-1-1 ЭКО-сервис К	ПНД	0,84	1,296	0,62	8,3	0,177	37/31
–	То же, с разрывом между блоками высотой 1,16 м	–"–	2	0,47	0,6	3,5	0,22	37/31
22, л	БОС ПНД-1-2 ЭКО-сервис К	–"–	0,84	1,373	0,55	6,5	0,337	37/31
–	То же, с разрывом между блоками высотой 1,16 м	–"–	2	0,529	0,59	3,1	0,358	37/31
22, м	БОС ПНД-1-3 ЭКО-сервис К	–"–	0,84	1,167	0,53	8,3	0,24	37/31
–	То же, с разрывом между блоками высотой 1,16 м	–"–	2	0,506	0,47	3,5	0,242	37/31
22, н	БОС ПНД-1-4 ЭКО-сервис К	–"–	0,84	1,007	0,48	5,8	0,325	27/23
–	То же, с разрывом между блоками высотой 1,16 м	–"–	2	0,379	0,54	2,4	0,163	27/23
			Брызгальные					
23	ТП 901-6-46, воздухонаправляющие щиты	Дерево	3,7	0,222	0,29	0,92	0,61	19/70
23	ТП 901-6-51, воздухонаправляющие щиты	–"–	3	0,255	0,29	0,92	0,61	36/108
–	ТП 901-6-51, без воздухонаправляющих щитов	–	3	0,136	0,1	–	0,61	–

* "Уплотненный" – в каждом ряду ПР50 уложены вплотную друг к другу с направлением вершин смежных элементов вверх и вниз.

** А. с. 1616275, SU, МКИ^3 5F 28C 1/100, 1989 г. Нижний ярус оросителя ПР50-Д может иметь высоту $h_1 > 500$ мм или быть комбинированным. Тогда его технологические характеристики будут отличаться от приведенных в таблице.

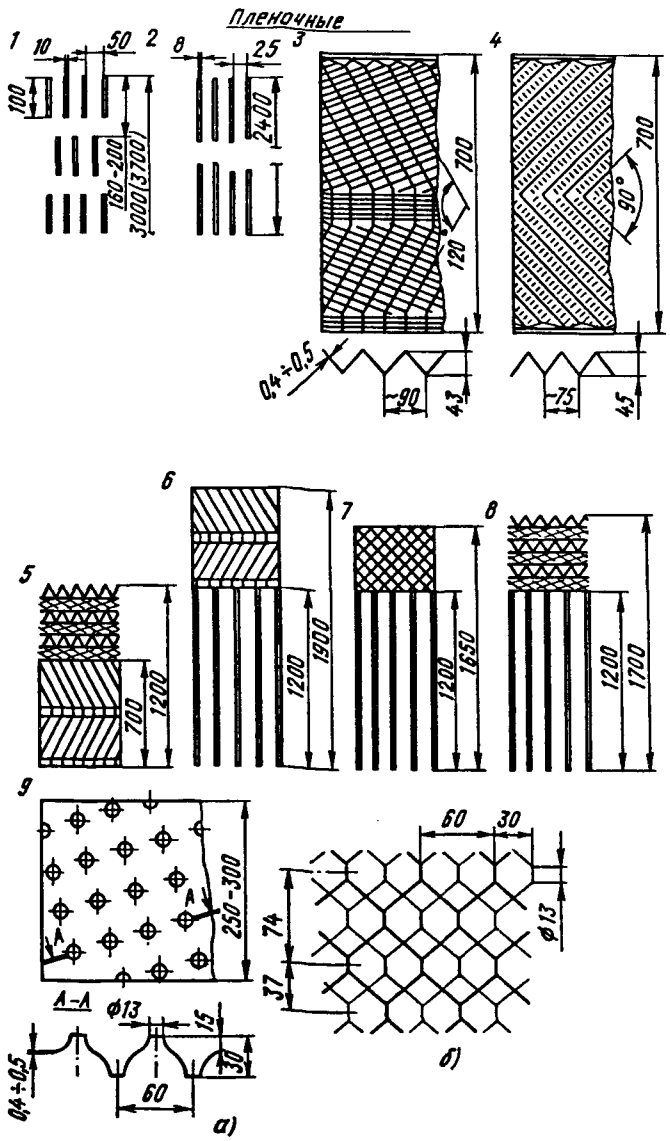


Рис. 8.4 (начало)

Ю. И. Арефьевым эмпирической формулой

$$A = A_0 \cdot 1{,}7h^{-0{,}52}, \tag{8.10}$$

где A_0 – значение A при $h = 2{,}8$ м.

Для удобства пересчета значения A, приведенного в табл. 8.3, полученного при испытаниях, на A_1 при высоте h_1 формула (8.10) может быть преобразована и представлена в виде

$$A_1 = A(h/h_1)^{0{,}52} \approx A\sqrt{h/h_1}. \tag{8.11}$$

Формулы (8.10) и (8.11) действительны только для оросителей с однородной структурой по высоте. В случае, если структура оросителя по высоте неоднородна, например, у комбинированных оросителей, пересчет A на A_1 усложняется. Кроме того, необходимо пересчитывать и характеристики m, ζ, $K_{ор}$ и $P_{ор}$.

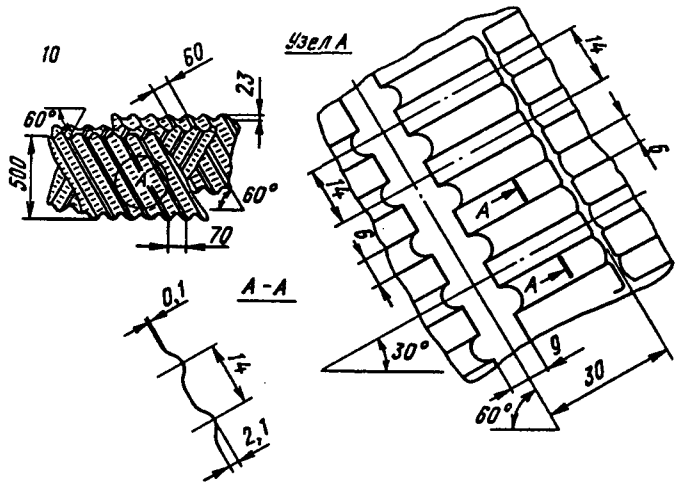


Рис. 8.4. Схемы оросителей (продолжение):

а – общий вид листа; *б* – расположение листов в блоке; *в* – схемы решеток; *г* – схема сборки решеток в блоки (план); *д* – схема призмы; *е* – схема сборки призм в блоки; *ж* – схема решетки ОП ПНД; *з* – элемент оросителя ОС ПНД; *и* – схема сборки решеток ОП ПНД по высоте оросителя; *к* – схема расположения элементов ОС ПНД в блоке БОС ПНД-1-1 (параллельная волна); *л* – то же в блоке БОС ПНД-1-2 (перекрестная волна); *м* – то же в блоке БОС ПНД-1-3 (наклонные трубы); *н* – то же в блоке БОС ПНД-1-4 (перекрестная волна с проставками шириной 10 мм между листами); *1* – деревянные воздухонаправляющие щиты; *2* – капли брызгального потока

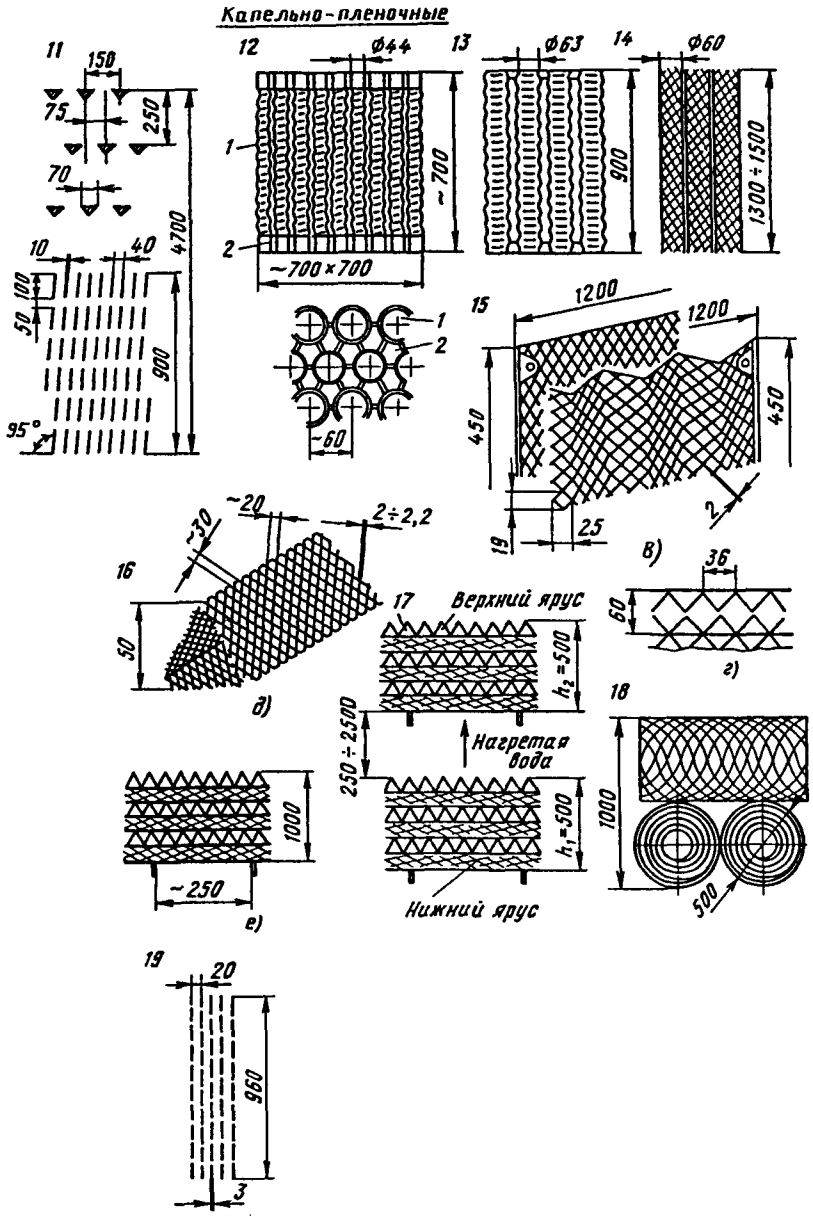


Рис. 8.4 (продолжение)

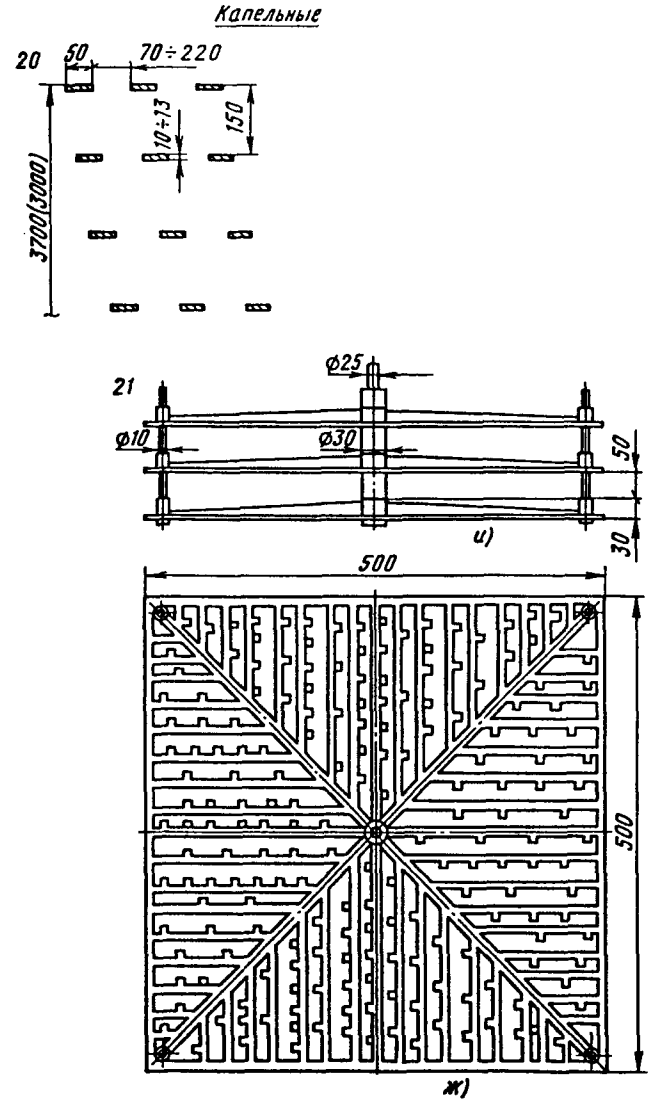


Рис. 8.4 (продолжение)

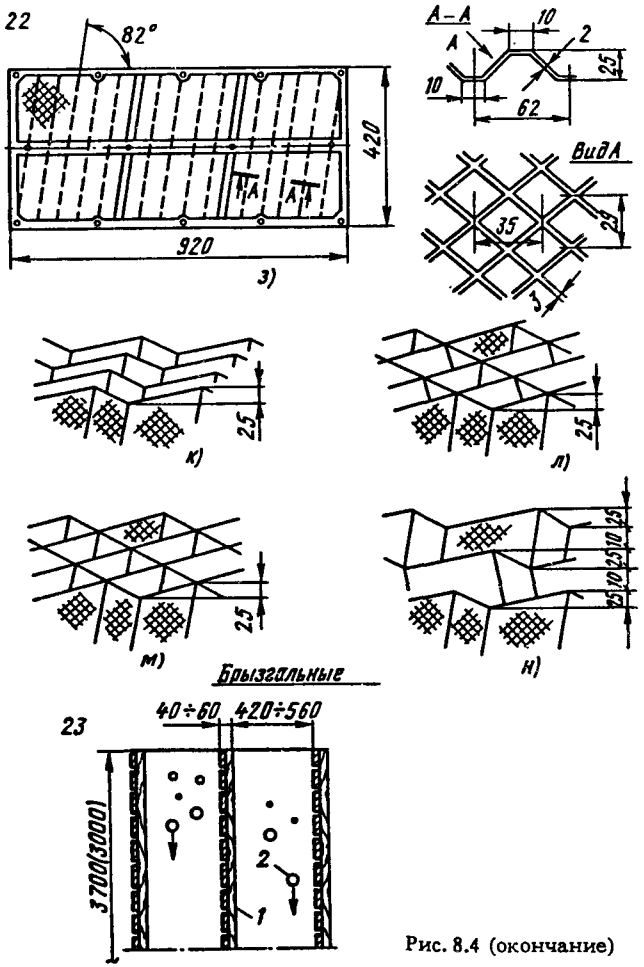


Рис. 8.4 (окончание)

Пример 8.1. Заданы характеристики оросителей пленочного ЛОАТЭП ($h_л$ = 2,4 м) и капельно-пленочного ПР50 ($h_п$ = 1 м) типов (табл. 8.3, № *2* и *16*)

$A_л$ = 0,479 1/м; $m_л$ = 0,66; $\zeta_л$ = 4,3 1/м;

$K_{ор.л}$ = 0,37; $P_{ор.л}$ = 371 кг/м³;

$A_п$ = 0,971 1/м; $m_п$ = 0,36; $\zeta_п$ = 11,44 1/м;

$K_{ор.п}$ = 0,393; $P_{ор.п}$ = 34 кг/м³.

Требуется определить характеристики комбинированного оросителя высотой $h_к$ = 1,7 м, состоящего из двух частей (рис. 8.4, № *8*):

ЛОАТЭП высотой $h_{л.к}$ = 1,2 м и ПР50 высотой $h_{п.к}$ = 0,5 м.

Решение. 1) По формуле (8.11) определяем значения $A_л$ и $A_п$ при полной высоте оросителя 1,7 м:

$$A'_л = A_л\sqrt{h_л/h_к} = 0{,}479\sqrt{2{,}4/1{,}7} = 0{,}569 \text{ 1/м};$$

$$A'_п = A_п\sqrt{h_o/h_к} = 0{,}971\sqrt{1/1{,}7} = 0{,}745 \text{ 1/м}.$$

2) Определяем значение $A_к$ комбинированного оросителя:

$$A_к = \frac{h_{л.к}A'_л + h_{п.к}A'_п}{h_к} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}569 + 0{,}5 \cdot 0{,}745}{1{,}7} = 0{,}621 \text{ 1/м}.$$

3) Аналогично п. 2 находим значения $m_к$, $\zeta_к$, $K_{ор.к}$ и $P_{ор.к}$ комбинированного оросителя:

$$m_к = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}66 + 0{,}5 \cdot 0{,}36}{1{,}7} = 0{,}57;$$

$$\zeta_к = \frac{1{,}2 \cdot 4{,}36 + 0{,}5 \cdot 11{,}44}{1{,}7} = 6{,}44 \text{ 1/м};$$

$$K_{ор.к} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}37 + 0{,}5 \cdot 0{,}393}{1{,}7} = 0{,}377;$$

$$P_{ор.к} = \frac{1{,}2 \cdot 371 + 0{,}5 \cdot 34}{1{,}7} = 272 \text{ кг/м}^3.$$

Охлаждающая способность некоторых видов градирен с различными типами оросителей приведена в табл. 8.4. Как видно из таблицы, практически одинаковую охлаждающую способность при равных гидравлических нагрузках, скорости воздуха, температуре нагретой воды и метеорологических факторах имеют оросители высотой БОС ПНД-1-2 – 0,84 м; ПР50 – 1,05 м; "Бальке-Дюрр" – 1,29 м; ТПВВ – 1,4 м; трубчатый ϕ 44 – 1,84 м; ЛОАТЭП – 2,4 м и деревянный – 3,09 м. Чем меньше требующаяся высота оросителя, тем выше его охлаждающая способность.

Из рассмотренных в табл. 8.4 пластмассовых оросителей наилучшей охлаждающей способностью при одинаковых условиях по параметру $t_2 - \tau$ обладают: ПР50-Д, комбинированный ЛОАТЭП + ТПВВ, БОС ПНД-1-2, ПР50 и ТПВВ. Уступают им по этому показателю на 1,5–3 °С оросители "Бальке-Дюрр", трубча-

Таблица 8.4. **Охлаждающая способность некоторых видов градирен с различными типами оросителей ($P_б$ = 745 мм рт. ст.)**

Тип оросителя, его номер на рис. 8.4	h, м	$q_ж$, м³/(м² · ч)	λ, кг/кг	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	$t_2 - \tau$, °С
Секционная градирня с площадью орошения секции 64 м², ω = 2,45 м/с, ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57%							
ПР50-Д, *17*	1	8,5	1,21	40	25,7	14,3	6,7
Секционная градирня с площадью орошения секции 144 м², ω = 2 м/с, ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57%							
ПР50, *16*	1,3	7	1,2	35	25,6	9,4	6,6
ТПВВ, *3*	1,4	7	1,2	35	26,1	8,9	7,1
"Бальке-Дюрр", *15*	1,35	7	1,2	35	26,3	8,7	7,3
БОС ПНД-1-2, *22*	0,84	7	1,2	35	26,3	8,7	7,3
ТР60, *14*	1,5	7	1,2	35	27,1	7,9	8,1
Трубчатый ϕ 44, *12*	1,3	7	1,2	35	27,7	7,3	8,7
Р500, *18*	1	7	1,2	35	28,1	6,9	9,1
Брызгальный (без воздухонаправляющих щитов)	2,4	7	1,2	35	31,1	3,9	12,1
Секционная градирня с площадью орошения секции 192 м², ω = 1,6 м/с, ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57%							
БОП ПНД, *21*	2	8	0,84	35	26,5	8,5	7,5
ПР50, *16*	1,3	8	0,84	35	27	8	8
ТПВВ, *3*	1,4	8	0,84	35	27,5	7,5	8,5
"Бальке-Дюрр", *15*	1,35	8	0,84	35	27,8	7,2	8,8
Трубчатый ϕ 44, *12*	1,3	8	0,84	35	29,1	5,9	10,1
Отдельностоящая градирня типа СК-400 с площадью орошения 380 м², ω = 2,08 м/с, ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57%							
ПР50, *16*	1,05	8	1,09	35	26,5	8,5	7,5
"Бальке-Дюрр", *15*	1,29	8	1,09	35	26,5	8,5	7,5
ТПВВ, *3*	1,4	8	1,09	35	26,5	8,5	7,5
Трубчатый ϕ 44, *12*	1,84	8	1,09	35	26,5	8,5	7,5
Деревянный, *11*	3,09	8	1,09	35	26,5	8,5	7,5
Башенная градирня с площадью орошения 1600 м². Высота градирни 53,7 м, ω = 0,75 м/с, ϑ = 26,8 °С, τ = 18,4 °С, φ = 41%							
ПР50-Д, *17*	1	7	0,45	38	28	10	9,6
Высота градирни 53,7 м, ω = 0,96 ÷ 1 м/с, ϑ = 24,6 °С, τ = 18,2 °С, φ = 51%							
ЛОАТЭП, *2*	2,4	6,84	0,61	41	29,1	11,9	10,9
ПР50, *16*	1	6,84	0,6	41	29,3	11,7	11,1

Тип оросителя, его номер на рис. 8.4	h, м	$q_ж$, м³/(м² · ч)	λ, кг/кг	t_1, °С	t_2, °С	Δt, °С	$t_2 - \tau$, °С
"Бальке-Дюрр", *15*	0,9	6,84	0,6	41	30,5	10,5	12,3
Трубчатый ϕ 44, *12*	1,4	6,84	0,59	41	30,7	10,3	12,5
ТР60, *14*	1,25	6,84	0,55	41	30,9	10,1	12,7
Высота градирни 53,7 м, ω = 1,44 м/с, ϑ = −10 °С, τ = −10 °С, φ = 100%*							
ПР50-Д, *17*	1	7	0,87	38	18	20	–
Высота градирни 62 м, ω = 0,97 ÷ 1,07 м/с, ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57 %							
ПР50-Д, *17*	1	6,9	0,61	43	27,6	15,4	8,6
То же	1	8,9	0,51	43	29	14	10
"Бальке-Дюрр", *15*	1,35	6,9	0,59	43	30,8	12,2	11,8
То же	0,9	6,9	0,6	43	31,9	11,1	12,5
Брызгальный	2,4	6,9	0,56	43	35,6	7,4	16,6
Башенная градирня с площадью орошения 3200 м², высота градирни 81 м, ω = 1,28 ÷ 1,42 м/с, ϑ = 24,5 °С, τ = 19 °С, φ = 57 %							
Комбинированный, *6*	1,9	10	0,6	43	29,5	13,5	10,5
ПР50, *16*	1	10	0,58	43	30,2	12,8	11,2
ЛОАТЭП, *2*	2,4	10	0,58	43	30,3	12,7	11,3
ТПВВ, *3*	1,4	10	0,55	43	30,4	12,6	11,4
Трубчатый ϕ 44, *12*	1,4	10	0,56	43	32,1	10,9	13,1
"Бальке-Дюрр", *15*	0,9	10	0,56	43	32,3	10,7	13,3
Брызгальный	2,4	10	0,54	43	35,6	7,4	16,6

* При открытых жалюзийных решетках в воздуховходных окнах.

тый ϕ 44 и ТР60. Оросители же в виде рулонов из сеток и брызгальные градирни (без оросителей) имеют недостаточную охлаждающую способность при обычно применяемых гидравлических нагрузках градирен.

При выборе оросителей следует учитывать их технологические особенности. Охлаждающая способность градирни при одинаковых параметрах воды и атмосферного воздуха тем выше, чем больше значение произведения $A \cdot h$ оросителя. При равенстве этого параметра в градирнях с малым относительным

расходом воздуха ($\lambda = G_в/G_ж < 1$), что характерно для башенных градирен, предпочтительнее применять оросители и с меньшим значением показателя степени m при λ. Когда $\lambda > 1$ эффективнее по охлаждающей способности оказываются оросители с более высокими значениями m. При $\lambda = 1$ параметр m не влияет на охлаждение воды.

Следует учитывать также, что по сравнению с трубчатыми и листовыми оросителями решетчатые конструкции требуют меньшего количества материала на изготовление. Они допускают и бóльшую неравномерность распределения воды по верху оросителя, которая, как правило, имеет место в практических условиях эксплуатации градирен, поскольку поток воды при движении сверху вниз в их объемной решетчатой структуре имеет возможность свободного перераспределения. При этом поверхность охлаждения, состоящая из пленок, стекающих по перемычкам решеток, и капель, срывающихся с них и падающих вниз при многократном дроблении, непрерывно обновляется и турбулизируется потоком воздуха, что интенсифицирует процесс испарения (охлаждения) воды. Трубчатые оросители, как и листовые, при высоте 0,7–1,5 м требуют равномерного распределения воды в градирне, поскольку возможность ее перераспределения в объеме имеется только в пространстве между трубами и листами. В трубах, занимающих около 50% активного объема градирни, возможность такого перераспределения отсутствует. При расходе воды, например 10 400 м³/ч, для градирни площадью 1520 м² при равномерном орошении на площадь, занимаемую каждой трубкой ϕ 44–63 мм, должно попасть 0,01–0,02 м³/ч воды. При несоблюдении этого условия некоторая часть активного объема трубчатого оросителя может вообще не участвовать в процессе охлаждения воды. Целесообразно блоки трубчатых оросителей изготавливать малой высоты (250–300 мм) и устанавливать в градирне с разрывами в вертикальной плоскости.

8.2. Водоуловители

Работающая градирня выбрасывает в атмосферу воздух, насыщенный водяными парами и содержащий капельки воды размером 100–500 мкм. Значение капельного уноса регламентируется СНиПом. Она определяется так же, как потеря воды вследствие уноса ветром (что для градирен неточно) в процентах от расхода охлаждаемой воды. Значение допускаемого СНиПом уноса зависит от вида охладителя и состава загрязнений оборотной воды (см. табл. 9.1). Фактическая эффективность водоуловителей согласно опубликованным отечественным и зарубежным данным колеблется в пределах 0,001–0,5%, по сообщениям из Японии это значение для поперечноточных градирен с водораспределением без разбрызгивания составляет 0,0001%. Такое разнообразие оценок значения уноса может быть объяснено различием не только условий, в которых работают водоуловители (скорость воздуха, расход воды, конструкция и размеры водоуловителя и градирни), но и методов измерений капельного уноса.

При сопоставлении технологических характеристик различных водоуловителей следует обязательно обращать внимание на условия и методику испытаний сравниваемых конструкций. Эти требования объясняются многообразием существующих на сегодня методик и приборов для испытаний водоуловителей, а также большим влиянием на результаты таких факторов, как качество монтажа водоуловителей, скорость движения воздуха, конструкции водораспределителя и оросителя, размеры капель, плотность орошения.

По этим причинам, например, фирма "Евро-Мунтерс" (Германия) в каталогах своих водоуловителей (1990 г.) специально оговаривает, что приведенные в них данные получены для противоточных градирен в лабораторных условиях на оборудовании фирмы при идеальной установке образцов. Указывается скорость движения воздуха (3 и 3,5 м/с) и плотность орошения [15 и 22 м³/(м² · ч)] для каждого типа водоуловителей.

Чтобы в натурных условиях получить такие же высокие показатели водоулавливания (0,007 и 0,001%), как и при лабораторных испытаниях, фирма считает необходимым соблюдение следующих основных требований:

тщательная расстановка блоков водоуловителя так, чтобы не было сквозных щелей между блоками и стенками градирни, а также самими блоками;

вертикальная составляющая скорости движения воздуха не должна превосходить максимально допустимое значение ни в одной точке водоуловителя по всему сечению градирни;

все измерения характеристик водоуловителя должны производиться непосредственно над водоуловителем по методике фирмы или согласованной с ней;

монтаж и сборка профильных (жалюзийных) водоуловителей должны осуществляться по инструкции.

В течение 30 лет НИИ ВОДГЕО занимается исследованием и разработкой конструкций водоуловителей. Вначале измерения водоулавливающей способности производились объемным способом, однако этот способ при испытаниях полномасштабных образцов водоуловителей требует больших затрат времени и обеспечивает погрешность имерений лишь до 0,01%, что в настоящее время не всегда достаточно. Поэтому были разработаны и задействованы специальная опытная установка и методика, обеспечивающая необходимую точность результатов (0,001%) в соответствии с уровнем современных мировых требований. По этой методике измерение количества уносимой через водоуловитель в виде капель воды производится кондуктометрическим прибором, разработанным в НИИ ВОДГЕО. В этом приборе капли воды из воздушного потока, прошедшего через водоуловитель, осаждаются на электропроводную бумагу, способную изменять свое электрическое сопротивление пропорционально количеству осевшей на нее влаги. С помощью прибора НИИ ВОДГЕО можно в течение короткого времени (около 30 с) с достаточной точностью определить унос воды в любой точке над водоуловителем в широких диапазонах скорости воздуха и плотности орошения и таким образом снять поле концентраций капель воды в воздухе, подробно исследовать распределение уноса над водоуловителем и оценить эффективность самого водоуловителя.

Все известные конструкции водоуловителей работают по одному принципу – осаждение летящих вверх капелек воды на препятствии за счет инерции при отклонении воздушного потока для огибания этого препятствия. В качестве препятствия используются деревянные, асбестоцементные или пластмассовые дощечки, планки, лопатки, соты (каналы) различной конфигурации, располагаемые в 1–3 ряда, а также волокна сеток. Различные типы водоуловителей отличаются друг от друга не только материалом, но и формой указанных элементов (препятствий) и их расположением.

В НИИ ВОДГЕО за период с 1964 г. исследованы и разработаны десятки разнообразных конструкций водоуловителей из дерева, металла, асбестоцемента, стеклопластика, полимерных материалов. Наиболее эффективные из них рекомендовались к применению.

Долгое время основным типом водоуловителей, использовавшихся в отечественных градирнях, были деревянные жалюзийные. Однако они удовлетворяют предъявляемым требованиям только при качественном изготовлении и монтаже; нуждаются в специальной раскладке блоков и постоянном надзоре за состоянием конструкций в процессе эксплуатации, поскольку в условиях работы градирен быстро разрушаются и теряют оптическую плотность, что приводит к резкому увеличению уноса капель. Кроме того, дерево становится все более дефицитным и дорогостоящим материалом и требует специальной обработки против гниения. Поэтому все большее внимание уделяется разработке и освоению водоуловителей из полимерных материалов. Как конструкционный материал пластмассы позволяют значительно усовершенствовать конфигурацию водоуловителей и снизить их массу, но требуют при этом высокой технологичности изготовления. Несоблюдение этого требования не позволяет внедрить в промышленность даже самую эффективную конструкцию пластмассового водоуловителя.

В то же время в угоду технологичности нельзя поступаться требованиями, которым должен отвечать водоуловитель как элемент, соответствующий своему назначению в работе градирни. Конфигурация водоуловителя во многом определяет характер потока воздуха на входе в конфузор и подходе к вентилятору. Конструкция и расположение лопаток и решеток водоуловителя должны обеспечивать направление потока воздуха вертикально вверх к вентилятору, выполняя в этом случае функцию направляющего аппарата. При этом аэродинамическое сопротивление лучших образцов известных зарубежных водоуловителей (см. выше) не превосходит 2,5–3 скоростных напора. Водоулавливающая способность водоуловителей существенно зависит от скорости воздуха ω перед ним и плотности орошения $q_ж$.

Эта зависимость может быть представлена в виде

$$q_{ун} = 3{,}44 \cdot 10^{-5}\, q_{ун.т}\, q_ж^x \omega^y, \qquad (8.12)$$

или, принимая для упрощения $x = y$, что не всегда достаточно правомерно,

$$q_{ун} = q_{ун.т}\left(\frac{q_ж \omega}{14{,}57}\right)^y, \qquad (8.13)$$

где $q_{ун.т}$ – табличные значения $q_{ун}$ при ω = 2,35 м/с и $q_ж$ = = 6,2 м^3/(м^2 · ч).

При накоплении и анализе данных выяснилось, что значения x и y сильно разнятся для различных конструкций водоуловителей, что легко объяснить большим разнообразием струкур потоков воздуха, а также значений и форм площадей для осаждения и задержания капелек. В то же время диапазон скоростей воздуха, в котором работают водоуловители градирен, невелик: в вентиляторных градирнях он равен 2–3 м/с, причем в типовых не превышает 2,5 м/с; в малогабаритных достигает 4 м/с; в башенных – обычно 0,7–1,3 м/с. Вместе с тем конструкции водоуловителей не являются универсальными для всех скоростей и условий работы. Так, жалюзийные двухрядные водоуловители обычно малоэффективны при скоростях воздуха свыше 2,5 м/с и в скошенных его потоках.

Аналогичным образом это относится и к аэродинамическому сопротивлению водоуловителей. Что касается плотности орошения, то на значение капельного уноса преобладающее влияние оказывает гранулометрический (дисперсный) состав капель, находящийся в потоке воздуха, а не плотность орошения.

Поэтому рациональнее производить испытания водоуловителей в зависимости от их назначения не менее чем при трех скоростях воздуха и достаточно строгом гидравлическом режиме в части дисперсности и расхода капельного потока, и этими данными пользоваться при расчетах капельного уноса.

Изложенные принципы и закладываются при составлении характеристик современных пластмассовых водоуловителей. На рис. 8.5 показаны схемы пластмассовых водоуловителей, изготавливаемых в настоящее время в нашей стране. НИИ ВОДГЕО принимал участие в той или иной степени в разработке этих водоуловителей и провел их технологические испытания. Все они обладают водоулавливающей способностью, отвечающей требованиям СНиП (табл. 8.5).

Водоуловитель с криволинейным очертанием лопаток (полуволн) изготавливается из жесткого поливинилхлорида. Пластины-лопатки поставляются потребителям преимущественно в связанных пакетах по 10–20 штук в комплекте с монтажными и дистанционными трубками. Сборка пластин в блоки водоуловителя производится на месте монтажа градирни в соответствии с конструкторской документацией. Возможна поставка

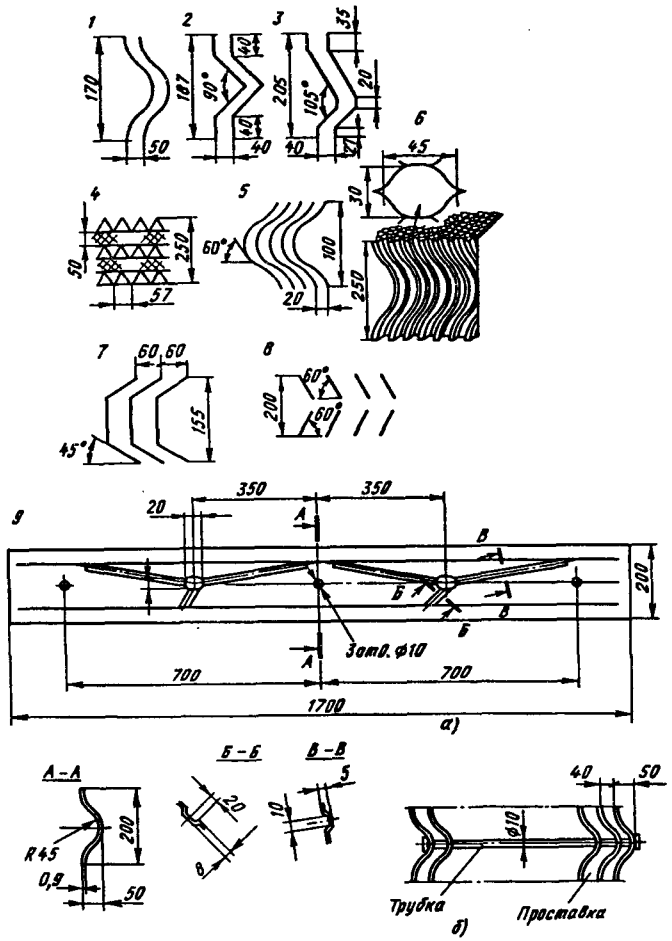


Рис. 8.5. Схемы пластмассовых водоуловителей:
а – пластина водоуловителя ВОЖ-1; *б* – схема сборки пластин ВОЖ-1 в блок БВОЖ-1

водоуловителя готовыми блоками, имеющими габариты, указанные потребителем.

Водоуловитель уголковый разработан АОЗТ "ИЦ ВНИИГ". Высота каплеулавливающей пластины (уголка) равна 187 мм, длина – 1,6 м. Изготавливается он из ПВХ и стеклопластика.

Трапециевидный водоуловитель состоит из профилированных пластин, соединенных в блоки при помощи полимерных трубок

Таблица 8.5. **Технологические характеристики пластмассовых водоуловителей**

Номер на рис. 8.5	Водоуловитель	ω, м/с	$q_{ун}$, %	$\zeta_{ву}$	ΔP, мм вод. ст.
1	С криволинейным очертанием лопаток (полуволна), ПВХ	1	0,003	5,1	0,3
		1,5	0,003	4	0,5
		2,35	0,004	3	1
2	Уголковый, ПВХ	1	0,003	5,1	0,3
		2,35	0,006	4,2	1,4
3	Трапециевидный, типа ВПД-40/205	1	0,001	6,5	0,4
		2,35	0,003	5,2	1,7
4	Решетчатый из элементов ПР50 (5 слоев), ПНД	1	0,003	2,3	0,1
		1,5	0,001	2,6	0,3
		2,35	0,004	2,9	0,9
5	Ячеистый из винипластовой калаидрированной пленки	2,35	0,002	2,1	0,8
6	Сотовый из стеклоткани	1	0,001	7,8	0,5
		2,35	0,002	9,7	3,3
7	Из профилированных полиэтиленовых пластин	2,35	0,03	15,7 (11*)	5,3
8	Жалюзийный двухрядный из стеклопластиковых пластин	1	0,015	1,3	0,1
		2,35	0,022	1,7	0,6
9	Полуволна с водоотводящими канавками (БВОЖ-1), ПВХ, ЭКО-сервис К	1	0,001	6,5	0,4
		1,5	0,002	5,8	0,8
		2	0,003	5,3	1,3
		2,35	0,003	4,9	1,6
		3	0,006	4,7	2,6

* При мелких вертикальных гофрах на пластинах.

и дистанционных гильз между пластинами. Пластины изготавливаются из стабилизированного ПНД (заводом "АНД ГАЗТРУБПЛАСТ") или пластифицированного ПВХ.

Рабочие элементы ячеистого водоуловителя имеют в вертикальном сечении высотой 160 мм криволинейное очертание, по форме близкое к волне, а в плане (по длине) вид извилистой линии с чередующимися плоскими вершинами и впадинами длиной по 50 мм. Такая форма рабочих элементов позволяет при стыковке вершин со впадинами смежных элементов создать ячеистую конструкцию водоуловителя. Для придания выходящему из водоуловителя потоку воздуха вертикального направления и удобства монтажа рабочие элементы имеют сверху и снизу плоские участки (отгибы).

Рабочие элементы ячеистого водоуловителя изготавливают из винипластовой каландрированной пленки толщиной 0,4–1,1 мм марки КПО. Эта пленка применяется как антикоррозионный материал, стойкий к кислотам и щелочам, для изготовления изделий технического назначения. Материал не горит и не поддерживает горения. Температурный диапазон эксплуатации пленки от –50 до +60 °С. Скрепление рабочих элементов водоуловителя между собой и сборка их в блоки производится при помощи фиксирующих элементов – пластмассовых трубок, развальцованных по концам. Фиксирующий элемент – трубка толстостенная ϕ10–20 мм из ПВХ. Материал трубок не горит при отсутствии инициирующего пламени и предназначен для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах. Температурный диапазон их эксплуатации от –50 до +60 °С. Материалы, из которых изготовлен водоуловитель, в условиях монтажа и эксплуатации не выделяют в окружающую среду токсичных веществ и не оказывают вредного воздействия на организм человека.

Весьма перспективны водоуловители сотовой конструкции. Они могут быть изготовлены из стеклоткани ПНД или ВПХ в виде монолитных блоков размерами 1,5 × 1 × 0,25 м с каналами прямолинейного очертания в вертикальной плоскости. При виде сверху водоуловитель представляет собой шестигранные соты.

Решетчатый водоуловитель собирается из трех–пяти слоев призм ПР50 (пат. 2004993, РФ, кл. 6F 28F 25/08, 1993 г.). Из ПР50 могут быть собраны водоуловители различной высоты для обеспечения требуемой степени водоулавливания. Сборка водоуловителей осуществляется простой укладкой элементов ПР50 на несущие балки при повороте каждого последующего ряда элементов на 90° по отношению к предыдущему. Это особенно удобно для малых градирен с площадью орошения до 64 м². Для установки в больших градирнях водоуловитель из ПР50 может быть скомпанован в виде блока необходимых размеров. Водоуловитель применяется преимущественно в сочетании с оросителем из таких же призм ПР50.

Призмы ПР50 изготавливаются ООО "НПФ Техэкопром" из стабилизированного сажей полиэтилена низкого давления на

базе марки 273-79. Этот материал не изменяет свои физико-механические свойства при эксплуатации градирен в зимний период с температурой наружного воздуха до –60 °С и в летний период при температуре воздуха в градирне до 50 °С.

Водоуловители из профилированных полиэтиленовых пластин изготавливают в виде блоков. Пластины выполнены в виде равносторонней трапеции в поперечном сечении с вертикальными гофрами. Размеры блока равны 1 × 1,6.

Отличительной особенностью водоуловителя *9* в табл. 8.5 является наличие на поверхности пластин водоотводящих канавок для сбора и отвода капельной влаги, осевшей на поверхности пластин, что приводит к повышению его водоулавливающей способности в сравнении с водоуловителем *1*.

В табл. 8.6 приведены технико-экономические показатели водоуловителей из различных материалов наиболее характерных типов из числа применяемых у нас в стране и за рубежом. Принципиальные схемы их показаны на рис. 8.6. Конструкции *1* и *2* (табл. 8.6 и рис. 8.6) широко распространены в нашей стране и за рубежом.

Конструкция *3* представляет собой два слоя оросителя из поливинилхлорида, поставленные один на другой со сдвигом на 1 лист, чтобы организовать поворот потока, идущего вдоль ложбин волн. Высота каждого слоя 125 мм. Таким образом, высота этого водоуловителя составляет 250 мм. Использование конструкций пластмассового оросителя в роли водоуловителя находит достаточно широкое применение. Конструкция водоуловителя из листов ПВХ с длиной волны 60 мм и высотой 15 мм была изготовлена и испытана в НИИ ВОДГЕО.

Конструкция *4* представляет собой ячеистый водоуловитель из пористого шероховатого ударопрочного полистирола (ПШУПС). Он обеспечивает значение уноса капель при скоростях движения воздуха 2,5 и 3,2 м/с менее 0,001% при $\zeta_{ву} = 4,1$.

Сотовый водоуловитель *5* по водоулавливающей способности соответствует уровню жалюзийного деревянного водоуловителя при $d = 50$ мм (*1*) и асбестоцементного из волнистых листов (*2*), что можно вполне считать удовлетворительным. Однако по сравнению с ячеистыми водоуловителями (*3* и *4*) показатель по носу у него хуже в 1,5–2 раза, а аэродинамическое сопротивление в 2–3 раза выше.

Ячеисто-жалюзийный водоуловитель *6*, собираемый из листов с V-образными турбулизаторами, имеет хорошую водоулав-

Таблица 8.6. **Технико-экономические характеристики водоуловителей различных конструкций**

Номер на рис. 8.6	Тип и конструкция	Материал	Значение уноса капель из градирни, $q_{ун}$ кг/(м² · ч)	г/м³	Отношение уноса к расходу воды $q_{ун}/q_ж$, %	Сопротивление водоуловителя $H_{ст} \cdot 10^{-3}$, м	$\zeta_{ву}$	Максимально допустимая скорость ω, м/с	Поверхностная плотность (без деталей крепления), кг/м²
1	Жалюзийный двухрядный: $\alpha = 60°$; $d = 70$ мм	Дерево	0,71	0,078	0,011	1,8	4,7	2,5	22
	$\alpha = 60°$; $d = 50$ мм	–"–	0,2	0,022	0,003	2,3	6,0	2,5	30
2	Волнистый	Асбестоцемент	0,16	0,018	0,0026	1,2	3,14	2,5	63
3	Ячеистый	ПВХ	0,114	0,013	0,0018	1,6	4,34	3,5	11
4	Ячеистый $R = S$	ПШУПС	0,072	0,008	0,0013	1,5	4,1	4,5	15
5	Сотовый	ПВХ	0,194	0,023	0,003	4,2	12,82	3,5	4
6	Ячеисто-жалюзийный	–"–	0,087	0,01	0,0014	2,1	6,43	3,5	5
7	Профильный DV130ME	–"–	–	0,08	0,007	–	2,15	3,5	10
8	Ячеистый DV150ME	–"–	–	0,015	0,001	–	2,2	4,5	7

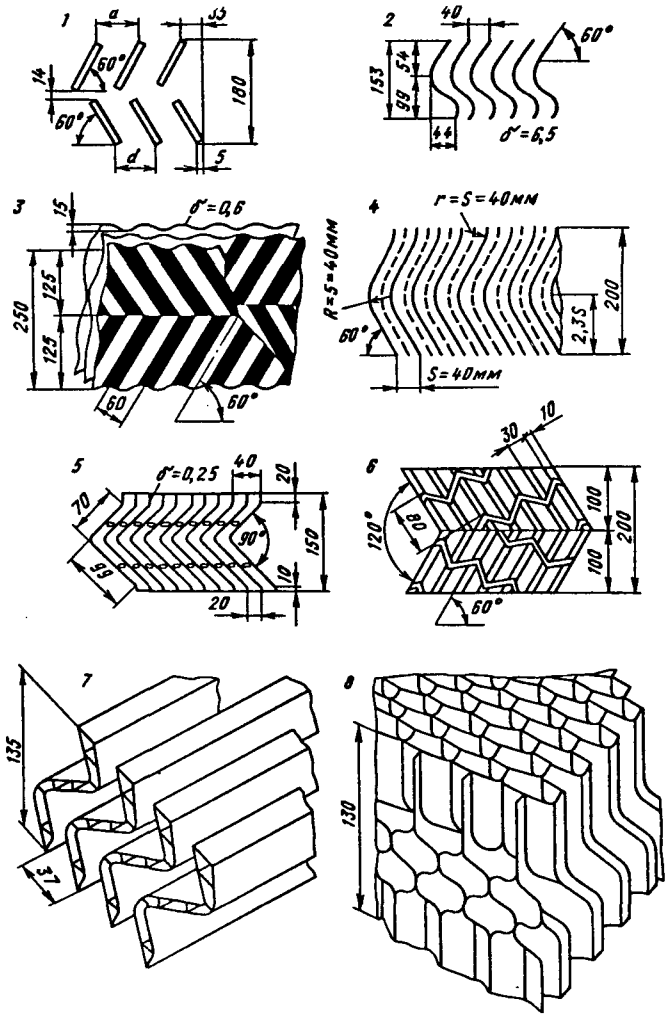


Рис. 8.6. Принципиальные схемы водоуловителей

ливающую способность и аэродинамическое сопротивление его в 2 раза меньше, чем у водоуловителя *5*. Уменьшение $\zeta_{ву}$ объясняется, по-видимому, прежде всего тем, что у водоуловителя *6* центральный угол поворота равен 120°, а не 90°, как в конструкции *5*.

Водоуловители конструкции *7* и *8*, применяемые в зарубежной практике, обладают высокой водоулавливающей способностью и предназначены для работы в градирнях с повышенными скоростями воздуха. Их характеристики приняты по каталогу фирмы Мунтерс (Евроформ).

Характеристики водоуловителей *1–6* (табл. 8.6) приведены для следующих условий: плотность орошения $q_ж$ = 6200 кг/(м² × × ч); скорость движения воздуха перед уловителями 2,3 м/с; напор воды перед соплами H = 4 м; водоуловители располагались на трубах водораспределительной системы; расстояние от водораспределителя до оросителя составляло 0,8 м; сопла обращены факелами вниз. В таблице приведены два распространенных способа оценки капельного уноса из градирни: в килограммах с 1 м² площади градирни в плане за час, кг/(м² · ч), и в граммах в 1 м³ воздуха, г/м³. Оценка эффективности работы (водоулавливающей способности) водоуловителей произведена по отношению значений уноса капель и расхода воды $q_{ун}/q_ж$ (как в СНиП 2.04.02–84). Коэффициент сопротивления отнесен к скорости движения воздуха в свободном сечении градирни перед водоуловителем.

При выборе водоуловителя в конкретном случае необходимо учитывать, что каждому из них присущи свои достоинства и недостатки. Они различаются материалом, схемой сборки блоков и механической прочностью, а также значением аэродинамического сопротивления проходу воздуха.

8.3. Водораспределительные устройства

Водораспределительное устройство является технологическим элементом градирни, во многом определяющим ее эффективную и надежную работу. Оно должно обеспечивать равномерное распределение воды по оросителю при небольших энергозатратах, не создавая ощутимых препятствий проходу и распределению потока воздуха. В брызгальных и эжекторных градирнях параметры водораспределительного устройства в значительной мере определяют степень охлаждения воды.

Диапазон размеров капель и пленок воды, создаваемых водораспределителем, должен, с одной стороны, способствовать уменьшению капельного уноса из градирни, а с другой – не допускать образования водяных струй в оросителе. С этих позиций опимальный размер капель составляет 2–3 мм в диаметре. В то же время в эжекторных градирнях основным требованием является обеспечение большой площади поверхности тепло-

обмена в капельном потоке, что приводит к существенному уменьшению размеров капель и соответственно к увеличению уноса. Такое требование может быть удовлетворено только специальной конструкцией сопел при давлении более 200 кПа. Такие сопла не будем рассматривать. В некоторых случаях (в основном в брызгальных градирнях) конструкция и материал водораспределителя должны быть рассчитаны на пропуск воды с большим содержанием взвешенных веществ. Исследованиями и разработкой водораспределительных устройств уже давно занимаются в нашей стране и за рубежом.

Водораспределительные устройства градирен можно разделить на три основные группы: разбрызгивающие, без разбрызгивания и подвижные. Разбрызгивающие водораспределительные устройства, в свою очередь, подразделяются на безнапорные, представляющие собой системы открытых желобов и лотков, и напорные, выполняемые из закрытых желобов или труб с соплами или разбрызгивателями, к которым вода подводится с бóльшим или меньшим напором. В промышленных вентиляторных противоточных градирнях в нашей стране в последнее время применяются, как правило, разбрызгивающие напорные водораспределительные устройства, представляющие собой систему стальных трубопроводов, оборудованных пластмассовыми соплами различных видов и конструкций.

Трубчатые системы распределения воды градирен относятся к системам большого сопротивления, в которых разбрызгивающие сопла располагаются с постоянным шагом (обычно 0,5–1 м). Равномерность распределения воды в таких системах достигается за счет существенно большего сопротивления проходу воды в соплах, чем изменение пьезометрического напора в трубопроводе за счет потерь на трение и восстановление скоростного напора при изменении скорости движения воды.

Методы расчета трубчатых систем распределения воды основаны на общеизвестных законах гидравлики при движении жидкости по трубопроводу с переменной массой. Расчет напорных водораспределительных систем заключается в определении таких диаметров труб и скорости движения воды в них, при которых обеспечиваются примерно одинаковые напоры воды перед соплами и не происходит засорение труб взвешенными частицами.

Водоразбрызгивающие сопла. Современные требования к разбрызгивающим соплам градирен в части экономии энергозатрат и равномерности распределения воды по оросителю могут быть сформированы следующим образом: они должны обеспечивать развитый факел разбрызгивания воды с радиусом 1,5–2 м при 5–30 кПа и не подвергаться засорению при концентрации взвешенных веществ в оборотной воде около 100–150 мг/л в присутствии механических включений (окалины, продуктов коррозии стали и т. п.).

По принципу действия сопла разделяются на центробежные, струйно-винтовые и ударные. Большое разнообразие сопел обусловлено, с одной стороны, поиском конструкции, которая при малом напоре воды и достаточной производительности обеспечивала бы требуемые гидравлические характеристики, а с другой – стремлением каждой фирмы иметь свою конструкцию сопла, чтобы изготавливать все элементы градирен на собственном производстве и по патентным соображениям.

Сопла ранее изготовлялись, в основном, литыми из чугуна или цветного металла. За последние 30 лет в нашей стране и за рубежом для изготовления сопел стали применять пластмассу – полиэтилен, полистирол и др.

Сопла из пластмасс не подвергаются коррозии в условиях работы градирен, проще и дешевле в изготовлении и имеют меньшую шероховатость внутренней поверхности, что при прочих равных условиях увеличивает их пропускную способность. Пластмассовые сопла обладают также более устойчивыми гидравлическими характеристиками.

При проектировании водораспределительных систем градирен сопла подбирают с учетом их пропускной способности, габаритов факелов разбрызгивания при располагаемом напоре воды и степени загрязненности оборотной воды. Во всех случаях расположение сопел на трубах водораспределительной системы должно обеспечивать равномерное распределение воды по площади оросителя.

На работу центробежных сопел влияют, в основном, значение смещения оси входного канала относительно оси камеры закручивания $R_{вх}$, диаметр $d_к$ и высота $h_к$ камеры, а также площадь входного канала $f_{вх}$ и радиус выходного отверстия $r_о$. Геометрические размеры сопел центробежного типа объединяются обычно безразмерным коэффициентом $A_с$, называемым геометрической характеристикой сопла. Коэффициент $A_с$ определяется:

для тангенциальных сопел

$$A_с = R_{вх}\, r_о / f_{вх}; \qquad (8.14)$$

для сопел с винтовым вкладышем

$$A_c = R_{вх}\, r_0 \operatorname{Cos}\alpha / f_{вх}, \qquad (8.15)$$

где α – угол между направлением движения выходящей из вкладыша воды и нормалью к оси сопла.

Для низконапорных центробежных сопел, применяемых в градирнях, коэффициент A_c имеет малые значения (преимущественно от 0,1 до 0,4), но для некоторых конструкций, например, эвольвентного сопла с $D = 32/79$ ($d_к$ = 150 мм) $A_c \approx 3$. Габариты факелов разбрызгивания и размеры капель в факелах ударных сопел зависят от формы и конструкции отражателя, а также напора воды.

Эффективность работы сопел в градирне определяется их основными технологическими (гидравлическими) характеристиками, зависящими от заданного напора перед соплами: расхода воды через сопло, радиуса факела разбрызгивания, распределения воды в зоне факела.

Для всех типов сопел зависимость расхода от напора может быть получена с помощью уравнения Бернулли

$$\frac{\alpha_1 \omega_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 \omega_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + h_\omega, \qquad (8.16)$$

где ω_1, ω_2 – средние скорости потока в первом и втором сечениях, м/с; α_1, α_2 – коэффициенты кинематической энергии потока, учитывающие неравномерность распределения скоростей по его живому сечению (коэффициенты Кориолиса); g – ускорение свободного падения, м/с^2; P_1 и P_2 – статическое давление жидкости в первом и втором сечениях, Па (кгс/м^2); z_1, z_2 – геометрические высоты центров сечений над плоскостью отсчета (энергия положения), м; h_ω – потери напора (энергии) между первым и вторым сечениями, м.

Уравнение (8.16) выражает закон сохранения энергии потока реальной жидкости при его движении между первым и вторым сечениями. Под первым сечением подразумевается сечение подводящего трубопровода на некотором расстоянии перед соплом. В этом сечении измеряется напор перед соплом. За второе сечение принимается сечение струи на выходе (срезе) из сопла.

На участке между первым и вторым сечениями имеются только местные потери на вход в сопло и внутри сопла, т. е.

в сумме это потери напора в сопле:

$$h_\omega = \zeta_c (\omega_2^2 / 2g), \qquad (8.17)$$

где ζ_c – коэффициент гидравлического сопротивления сопла (насадка).

Очевидно, что ударные и струйные водораспределительные устройства с прямым проточным сечением имеют значительные энергетические преимущества перед центробежными, винтовыми и другими соплами, в которых различными препятствиями в виде направляющих, закручивающих и тому подобных устройств, создающих гидравлическое сопротивление, изменяется направление движения потока жидкости или ему придается вращение.

Из (8.16) и (8.17) получаем

$$\frac{\alpha_1 \omega_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + (z_1 - z_2) - \frac{P_2}{\rho g} =$$

$$= \frac{\alpha_2 \omega_2^2}{2g} + \zeta_c \frac{\omega_2^2}{2g}. \qquad (8.18)$$

Левая часть выражения представляет собой полный напор в мерном (первом) сечении перед соплом:

$$H_c = H_п = \frac{\alpha_1 \omega_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + (z_1 - z_2) - \frac{P_2}{\rho g}. \qquad (8.19)$$

Обычно принимают $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Коэффициент можно определить расчетом. Как правило, при турбулентном режиме движения потока в трубах α = 1,05 ÷ 1,1, но в некоторых случаях α может доходить до 4,57. При ламинарном движении жидкости в трубах α = 2. При обработке результатов стендовых испытаний принимали α = 1. Имевшее место фактическое отклонение α от единицы учитывалось величиной μ.

Из (8.16) и (8.19) путем известных преобразований и упрощений получаем расчетную зависимость для определения расхода при истечении жидкости через сопла (насадки):

$$q_c = 3600 \mu F_c \sqrt{2 g H_c}, \qquad (8.20)$$

где q_c – расход воды через сопло, м^3/ч; μ – коэффициент расхода;

F_c – площадь сечения сопла на выходе, м^2; H_c – полный напор с учетом скоростного напора при подходе потока к соплу и разности отметок точки измерения напора и выхода воды из сопла, м.

Коэффициент расхода (теоретически) характеризует использование энергии жидкости, поступающей в сопло, для создания скорости (кинетической энергии) струи, выходящей из сопла. При отсутствии гидравлических потерь он равен единице. Практический расчетный (общий) коэффициент расхода, получаемый из опытов (измерений), отличается от теоретического тем, что учитывает разность площадей выходного отверстия сопла и вытекающей из него струи, неравномерное распределение скоростей по сечению потока, условия размещения сопла на трубе и особенности методики измерений. Коэффициент расхода зависит от числа Рейнольдса, размера отверстия и напора.

При практических измерениях значение коэффициента расхода сопла может получиться и более единицы. Так, в некоторых таблицах коэффициентов расхода сопел приведены их значения до 1,18. При составлении гидравлических характеристик сопел используется усредненный в диапазоне рабочих напоров коэффициент расхода.

Большие исследовательские работы по водораспределительным системам градирен выполнены НИИ ВОДГЕО более чем за 30 лет. Эти работы обеспечили широкое внедрение пластмассовых сопел по типовым и индивидуальным проектам градирен.

В табл. 8.7, составленной по данным испытаний на стендах НИИ ВОДГЕО, приведены гидравлические характеристики основных типов пластмассовых сопел, применяющихся в настоящее время в градирнях. Радиус факела разбрызгивания $R_ф$ измерялся примерно на уровне оси трубы при направлении факела вверх и на расстоянии 0,8–1 м от выхода из сопла при направлении факела вниз. Значение радиуса факела в зависимости от характера его образования в различных направлениях может быть неодинаковым и изменяться на ± 10% от указанного в таблице. Высота факела $h_ф$ измерялась от оси сопла. Типы конструкций сопел, представленных в табл. 8.7, показаны на рис. 8.7.

Анализ данных табл. 8.7 в подтверждение имеющегося опыта проектирования и эксплуатации подчеркивает несколько

Таблица 8.7. **Гидравлические характеристики пластмассовых сопел**

Номер на рис. 8.7	Тип сопла и размеры (вход/выход*), мм	H_c, м	q_c, м^3/ч	Направление факела				μ (усредненное)
				вверх		вниз		
				$R_ф$, м	$h_ф$, м	$R_ф$, м		
	Центробежные сопла							
1	Тангенциальные, НИИ ВОДГЕО:							
	D = 20/12, $d_к$ = 26	3	1,46	2,5	1,8	0,75		–
		1,5–4	1,15–1,65	1,7–1,9	1–2,5	0,55–0,8		0,53
	D = 20/12, $d_к$ = 20	3	2,18	2	2,2	0,35		–
		1–4	1,11–2,57	0,5–2,4	0,7–2,8	0,2–0,35		0,7
	D = 32/16, $d_к$ = 32	3	3,5	2,8	1,9	0,62		–
		1,5–4	2,7–3,8	1,8–3,1	1,2–2,6	0,45–0,7		0,51
	D = 32/22, $d_к$ = 45	3	5,26	2,6	1,8	0,9		–
		1,5–4	3,9–6	1,9–3	2,5	0,75–0,95		0,5
2	Тангенциальное (эвольвентное) противообледенительное, D = 32/79, $d_к$ = 150	3	9,8	–	–	1,8		–
		1–4	5,2–11	–	–	1,5–1,9		0,13
3	Эвольвентное Э-25, АО "ИЦ ВНИИГ", $d_к$ = 150	3	8,1	2,3	1,7	0,6		–
		0,5–3	3,3–8,1	0,6–2,3	0,3–1,7	0,3–0,6		0,6
	Струйно-винтовые сопла							
4	Раструбное, НИИ ВОДГЕО, D = 50/25Р, d_o = 25	2	11	1,8	1,7	0,75		–
		1–2	7,8–11	1–1,8	0,95–1,7	0,55–0,75		0,96

Продолжение табл. 8.7

Номер на рис. 8.7	Тип сопла и размеры (вход/выход*), мм	H_c, м	q_c, м³/ч	Направление факела: вверх $R_ф$, м	вверх $h_ф$, м	вниз $R_ф$, м	μ (усредненное)
5	ККТ (Германия):						
	$D = 50/18$, $d_0 = 10$	2	4,1	–	–	0,6	–
		0,5–3	2,2–5,1	–	–	0,45–0,7	0,61
	$D = 50/23$, $d_0 = 12$	2	6	–	–	0,7	–
		0,5–3	3,4–7,6	–	–	0,6–0,7	0,64
6	Цельнофакельное, фирмы "Вайгач", $D = 50/40$, $d_0 = 15$	1,5	20,1	1,8	1,15	–	–
		0,5–1,5	12,1–20,1	0,85–1,8	0,35–1,15	–	0,82
7	Цельнофакельное, ВНИХИ, $D = 35/16$, $d_0 = 8$	2	2,5	–	–	0,9	–
		1–4	1,7–3,8	–	–	0,8–1,2	0,56
	Ударные сопла						
8	С зубчатым отражателем, НИИ ВОДГЕО, $D = 32$	1	7,5	1,9	0,3	–	–
		0,5–2	5,5–11,25	1,1–2,9	0,15–0,55	–	0,91
9	С коническим отражателем СКРС-24, $D = 24$	1	4,6	1,1	0,35	–	–
		0,5–2	2,9–6,3	0,55–2,2	0,2–0,65	–	0,62
10	Брикс-24, $D = 24$	1,5	6,4	1,5	0,15	–	–
		1–2,5	5–7,7	0,8–2,1	0,12–0,25	–	0,8
11	С чашечным отражателем, ЛОТЭП:						
	$D = 22$	1	4,96	1,1	0,4	–	–
		0,5–2,5	3,51–7,85	0,6–2,3	0,2–0,85	–	0,82
	$D = 24$	1	6	1,4	0,25	–	–
		0,5–2,5	3,6–9,4	0,8–3	0,15–0,6	–	0,82
	$D = 26$	1	6,8	1,2	0,2	–	–
		0,5–2,5	4,7–11	0,9–2,5	0,1–0,5	–	0,82
	$D = 28$	1	8	1,1	0,2	–	–
		0,5–2,5	5,6–12,8	0,6–2,2	0,1–0,4	–	0,82
12	Фирмы "Амон" (Франция), $D = 42/20$	1	4,7	–	–	1,8	–
		0,3–1	3–4,7	–	–	1,1–1,8	0,86
13	Фирмы "Бальке-Дюрр" (Германия):						
	$D = 45/34$	0,7	15,2	–	–	1,8	–
		0,3–0,7	12–15,2	–	–	1,5–1,8	0,94
	$D = 45/38$	0,5	16,2	–	–	1,8	–
		0,3–0,5	14–16,2	–	–	1,6–1,8	0,88
14	Сферозубчатое, НИИ ВОДГЕО и Энерго-композит:						
	$D = 24$	1	6	1,5	0,3	–	–
		0,5–2,5	4,2–9,3	0,9–3,1	0,1–0,6	–	0,82
	$D = 26$	1	6,9	1,4	0,25	–	–
		0,5–2,5	4,9–11	1–2,8	0,1–0,5	–	0,82
15	Многотарельчатое, "Химтехком":						
	пять тарелочек,	1	1,7	1,6	0,55	0,9	–
	$D = 19$	1–1,25	1,7–6,2	1,6–2,5	0,5–1,2	0,9–1,6	0,73
	шесть тарелочек,	1	8,5	1,7	0,7	1,3	–
	$D = 29,5$	1–1,5	8,5–11,5	1,7–2,3	0,7–1	1,3–1,9	0,82

Продолжение табл. 8.7

Номер на рис. 8.7	Тип сопла и размеры (вход/выход*), мм	H_c, м	q_c, м³/ч	Направление факела				μ (усредненное)
				вверх		вниз		
				$R_ф$, м	$h_ф$, м	$R_ф$, м		
16	Многотарельчатое, "Центурион":							
	три тарелочки,	1	2,2	1,1	0,3	–		–
	$D = 17$	1–3	2,2–5,9	1,1–2,7	0,3–0,6	–		0,82
	пять тарелочек,	1	3,4	1	0,45	–		–
	$D = 20$	1–3	3,4–7,5	1–2,1	0,45–1,35	–		0,82
	пять тарелочек,	1	6	1	0,5	1,5		–
	$D = 24$	1–2,5	6–10,6	1–2,45	0,5–1	1,5–2,3		0,92
	пять тарелочек,	1	6,7	1,25	0,6	1,15		–
	$D = 26$	1–2,5	6,7–11,9	1,25–2,9	0,6–0,9	1,15–2		0,85
	пять тарелочек,	1	8,3	1,4	0,6	1		–
	$D = 28$	1–2	8,3–12,4	1,2–2,8	0,6–1	1–1,5		0,88

* В раструбных соплах – диаметр суженной части.

Примечания: 1. Первая (верхняя) строка – характеристика сопла при рекомендуемом рабочем напоре воды, вторая (нижняя) строка – диапазон рабочих характеристик данного сопла. 2. $d_к$ – диаметр камеры завихрения, мм; d_o – диаметр отверстия в завихрителе, мм.

общих положений, которые необходимо учитывать при разработке и применении сопел в градирнях.

1. Каждому типу сопел соответствует свой номинальный напор, который обеспечивает наиболее рациональные характеристики при работе сопла, учитывая диапазон плотностей орошения и необходимость равномерного распределения воды путем перекрытия факелов.

2. Наименее энергоемкими являются ударные сопла, но они обладают и бóльшим радиусом разбрызгивания, что при полом факеле может создать затруднения в обеспечении равномерного распределения воды по площади оросителя.

3. Технические характеристики сопел очень чувствительны к изменениям размеров их элементов и соотношений этих размеров. Даже кажущиеся незначительными отклонения от рекомендуемых размеров элементов сопел могут привести к существенному уменьшению расчетного значения $R_ф$ и нарушению равномерности орошения площади факела, а также сказаться на значении μ. Поэтому при изготовлении водораспределительных устройств необходимо строго соблюдать их рекомендуемые размеры. В случае отклонений размеров необходимо проводить проверочные исследования изготовленных сопел. Для получения хороших результатов разработка новых, модернизация существующих конструкций и их производство должны сопровождаться выполнением основательных научно-исследовательских работ.

4. При выборе сопла для конкретной градирни следует учитывать следующие критерии: имеющийся или расчетный напор воды; габариты факела, их соответствие размерам градирни и схеме подачи воды (вверх–вниз); возможность обеспечения номинальным расходом q_c расчетной плотности орошения $q_ж$ при установке одного сопла на каждые 0,8–1,5 м² площади орошения градирни; в случае загрязненной воды способность конструкции сопла пропускать ее, не засоряясь; стоимость с учетом доставки; качество изготовления (соответствие ТУ). В каждом конкретном случае любой из указанных выше критериев или сочетание двух–трех критериев могут быть определяющими.

Иногда в качестве водоразбрызгивающих сопел для градирен, если это экономически оправдано, применяются форсунки широкого назначения, например форсунка каскадная высокопроизводительная типа ФГ (рис. 8.7, № 17). Согласно проспекту, форсунка типа ФГ предназначена для среднего и грубого рас-

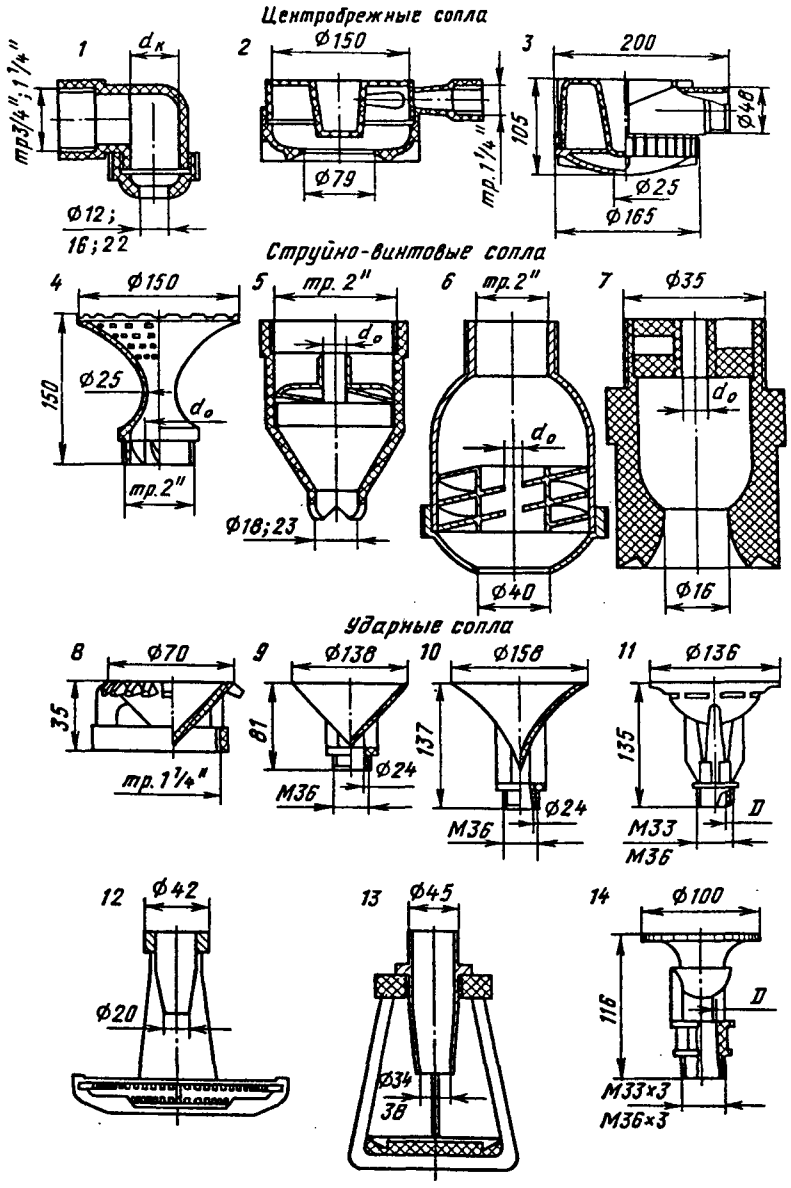


Рис. 8.7. Водоразбрызгивающие пластмассовые сопла

пыления жидкости в градирнях, скрубберах, конденсаторах, а также для распыления загрязненной жидкости большой температуры с частицами размером до 10–15 мм. Форсунка изготавливается из нержавеющей стали или металла, защищенного от коррозии специальным покрытием. Конструктивно она представляет собой многотарельчатое сопло диаметром 35 мм, рассчитана на применение с расходом q_c до 70 м^3/ч при напоре H_c до 25 м. Характеристика может быть представлена формулой

$$q_c = 13{,}8\sqrt{H_c}. \qquad (8.21)$$

При установке всего расчетного числа сопел факелами разбрызгивания, направленными вниз, сеть труб меньше зашлаковывается по сравнению с установкой сопел факелами вверх, но условия для охлаждения капельного потока перед оросителем ухудшаются. Для непрерывного удаления загрязнений из труб достаточно размещать в нижней их части для работы факелами вниз примерно 25% расчетного числа сопел; остальные 75% сопел устанавливаются факелами вверх. Во всяком случае "промывные" сопла, направленные факелом вниз, рекомендуется устанавливать на тупиковых участках труб. Для этого целесообразно применять сопла с прямым каналом.

Размеры капель при разбрызгивании воды соплами. Определение гранулометрического состава капель в потоке воздуха

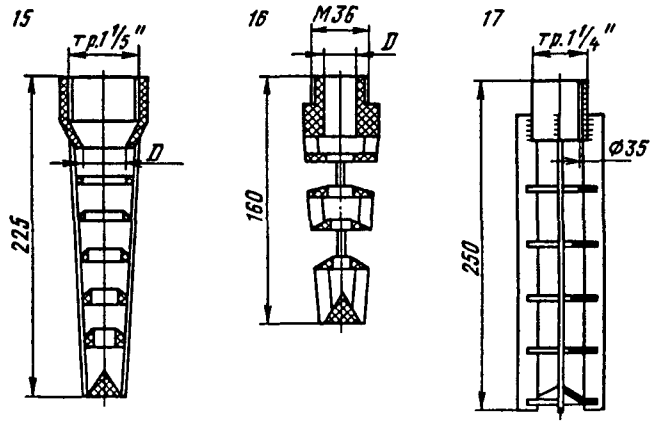


Рис. 8.7 (продолжение)

сопряжено со значительными трудностями. Для этой цели существует ряд методов, которые условно можно разделить на три группы: 1) метод непосредственного измерения капель; 2) методы, основанные на замене жидкости расплавленным веществом, капли которого отвердевают при движении в атмосферном воздухе; 3) косвенные методы (фотографирование и др.).

Обработку статического материала по дисперсности распыла производят преимущественно в безразмерных критериальных параметрах, определяемых в зависимости от геометрических размеров разбрызгивателей, скорости, вязкости, плотности и поверхностного натяжения разбрызгиваемой среды. Теоретических формул для определения размеров капель не существует. Поэтому обобщенные экспериментальные критериальные зависимости получают исходя из теории подобия и анализа размерностей.

В зависимости от принятого способа усреднения диаметра капель распределение их по фракциям получается различным. Это усреднение может производиться по числу $d_{ср}$, площади поверхности d_f или объему d_v капель:

$$d_{ср} = \frac{\Sigma n_i d_i}{n}; \tag{8.22}$$

$$d_f = \sqrt{\frac{\Sigma n_i d_i^2}{n}}; \tag{8.23}$$

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{\Sigma n_i d_i^3}{n}}, \tag{8.24}$$

где n_i – число капель данного диаметра; n – общее число капель.

Более характерным для оценки площади поверхности воды в факеле является средний эквивалентный диаметр (диаметр по Заутеру):

$$d_э = \frac{\Sigma n_i d_i^3}{\Sigma n_i d_i^2} = \frac{d_v^3}{d_f^2}. \tag{8.25}$$

Если принять за единицу среднеарифметический диаметр капель $d_{ср}$, то диаметр d_f больше $d_{ср}$ в 1,5 раза, d_v – в 1,2 раза и $d_э$ – в 1,3 раза.

Специальным прибором, разработанным в НИИ ВОДГЕО, были измерены размеры капель в факелах разбрызгивания сопел из пластмассы. При статистической обработке результатов для каждого опыта определялся средний арифметический $d_{ср}$ и эквивалентный $d_э$ диаметры капель. Получены опытные коэффициенты для определения диаметров капель $d_{ср}$ и $d_э$, мм, в зависимости от напора воды перед соплом H_c в формулах

$$d_{ср} = C_{ср}/\sqrt[3]{H_c}; \tag{8.26}$$

$$d_э = C_э/\sqrt[3]{H_c}, \tag{8.27}$$

где $C_{ср}$, $C_э$ – коэффициенты, определяемые экспериментально для данного типоразмера сопла (табл. 8.8).

Таблица 8.8. **Коэффициенты $C_{ср}$ и $C_э$ по данным опытов**

Сопло	Направление факела			
	вниз		вверх	
	$C_{ср}$	$C_э$	$C_{ср}$	$C_э$
Тангенциальное, $D_у$ = 20 × 12 мм	23	34	24	42
С зубчатым отражателем, $D_у$ = 32 мм	–	–	28	42
Тангенциальное, $D_у$ = 32 × 16 мм	27	50	28,5	50,5

В критериальной форме с учетом геометрических размеров сопел, режима истечения и физических свойств жидкости (вязкости, плотности и поверхностного натяжения) выражение имеет вид

$$d_э/d_0 = 47{,}85A_c^{-0,6}\mathrm{Re}^{-0,7}П^{-0,1}, \tag{8.28}$$

где d_0 – диаметр выходного отверстия сопла, мм (для вычислений Re и $П$, м); $П = \frac{\mu_ж^2}{\rho_ж \sigma d_0}$ – определяющий критерий.

При проведении опытов входящие в (8.28) параметры изменялись в следующих пределах: A_c = 0,1 ÷ 0,26; Re = 21 500 ÷ 86 400 и $П$ = (0,08 ÷ 0,125) · 10^{-5}. Максимальное отклонение значений диаметров капель при вычислениях по (8.28) от опытных данных не превышало 20%, что в технике разбрызгивания жидкостей считается вполне приемлемым.

По (8.28) с достаточной для практических расчетов точностью можно определить размеры капель при разбрызгивании воды центробежным соплом, если известна его геометрическая характеристика A_c, режим работы (число Re) и физические свойства воды (параметр $П$).

В качестве примера в табл. 8.9 приведены вычисленные по формуле (8.28) размеры капель при разбрызгивании воды раструбным соплом $D = 50/25Р$ (рис. 8.7).

При разбрызгивании воды центробежно-струйными форсунками с диаметром выходного отверстия $d_0 = 1 \div 25$ мм при перепаде давлений $P = 0{,}05 \div 1$ МПа В. С. Галустов рекомендует следующую формулу для определения диаметров капель $d_э$, мм:

$$d_э = 0{,}154 P^{-0{,}44} d_0^{0{,}23}, \qquad (8.29)$$

где d_0, мм.

Например, для цельнофакельного сопла $D = 50/40$ ($d_0 = 15$ мм) диаметр капель при $P = 0{,}05$ МПа (5 м вод. ст.) $d_э = 0{,}154 \times \times 0{,}05^{-0{,}44} \cdot 15^{0{,}23} = 1{,}07$ мм.

При выборе типа сопел следует учитывать, что при тонком распыливании воды капли мелких фракций могут уноситься уходящим из градирни воздухом или же полностью испаряться, что увеличивает потерю воды и приводит к увлажнению воздуха, ухудшающему охлаждение остальных капель. По данным Л. Д. Бермана при скорости воздуха в противоточном охладителе 2 м/с диаметр витающих в воздухе капель составляет 0,5 мм. Кроме того, мелкодисперсное разбрызгивание воды приводит к необходимости уменьшения геометрических размеров сопел, что вызывает засорение их взвесью оборотной воды и увеличение энергетических затрат на разбрызгивание. Следует помнить, что основное назначение сопел является возможно более равномерное распределение воды по оросителю при минимальных энергетических затратах, чему способствуют оптимальные размеры капель, равные 2–3 мм.

Таблица 8.9. **Размеры капель при разбрызгивании воды соплом раструбным $D = 50 \times 25Р$ по (8.28) ($d_0 = 25{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; $A_c = 0{,}112$; Re = 112 300 ÷ 252 000; $П = 5{,}4 \cdot 10^{-7}$)**

H_c, м	q_c, м³/ч	$d_э$, мм	$d_{ср}$, мм
1	7,78	5,9	4,6
1,25	8,7	4,8	3,7
1,5	9,53	4,6	3,5
1,75	10,29	4,3	3,3
2	11	4,1	3,2
3	13,52	4	3,1
4	15,61	3,2	2,5
5	17,45	3	2,3

Оценка неравномерности распределения воды соплами. Удельные потоки воды в факелах сопел распределяются неравномерно не только по радиусам, но и по окружностям. Это принципиально усложняет теоретические расчеты распределения воды в градирнях при групповой работе сопел. Они могут быть выполнены с допущением некоторой погрешности путем осреднения эпюр $q(r)$ по разным направлениям (радиусам) факела.

Неравномерность поля орошения группой сопел можно только в первом приближении определить в результате решения геометрической задачи о наложении концентрических полей орошения. Кроме того, что поля орошения случайно асимметричны, результирующее поле формируется и процессами гидродинамического взаимодействия факелов. Это принципиально усложняет решение.

Использование в расчетах водораспределения по оросителю эпюры $q(r)$ приводит к очень громоздким вычислениям суперпозиции эпюр отдельных сопел. Поэтому желательно оперировать некоторыми компактными характеристиками неравномерности орошения в факеле отдельного сопла. Обычно неравномерность потоков оценивается коэффициентами неравномерности, которые могут быть вычислены различными способами.

В теории расчета водораспределительных устройств градирен по аналогии с распределительными устройствами аппаратов химической технологии мерой неравномерности $q(r)$ считается модуль отклонения средней плотности орошения от $\bar{q}$. Среднее значение q и средний модуль отклонения от него могут рассчитываться с различными весовыми коэффициентами, что отражается на количественной оценке неравномерности орошения.

Неравномерность орошения площади единичным соплом, получаемая в виде опытной эпюры $q(r)$, может оцениваться

коэффициентом $K'_{нр}$:

$$K'_{нр} = \frac{\sum_{r=0}^{R_ф} |q(r) - \bar{q}| \Delta r}{\bar{q} R_ф}, \qquad (8.30)$$

где $\bar{q}$ – среднее значение $q(r)$, получаемое делением площади эпюры на радиус факела $R_ф$.

Среднеквадратический критерий неравномерности орошения вычисляется по формуле

$$K'_{нр} = \sigma_q / \bar{q}, \qquad (8.31)$$

где $\sigma_q^2 = \frac{2 \sum_{r=0}^{R_ф} q^2(r) r \Delta r}{R_ф^2} - (\bar{q})^2$.

По всем оценкам наблюдается следующая закономерность: для сопел, установленных факелом вверх, с ростом напора неравномерность уменьшается, для сопел, установленных факелом вниз, – увеличивается.

Условие, при котором поток воды q в любой точке зоны орошения факела одиночного сопла одинаков и равен средней плотности $\bar{q}$, характеризуется коэффициентом неравномерности $K'_{нр} = 0$.

Соплам, приведенным в табл. 8.7, при рабочих напорах свойственно неравномерное распределение воды в отдельном факеле, т. е. $K_{нр} > 0$. Опытные значения коэффициента $K'_{нр}$ в зависимости от условий работы сопел даны ниже:

Условия работы сопел	$K'_{нр}$
$H_с = 2 \div 4$ м; факелы направлены вниз; расстояния от сопел до верха оросителя равны 0,8–1 м; $R_ф = 0{,}2 \div 1$ м	0,6–1
$H_с = 0{,}5 \div 2{,}5$ м; факелы направлены вверх; расстояния от сопел до верха оросителя равны 0,25–0,5 м; $R_ф = 0{,}5 \div 3$ м	0,8–0,2

Первой причиной неравномерности водораспределения в градирнях является неравномерность факела орошения от

единичного сопла; второй – невозможность такой установки сопел (даже с равномерным факелом каждого), при которой суперпозиция этих факелов давала бы равномерное поле удельных потоков воды в оросителе. Закономерности как первой, так и второй неравномерности могут быть глубоко изучены только экспериментально.

Решением задачи определения неравномерности распределения воды группой сопел является отношение среднеквадратического разброса плотности орошения по всему оросителю к средней плотности орошения. Анализ результатов широких экспериментальных исследований позволил получить для различных типов сопел среднестатистические связи между средней плотностью орошения $\bar{q}$, определяемой установкой сопел и напором, и среднеквадратическим отклонением плотности орошения от σ_q.

Все характеристики построены в диапазоне напоров от минимально допустимого, при котором факел полностью гаснет и вода падает на ороситель струей, до напора, превышение которого не рекомендуется по энергетическим затратам на подачу воды. При ориентации сопел факелом вверх границы напора равны соответственно 0,5–1 и 2–4 м при ориентации факелом вниз – 1 и 4 м.

Опытные данные о распределении воды группой сопел при взаимодействии факелов разбрызгивания обобщены следующей эмпирической зависимостью:

$$K_{нр} = M K'_{нр} \left(\frac{f}{H_с R_ф} \right)^{0,4}, \qquad (8.32)$$

где M – безразмерный коэффициент, зависящий от расстояния от сопел до оросителя (при факелах вниз) и направления факелов разбрызгивания; f – площадь оросителя, обслуживаемая одним соплом, м².

Независимо от типоразмеров сопел при их установке факелами вверх коэффициент $M = 0{,}6$. При факелах сопел, направленных вниз, значения этого коэффициента равны:

Расстояние от сопел до верха оросителя, м	0,5	0,75	1
Коэффициент M	1,3	0,9	0,5

Отклонение данных $K_{нр}$, вычисленных по (8.32), от опытных или расчетных значений не превышает ± 9,5%, что для инже-

нерных расчетов распределения воды в градирнях является вполне приемлемым.

Например, для сопел раструбных с $D = 50 \times 25$Р по (8.32) $K_{нр} = 0{,}13$ ($H_c = 1{,}5$ м; $K'_{нр} = \sigma_q/\bar{q} = 0{,}25$; $f = 1{,}56$ м^2; $R_ф = 1{,}4$ м и $M = 0{,}6$). Расчетом на ЭВМ перекрытия факелов этих сопел с использованием экспериментальной эпюры $q(r)$ одиночного факела получено $K_{нр} = 0{,}12$, т. е. отклонение от расчетных значений [по (8.32)] составляет 8%.

Допускаемая неравномерность распределения воды соплами по оросителю градирен $K_{нр} \leqslant 0{,}25$.

Системы распределительных труб и лотков. В градирнях могут применяться трубчатые или лотковые системы распределения воды. Напорные трубчатые системы в сравнении с лотковыми безнапорными создают меньшее сопротивление проходу воздуха, менее чувствительны к колебаниям расхода воды и проще в эксплуатации. По этой причине в нашей стране примерно с 1970 г. градирни проектируются и строятся с трубчатыми водораспределительными системами. Однако за рубежом лотковые водораспределительные системы широко используются. Они более экономичны по энергозатратам на подачу воды на градирни.

Схема трубопроводов в плане принимается соответственно форме поперечного сечения градирни. При работе этих систем происходит снижение расхода в направлении движения воды по трубопроводу (лотку) вследствие попутного его оттока через разбрызгивающие сопла (насадки).

Гидравлический расчет систем заключается в определении диаметров магистральных и распределительных труб при заданном напоре воды в начале системы, при которых обеспечивается относительно равномерное распределение расходов воды по трубам и через разбрызгивающие сопла.

Показателем равномерности распределения воды трубой $m_{тр}$ между установленными на ней соплами служит отношение расхода воды через первое $q_{с1}$ и последнее $q_{с.п}$ по ходу движения сопла, т. е.

$$m_{тр} = q_{с1}/q_{с.п}. \tag{8.33}$$

Применительно к градирням следует добиваться, чтобы показатель равномерности распределения воды $m_{тр} = 0{,}9 \div 0{,}95$. Он является функцией отношения площади всех отверстий $f_{отв}$ в стенке дырчатой трубы к площади ее поперечного сечения $f_{тр}$. Это отношение принято называть конструктивным отношением дырчатого распределителя $K_ω$. Указанное значение $m_{тр} = 0{,}9 \div 0{,}95$ достигается при конструктивном отношении $K_ω = 0{,}2 \div 0{,}25$, т. е.

$$K_ω = \Sigma f_{отв}/f_{тр} = 0{,}2 \div 0{,}25. \tag{8.34}$$

Опыты, проведенные в НИИ ВОДГЕО А. И. Егоровым, показали, что показатель равномерности распределения воды дырчатой трубой определяется формулой

$$m_{тр} = (1 - 0{,}35K_ω)\sqrt{1 - 0{,}36K_ω^{1,8}}. \tag{8.35}$$

Характерной особенностью истечения воды через разбрызгивающие сопла некоторых конструкций является неполное заполнение водой выходного отверстия (несовершенное сжатие струи). Например, в центробежных соплах, в которых происходит закручивание потока, по оси выходного отверстия часть его площади незаполнена водой (степень заполнения зависит от геометрической характеристики A_c и напора воды). В связи с этим при расчетах площади отверстий $f_{отв}$ в (8.34) для сопел с закручиванием потока следует исходить не из фактического диаметра выходного отверстия сопла d_o, а так называемого "приведенного" диаметра $d_{пр}$. При расчетном $d_{пр}$ обеспечивается такая же подача сопла, что и при диаметре d_o, но с совершенным сжатием струи, которое имеет место при истечении воды через цилиндрический внешний насадок с коэффициентом расхода $\mu = 0{,}82$.

Приведенный диаметр $d_{пр}$, мм, определяется по формулам: для центробежных и струйно-винтовых сопел

$$d_{пр} = \sqrt{\frac{4q_c}{\mu\pi\sqrt{2gH_c}}}\,1000; \tag{8.36}$$

для ударных сопел, в которых истечение воды происходит через отверстие в виде кольца, образованного кромкой выходного отверстия в корпусе и несколько утопленным в него отражателем,

$$d_{пр} = \sqrt{4f_к/\pi}, \tag{8.37}$$

где q_c – подача сопла, м^3/с; μ – коэффициент расхода, принимае-

мый как и для цилиндрического насадка равным 0,82; $f_к$ – площадь кольцеобразного выходного отверстия, мм².

Для ударных сопел с круглым выходным отверстием с истечением струи при совершенном сжатии расчеты $d_{пр}$ не требуются.

В практике проектирования и реконструкции градирен тип устанавливаемых сопел чаще всего известен, что обусловлено наличием их производства и возможностью приобретения. Обычно задан и свободный напор воды на отметке расположения водораспределительной системы, а следовательно, известно и число требуемых к установке сопел, определяемое по общему расходу воды на градирню с учетом характеристики $q_с - H_с$ одиночного сопла. В связи с этим задача расчета водораспределительной системы градирни сводится к определению диаметров труб при указанных известных условиях, обеспечивающих равномерный отток воды по длине.

Степень равномерности распределения расходов воды между соплами зависит от соотношения потерь напора (сопротивления) в них и по длине распределительной трубы. При этом степень равномерности можно повысить увеличением потерь в соплах или уменьшением их по длине трубы.

Потери напора в соплах можно повышать путем уменьшения числа сопел или их производительности. Снизить потери напора по длине трубы можно увеличением площади ее поперечного сечения. Если располагаемый напор недостаточен или увеличение диаметра труб нежелательно, то равномерное распределение может быть достигнуто путем изменения расстояний между соплами при заданном напоре (в этом случае потребуется применить другой тип сопел с иной характеристикой $q_с - H_с$) или уменьшения диаметра трубы по ходу движения воды, выполняя ее телескопической формы для восстановления скоростного напора.

Перед расчетом диаметров труб разрабатывается схема водораспределительной системы с указанием расстояния между трубами и соплами в плане и по высоте – до оросителя и водоуловителя.

В градирнях с площадью орошения 400 м² и более систему распределения воды целесообразно разделять на центральную и периферийную зоны орошения с подводом воды к ним по самостоятельным трубам, возможностью их полного отключения и перераспределения воды с центральной на периферийную

зону. Такое устройство системы позволяет эксплуатировать градирню зимой с повышенной плотностью орошения периферийной зоны или проводить ремонтные работы внутри градирни без полного ее останова. Систему трубопроводов рассчитывают исходя из условия пропуска 60% общего расхода воды на градирню периферийной частью и 40% – центральной.

Затем вычисляется коэффициент неравномерности распределения воды по оросителю $K_{нр}$ по (8.32). При $K_{нр} \leq 0{,}25$ приступают к расчету диаметров труб, при $K_{нр} > 0{,}25$ пересматривают схему расположения трубопроводов, сопел и режим их работы или принимают другой типоразмер сопел. Повторяют расчет коэффициентов неравномерности $K_{нр}$ до тех пор, пока он не достигнет указанного значения.

Диаметр магистральных и распределительных (рабочих) труб предварительно рассчитывается исходя из (8.34). При этом контролируют скорость движения воды: в магистральных трубах она должна быть около 1,5–2 м/с, в распределительных – не более 1,5 м/с. Скорость воды менее 0,7 м/с принимать не рекомендуется из условия предупреждения осаждения взвеси в трубах.

Распределительные трубы могут быть стальными, асбестоцементными и пластмассовыми; магистральные – преимущественно стальными. Поверочные расчеты диаметров труб, предварительно определенных по (8.34), производятся по известным формулам гидравлического расчета трубопроводов с переменной массой.

При самотечных водораспределительных системах скорость движения воды в рабочих лотках принимают равной 0,2–0,3 м/с, а в магистральных – 0,5–0,7 м/с. Для обеспечения нормальной работы сливных трубок, устраиваемых в днище рабочих лотков с шагом 0,7–1 м, глубина воды в них должна быть не менее 0,2 м.

Для удобства обслуживания (чистки, смены сливных трубок и пр.) желательно иметь высоту лотков не более 350 мм и ширину их не менее 100 мм. Во избежание значительного стеснения градирни при больших плотностях орошения высота этих лотков доводится иногда до 600–800 мм. Диаметр сливных трубок должен быть не менее 15 мм из условия предупреждения засорения и определяется он по формуле (7.6).

Разбрызгивающие тарелочки размещаются на 0,5–0,6 м ниже выходных отверстий сливных трубок строго по их вертикальной оси. При расчетах лотков пользуются общеизвестными форму-

лами для определения потерь на трение и местные сопротивления.

Пример 8.2. Рассчитать диаметр распределительных труб напорной водораспределительной системы секции градирни с площадью орошения $F = 144$ м² (12 × 12 м) и удельной гидравлической нагрузкой $q_ж = 10$ м³/(м² · ч). Располагаемый напор воды в распределительной системе $H = 3$ м.

Решение. Принимаем водоразбрызгивающие сопла тангенциального типа с $D = 32/22$ ($d_0 = 22$ мм), изготавливаемые в НИИ ВОДГЕО. Предусматриваем их установку для работы факелами разбрызгивания, направленными вниз, при расстоянии от сопел до оросителя, равном 1 м. Для определения гидравлических характеристик сопел воспользуемся табл. 8.7. При $H_c = 3$ м подача $q_c = 5{,}26$ м³/ч = 0,00146 м³/с, радиус факела разбрызгивания на расстоянии 1 м от сопла $R_ф = 0{,}9$ м, $\mu = 0{,}5$ м, $K'_{нр} = 0{,}72$ (с учетом того, что большему напору соответствует большее значение $K'_{нр}$).

Приведенный диаметр сопла, по (8.36)

$$d_{пр} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}00146}{0{,}82 \cdot 3{,}14\sqrt{19{,}62 \cdot 3}}} \cdot 1000 = 17{,}2 \text{ мм}.$$

Приведенная площадь выходного отверстия сопла

$$f_{пр} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}0172^2}{4} = 0{,}23 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Число сопел $i = q_ж F/q_c = (10 \cdot 144)/5{,}26 = 274$ шт.

Принимаем к установке 270 сопел. Составляем схему расположения магистральных и распределительных труб и сопел. Принимаем десять распределительных труб длиной по 10 м. На каждой трубе устанавливаем по 27 сопел: 14 шт. с одной стороны с шагом 0,74 м и 13 шт. с другой с тем же шагом, но со смещением на 0,37 м. Площадь оросителя, обслуживаемая одним соплом,

$$f_c = q_c/q_ж = 5{,}26/10 = 0{,}526 \text{ м}^2.$$

Коэффициент неравномерности распределения воды по оросителю группой сопел по (8.32)

$$K_{нр} = 0{,}5 \cdot 0{,}72\left(\frac{0{,}526}{3 \cdot 0{,}9}\right)^{0{,}4} = 0{,}187.$$

Для примера определим диаметр одной распределительной трубы.

Поступление воды в трубу

$$q_1 = q_ж F/10 = (10 \cdot 144)/10 = 144 \text{ м}^3/\text{ч} = 40 \text{ л/с}.$$

Площадь поперечного сечения трубы по (8.34) при $K_ω = 0{,}2$

$$f_{тр} = \Sigma f_{отв}/K_ω = (6{,}21 \cdot 10^{-3})/0{,}2 = 31{,}05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

где $\Sigma f_{отв} = f_{пр} i = 0{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot 27 = 6{,}21 \cdot 10^{-3}$ м².

Диаметр распределительной трубы

$$d_р = \sqrt{(4 \cdot 31{,}05 \cdot 10^{-3})/3{,}14} = 0{,}1988 \text{ м} = 198{,}8 \text{ мм}.$$

Принимаем $d_р = 200$ мм. По табл. 8.10 для $d_р = 200$ мм при $q_{27} = 40$ л/с (где 27 – число установленных на трубе сопел) скорость воды в начале трубы $ω = 1{,}17$ м/с. Через 5 м за счет оттока части воды по 13 соплам расход воды в трубе $q_{14} = 5{,}25 \cdot 14 = 73{,}5$ м³/ч = 20,4 л/с, а скорость $ω = 0{,}6$ м/с. При такой скорости возможно осаждение в трубе взвешенных веществ.

Принимаем распределительную трубу телескопической формы с тремя участками диаметром, длиной и числом установленных сопел по ходу воды: 1 – 200 мм, 4 м, 10 шт.; 2 – 150 мм, 3,5 м, 9 шт.; 3 – 100 мм, 2,5 м, 8 шт. При этом на концах тупиковых участков предусматриваем установку промывных сливных трубок диаметром 17 мм с разбрызгивателями воды в виде отражателей.

Рассчитываем конструктивные отношения $K_ω$ для участков распределительной трубы:

1 участок

$$f_{тр} = 31{,}05 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \qquad K_ω = \frac{0{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{31{,}05 \cdot 10^{-3}} = 0{,}07;$$

2 участок

$$f_{тр} = 17{,}66 \cdot 10^{-3}, \qquad K_ω = \frac{0{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot 9}{17{,}66 \cdot 10^{-3}} = 0{,}11;$$

Таблица 8.10. **Значения расхода воды q, л/с, и скорости ω, м/с, для стальных газопроводных труб с условным проходом $d_p = 32 \div 150$ мм и электросварных труб с $d_p = 175 \div 500$ мм**

(из таблиц Ф. А. Шевелева)

q	ω	q	ω	q	ω	q	ω	q	ω	q	ω	q	ω
$d_p = 32$		$d_p = 80$			$d_p = 125$		$d_p = 175$		$d_p = 250$		$d_p = 350$		$d_p = 450$
0,8	0,84	3,5	0,71	10	0,75	17	0,75	37	0,70	72	0,70	120	0,70
0,9	0,94	4	0,81	11	0,83	20	0,88	40	0,75	80	0,77	136	0,80
1	1,05	4,5	0,91	12	0,90	23	1,01	45	0,85	90	0,87	150	0,88
1,1	1,15	5	1,01	13	0,98	26	1,15	50	0,94	100	0,97	173	1,01
1,2	1,25	6	1,21	15	1,13	29	1,28	60	1,13	126	1,22	204	1,20
1,3	1,36	7	1,41	17	1,28	32	1,41	70	1,32	140	1,35	230	1,35
1,4	1,46	8	1,61	20	1,51	34	1,5	80	1,51	154	1,49	256	1,50
$d_p = 50$		$d_p = 100$			$d_p = 150$		$d_p = 200$		$d_p = 300$		$d_p = 400$		$d_p = 500$
1,5	0,71	6	0,71	15	0,79	27	0,79	53	0,70	97	0,72	146	0,70
2	0,94	7	0,82	17	0,90	30	0,87	60	0,79	104	0,77	171	0,82
2,3	1,08	8	0,94	19	1,01	34	0,99	70	0,92	114	0,85	195	0,93
2,5	1,18	9	1,06	21	1,11	39	1,14	80	1,05	126	0,94	220	1,29
2,8	1,32	10	1,18	23	1,22	43	1,25	90	1,18	150	1,11	250	1,20
3,1	1,46	12	1,41	25	1,35	48	1,40	100	1,32	185	1,37	280	1,34
3,5	1,65	13	1,53	30	1,59	52	1,52	114	1,5	206	1,53	312	1,49

Таблица 8.11. **Расчетные значения удельных сопротивлений A в формуле потерь напора $h = Alq^2$ (l, м; q, м^3/с) для старых стальных водопроводных труб при $\omega \geqslant 1{,}2$ м/с***

(из таблиц Ф. А. Шевелева)

Трубы водогазопроводные		Трубы электросварные			
Условный проход d, мм	A	Условный проход d, мм	Наружный диаметр $d_н$, мм	Толщина стенки δ, мм	A
32	91 720	175	180	4,5	20,79
50	11 080	200	219	4,5	6,959
80	1167	250	273	6	2,187
100	281,3	300	325	7	0,8466
125	86,22	350	377	7	0,3731
150	33,94	400	426	6	0,1859
–	–	450	480	7	0,09928
–	–	500	530	7	0,05784

* Значения поправочного коэффициента K_1 при $\omega < 1{,}2$ м/с определяются как

$$K_1 = 0{,}852\left(1 + \frac{0{,}867}{\omega}\right)^{0{,}3}.$$

3 участок

$$f_{тр} = 7{,}85 \cdot 10^{-3}\ \text{м}, \qquad K_\omega = \frac{0{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot 8}{7{,}85 \cdot 10^{-3}} = 0{,}23;$$

$$K_{\omega\,ср} = \frac{0{,}07 + 0{,}11 + 0{,}23}{3} = 0{,}138.$$

По формуле (8.35) определяем показатель неравномерности распределения воды между первым соплом q_1 в направлении течения и последним q_{27}:

$$m_{тр} = (1 - 0{,}35 \cdot 0{,}138)\sqrt{1 - 0{,}36 \cdot 0{,}138^{1,8}} = 0{,}947,$$

т. е. 94,7%.

Расход воды через последнее сопло

$$q_{27} = \frac{q_1 m_{тр}}{100} = \frac{5{,}25 \cdot 94{,}7}{100} = 4{,}97\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

При этом напор воды перед ним по (8.20)

$$H_{q_{27}} = \frac{[4{,}97/(0{,}5 \cdot 0{,}38 \cdot 10^{-3} \cdot 3600)]^2}{19{,}62} = 2{,}69 \text{ м}.$$

Потери напора по длине распределительной дырчатой трубы $l = 10$ м:

$$\Delta H = H_{q_1} - H_{q_{27}} = 3 - 2{,}69 = 0{,}31 \text{ м}.$$

Допустимое значение потери напора в водораспределительной системе градирен ориентировочно составляет 0,3–0,4 м. Такие значения допустимых потерь напора принимаются обычно для градирен с площадью орошения 400 м^2 и более. При меньшей площади орошения градирен потери напора в системе водораспределения не должны превышать 0,1 м. Для расчетов потерь напора по длине магистральных и подводящих труб со сплошными стенками можно воспользоваться данными табл. 8.11.

ГЛАВА 9

ПОТЕРИ ВОДЫ В ОХЛАЖДАЮЩИХ СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Потери воды на испарение P_1, капельный унос из градирен P_2 и сброс (продувку) P_3 (в процентах от расхода воды в системе) характеризуют ее водный режим и называются параметрами водного режима.

Количество испарившейся воды может быть подсчитано исходя из уравнений теплового и материального баланса:

$$G_{ж_1} c_ж i_1 - G_в i_2 = G_{ж_2} c_ж t_2 - G_в i_1; \quad G_и = G_{ж_1} - G_{ж_2}, \qquad (9.1)$$

где $G_{ж_1}$ и $G_{ж_2}$ – расходы воды на входе и выходе из градирни, кг/с; $G_в$ – расход воздуха, кг/с.

Количество испарившейся воды может быть выражено также и через расход и влагосодержание воздуха:

$$G_и = G_в(x_2 - x_1). \qquad (9.2)$$

Решая совместно эти уравнения, получим следующую формулу для определения количества испарившейся воды:

$$G_и = \frac{G_{ж_1} c_ж (t_1 - t_2)}{(i_2 - i_1)/(x_2 - x_1) - c_ж t_2}. \qquad (9.3)$$

Этой формулой удобно пользоваться при испытаниях действующих градирен в натуре или опытных установок в лабораторных условиях, когда требуется определить относительно точные количества испарившейся воды.

При проектировании систем оборотного водоснабжения для определения расхода добавочной воды (для восполнения ее потерь) можно исходить из предложения, что все тепло отнимается от воды только за счет испарения, и тогда можно написать

$$G_и r \approx G_ж \Delta t c_ж. \qquad (9.4)$$

Отсюда количество испарившейся воды P_1, %, определяется по формуле

$$P_1 = \frac{G_и}{G_ж} 100 = \frac{\Delta t c_ж}{r} 100 = a \Delta t, \qquad (9.5)$$

где

$$a = (c_ж / r) \cdot 100. \qquad (9.6)$$

При средних температурах воды в градирнях значение r можно принять равным 2,43 МДж/кг (580 ккал/кг), тогда коэффициент $a \approx 0{,}171\%/°C$. В действительности благодаря наличию теплоотдачи соприкосновением, особенно значительной при низких температурах наружного воздуха, этот коэффициент уменьшится. Значения коэффициента a в (9.6) приведены ниже:

Температура воздуха ϑ_1, °С	–20	–15	–10	0	10	20	30	40
Коэффициент a, %/°С	0,035	0,042	0,055	0,087	0,12	0,14	0,15	0,16

При охлаждении продукта в сухих градирнях с орошением теплообменников водой (подобно теплообменным аппаратам оросительного типа) потери воды на испарение, вычисленные по (9.6), увеличиваются вдвое.

Потери воды с капельным уносом P_2. Для снижения потерь воды вследствие уноса капельной влаги с уходящим воздухом

Таблица 9.1. **Потери оборотной воды вследствие капельного уноса из градирен**

Тип градирен	Значения P_2, % от расхода охлаждаемой воды
Вентиляторные градирни с водоуловителями:	
при отсутствии в оборотной воде токсичных веществ	0,1–0,2
при наличии токсичных веществ	0,05*
Башенные градирни с водоуловителями	Не более 0,05**
Башенные градирни без водоуловителей и оросительные теплообменные аппараты	0,5–1**
Открытые и брызгальные градирни	1–1,5

* $P_2 \leqslant 0{,}05\%$ рекомендуется принимать для малогабаритных градирен, располагаемых на территории жилой застройки.

** Дополнительно принимаются потери воды на унос ветром через входные окна, равные 0,02–0,05% циркуляционного расхода воды (при средней скорости ветра до 3 м/с).

в вентиляторных градирнях всех типов предусматриваются водоуловители. В башенных градирнях они устраиваются только при площади орошения более 1000 м² (табл. 9.1).

В табл. 9.1 меньшие значения потерь P_2 надлежит принимать для охладителей большей производительности, а также для расчетов режимов обработки оборотной воды в целях предотвращения карбонатных отложений.

Потери воды на сброс (продувку) из системы P_3. Эти потери предусматривают для поддержания расчетной концентрации растворимых в оборотной воде солей, не выпадающих в осадок.

Значение продувки открытых оборотных систем с мокрыми градирнями не превышает 3% расхода оборотной воды и устанавливается в каждом конкретном случае из условий поддержания рационального значения коэффициента концентрирования солей $K_{уп}$:

$$K_{уп} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} = 1 + \frac{P_п}{P_2 + P_3}, \qquad (9.8)$$

или

$$P_3 = P_1/(K_{уп} - 1) - P_2. \qquad (9.9)$$

Рациональное значение коэффициента $K_{уп}$ для каждой системы оборотного водоснабжения устанавливается индивидуально технологическими и технико-экономическими расчетами с учетом температурных параметров работы системы и качества добавочной воды. Значение $K_{уп}$ обычно поддерживается около 3–5; при определенных условиях $K_{уп}$ может составлять 6–8.

Продувочная вода оборотных систем в общем случае характеризуется следующими основными показателями: повышенной в несколько раз по сравнению с подпиточной водой минерализацией; наличием компонентов ингибиторов коррозии и солеотложений; загрязнением продуктами производства и температурой, на 8–15 °С превышающей температуру воды в водоеме. В связи с этим в современных условиях при определении схемы промышленного водоснабжения обязательным становится одновременное принятие решения по мероприятиям для обезвреживания и утилизации продувочных вод.

Возможны три основных варианта:

сброс продувочных вод после соответствующей очистки до норм ПДК в водоем;

подача на биологические очистные сооружения для очистки совместно с фекальными и производственными сточными водами с последующим сбросом смеси очищенных вод в водоем или подачей на повторное использование в техническом водоснабжении после соответствующей доочистки;

очистка продувочных вод отдельным потоком или совместно с дождевой и талой водами и возврат на промплощадку для повторного использования.

Методы очистки продувочных вод весьма разнообразны. Применяются механические, физико-химические, химические и биохимические методы, а также их сочетания. Предпочтительны те из них, которые обеспечивают максимальное использование воды и получение пригодных к последующей утилизации осадков и шламов при минимальном количестве концентрированных сточных вод, выводимых на обессоливание, выпарку и сжигание.

Нередко продувочную воду оборотных систем с низкими концентрациями загрязнений относят к "условно чистой" и сбрасывают в водоем без очистки, поскольку единственным ее "загрязнением" является тепло. С точки зрения водоохранных мероприятий такое решение в большинстве случаев нерацио-

нально. Повышение температуры воды в водоеме на 5 °С и более, особенно в летнее время, усиливает жизнедеятельность микроорганизмов (например, нитрифицирующих бактерий), рост водорослей и снижает содержание в воде кислорода, необходимого для жизнедеятельности рыб и других высших организмов. Интенсивность протекания этих процессов зависит от степени "теплового загрязнения" водоема и концентрации биологически активных веществ в продувочной воде.

Из-за относительно невысоких концентраций органических загрязнений продувочных вод, наличия в них компонентов ингибиторов коррозии, биоцидов и повышенной минерализации в большинстве случаев сброс их на биологические очистные сооружения нецелесообразен из-за дополнительной гидравлической нагрузки на них и ухудшения, как правило, степени очистки сточных вод при разбавлении малоконцентрированной продувочной водой.

В последние годы наметилась тенденция перехода крупных предприятий, потребляющих большие объемы технической воды, на замкнутые системы водоснабжения без сброса сточных вод в водоемы. Основным элементом таких систем являются охлаждающие оборотные циклы с использованием в них сточных вод в качестве подпитки. Замкнутые системы при определенных условиях могут оказаться экономически выгодными, так как глубокая очистка сточных вод по условиям сброса их в водоем часто дороже, чем подготовка для повторного использования. Сдерживающим фактором использования городских сточных вод в охлаждающих системах оборотного водоснабжения с испарительными градирнями являются санитарно-гигиенические проблемы, незамедлительно возникающие на территории промышленного предприятия или электростанции с подачей в водооборот таких сточных вод, в том числе и очищенных до норм ПДК.

Количество добавочной воды. Количество воды, добавляемой в систему $P_{доб}$, %, равно общей сумме потерь воды в системе:

$$P_{доб} = P_1 + P_2 + P_3. \qquad (9.10)$$

Кроме того, оборотная вода часто расходуется на технологические и другие нужды предприятия, что компенсируется соответствующим увеличением количества добавляемой в систему воды дополнительно к $P_{доб}$.

Анализ параметров водного режима системы. При обычных перепадах температур воды на градирнях $\Delta t = 8 \div 12$ °С летом испаряется 1,1–2% воды и зимой 0,3–1%, т. е. потери воды на испарение P_1 изменяются в 2–3,6 раза в зависимости от колебаний температур наружного воздуха и регулировке не поддаются. Не поддаются регулировке и потери воды с капельным уносом из градирен P_2. При поддержании в исправном состоянии водоуловителей P_2 является постоянной величиной, зависящей от конструкции водоуловителя и скорости воздуха в градирне.

Следовательно изменение водного режима системы, оцениваемого коэффициентом концентрирования солей $K_{уп}$, может быть достигнуто главным образом вариацией значения продувки P_3 по (9.9).

В НИИ ВОДГЕО Д. И. Кучеренко получена следующая формула для расчетов концентрации хорошо растворимых солей в оборотной воде при постоянном и непрерывном добавлении воды в систему и сбросе из нее продувки:

$$N = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} N_0 - \frac{P_1}{P_2 + P_3} N_0 e^{\frac{-(P_2 + P_3)}{a} t}, \qquad (9.11)$$

где N_0 – концентрация соли в добавочной воде; N – концентрация той же соли в оборотной воде в момент времени t после пуска системы; $a = V/G_{об}$ – продолжительность одного оборота воды в системе (V – объем воды в системе).

Параметры P_2 и P_3 представляют собой рассредоточенный и сосредоточенный выбросы в окружающую среду оборотной воды с содержащимися в ней загрязнениями. Количество этой воды в процентах от циркулирующей в системе

$$P_3 + P_2 = \frac{P_1}{K_{уп} - 1}. \qquad (9.12)$$

На коэффициент $K_{уп}$ оказывает влияние в основном параметр P_3 (продувка).

С точки зрения возможностей снижения выбросов загрязнений из оборотных систем в окружающую среду целесообразно эксплуатировать их с минимальным капельным уносом P_2 и регулируемой продувкой P_3, которую можно при необходимости очистить от загрязнений.

Например, увеличение $K_{уп}$ с 2 до 2,42 при P_1 = 1,5% может быть достигнуто за счет уменьшения капельного уноса P_2 в 10 раз (с 0,5 до 0,05%) или продувки P_3 в 1,81 раза (с 1 до 0,55%). Дальнейшее уменьшение капельного уноса из градирен P_2 с 0,05, например, до 0,001%, т. е. в 50 раз, приводит к увеличению коэффициента $K_{уп}$ с 2,42 до 2,49, т. е. всего лишь на 0,07.

ГЛАВА 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ГРАДИРЕН

В НИИ ВОДГЕО в течение ряда лет проводились натурные исследования аэродинамических характеристик градирен и на моделях. В результате этих исследований, а также по данным зарубежных исследователей удалось установить соотношение размеров вентиляторных градирен и их элементов, которые можно рекомендовать при проектировании, исходя из условия обеспечения оптимальной аэродинамической схемы градирни.

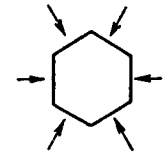
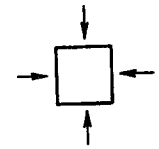
Установлено, что отдельно стоящим градирням целесообразно придавать форму в плане круглую или близкую к ней многоугольную, секционным – квадратную или прямоугольную с соотношением сторон не более 4 : 3. При этом аэродинамическое сопротивление отдельно стоящей градирни на 10–20% меньше, чем секционной при прочих равных условиях. Некоторое представление о влиянии формы в плане на коэффициент сопротивления для градирен одинаковой конфигурации и равновеликой площади дает табл. 10.1 (в ней коэффициент сопротивления восьмигранной градирни принят за 100%).

Размеры входных окон определяются из соотношения площади окон $F_{ок}$ к площади градирни F ($K_{ок} = F_{ок}/F$), оптимальное значение которого по условиям обеспечения равномерного распределения воздуха в сечении под оросителем и снижения аэродинамических сопротивлений на вход воздуха с учетом технико-экономических соображений находится в пределах $K_{ок}$ = 0,35 ÷ 0,45 и обычно принимается равным 0,4. При этом высота входных окон $K_{ок}$ будет определяться по формулам:

для круглой отдельно стоящей градирни диаметром D

$$H_{ок} = \frac{K_{ок}F}{\pi D} = 0{,}1D; \qquad (10.1)$$

Таблица 10.1. **Влияние формы в плане на аэродинамическое сопротивление градирни**

Форма градирни в плане (стрелками указано направление потоков воздуха)	Соотношение сторон	Коэффициент сопротивления, %
	–	100
	1 : 1	110–115
	1 : 1	120–130
	4 : 3 3 : 2 2 : 1	138–148 140–150 153–164

для секционной прямоугольной с размерами сторон секции a и b, при заборе воздуха с двух сторон

$$H_{ок} = K_{ок}F/2a = K_{ок}b/2. \qquad (10.2)$$

Высота оросителя в каждом конкретном случае выбирается с помощью технико-экономических расчетов, в основу которых закладываются данные испытаний этого оросителя. Расстояние между оросителем и водораспределительной системой определяется из условий обеспечения равномерного распределения воды по оросителю и зависит от принятой конструкции водораспределителя.

Водоуловители целесообразно располагать на 2 м выше системы водораспределения из условий обеспечения свободного прохода для чистки или замены сопел. При направлении сопел

факелами разбрызгивания вниз допускается установка водоуловителей непосредственно на трубы водораспределительной системы. И в первом и во втором случаях расстояние от водоуловителя до лопастей вентилятора должно быть не менее половины диаметра вентилятора. Скорость движения воздуха в створе расположения водоуловителя обычно нецелесообразно принимать более 2,5 м/с во избежание значительного уноса капельной влаги. В отдельно стоящей градирне водоуловитель при соблюдении указанных условий можно располагать в конфузорной части. В случае секционной градирни наряду со сказанным следует иметь в виду, что из условий наименьших аэродинамических сопротивлений и обеспечения плавных потоков воздуха при движении их от оросителя к вентилятору водоуловитель целесообразно располагать примерно посередине между оросителем и плоским перекрытием.

Конфигурация перекрытия может оказывать влияние на сопротивление градирни и распределение потоков воздуха в ее верхней части на подходе к вентилятору. Исследования показали, что более благоприятные аэродинамические условия создает конфузорное перекрытие градирни по сравнению с плоским. Влияние высоты плоского перекрытия над оросителем на сопротивление градирни сводится к минимуму, если ее сделать достаточно большой, например 4 м для секционной градирни 400 м². Однако при любой высоте плоского перекрытия в верхней части градирни под ним образуются завихрения и застойные зоны. Конфузорное перекрытие обеспечивает более плавное сужение потока воздуха к створу вентилятора. Коэффициент сопротивления градирни почти не зависит от расстояния между оросителем и нижним основанием конфузора. Поэтому конфузор можно располагать непосредственно над оросителем. Следует только иметь в виду, что водоуловительные решетки могут оказаться в сжатом сечении, где скорость движения воздуха, а следовательно, и аэродинамическое сопротивление будут велики.

Угол раскрытия конфузора для градирен принимается обычно в пределах 110°. При этом отношение высоты конфузора к диаметру его основания D составляет 0,4. При практических расчетах для определения высоты конфузора $H_{конф}$ задаются углом его раскрытия φ

$$H_{конф} = \frac{D - D_{вент}}{2\mathrm{tg}\,\frac{\varphi}{2}}. \qquad (10.3)$$

Сопряжению конфузора с корпусом вентилятора целесообразно придавать форму коллектора, при которой достигается плавный вход потока воздуха в корпус вентилятора. Теоретически лучшей формой профиля коллектора является лемниската. Практически достаточно равномерное поле скоростей получается при коллекторе, очерченном по дуге окружности с радиусом

$$r = (0{,}15 - 0{,}2)D_{вент}. \qquad (10.4)$$

Высота коллектора при этом может быть определена по формуле

$$H_{колл} = r\,\mathrm{tg}\,\frac{\varphi}{4}. \qquad (10.5)$$

Выполнение таких коллекторов сопряжено с известными трудностями. Более просты в изготовлении конические коллекторы и коллекторы, очерченные по ломаной линии (составленные из двух и более усеченных конусов). Однако поле скоростей перед вентилятором этих коллекторов менее равномерное, а коэффициент их сопротивления выше, чем у коллекторов, очерченных по дуге окружности.

Основное назначение диффузора – уменьшение потерь на удар при выходе воздуха из градирни, которые определяются площадью выходного отверстия корпуса вентилятора. Структура потока воздуха, а следовательно, и потеря давления в диффузоре зависит от типа вентилятора. В то же время диффузор оказывает большое влияние на КПД вентилятора, поэтому размеры диффузора подбираются при аэродинамическом расчете вентилятора. Исходя из этого полное сопротивление градирни целесообразно считать до входа в вентилятор, а не до выхода из диффузора.

При проектировании градирен размеры диффузора и цилиндрической части корпуса вентилятора определяются по паспорту вентиляторной установки. В случае отсутствия к моменту проектирования паспорта можно ориентировочно принимать высоту корпуса равной $0{,}16D_{вент}$ (исходя из условий размещения в нем колеса вентилятора и дополнительного выравнивания эпюры скоростей воздуха перед лопастями), а высоту диффузора равной $0{,}7D_{вент}$ с центральным углом раскрытия $\alpha = 18 \div 20°$. Все размеры подсчитываются в чистоте. При проектировании

высота градирни может быть несколько увеличена с учетом размеров конструктивных элементов и узлов, например балок над входными окнами, порога над резервуаром и т. д. Общая высота градирни в отдельных случаях может быть увеличена в целях снижения рециркуляции влажного воздуха. Это увеличение делается в основном за счет диффузора вентилятора.

Пример 10.1. Рассчитать высотную схему круглой в плане градирни с вентилятором $D_{вент}$ = 14 м, площадью орошения F = = 750 м², удельной гидравлической нагрузкой $q_ж$ = 8 м³/(м² · ч).

Решение. Диаметр градирни

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 750}{3{,}14}} = 30{,}9 \text{ м}.$$

Площадь входных окон $F_{ок}$ принимаем равной 0,4F. Высоту находим по формуле (10.1): $H_{ок} = 0{,}1 \cdot 30{,}9 \approx 3{,}1$ м.

Высоту оросителя из модифицированной древесины принимаем по расчету равной 4 м. Система распределения воды – напорная трубчатая с разбрызгивающими соплами. Учитывая большие размеры данной градирни, целесообразно принимать высокопроизводительные сопла ударного типа с отражателями, что позволит снизить высоту градирни на 0,5 м.

Расстояние от оси труб распределительной системы до верха оросителя принимаем равным 0,5 м, до водоуловителя 2 м. Угол раскрытия конфузора для данной градирни можно рекомендовать $\varphi = 104°$:

$$H_{конф} = \frac{30{,}9 - 14}{2\text{tg } 52°} = 6{,}6 \text{ м}.$$

Радиус сопряжения конфузора с корпусом вентилятора r = = $0{,}18D_{вент} = 0{,}18 \cdot 14 = 2{,}52 \approx 2{,}5$ м.

Высота коллектора $H_{колл} = 2{,}5\text{tg } 26° = 1{,}2$ м.

Высоту корпуса вентилятора принимаем $0{,}16D_{вент}$, т. е. 2,24 м; высоту диффузора $0{,}7D_{вент}$ – 9,8 м и центральный угол его α – 18°30.

Вертикальная компоновка башенных градирен определяется высотой воздуховходных окон, типом и профилем оросительного устройства, а также типом и размерами водораспределительного устройства. Вертикальная компоновка конструктивных элементов в значительной мере определяет характер воздушного потока в градирне и влияет на ее аэродинамические показатели. Образование в градирне воздушных вихрей и малоактивных зон влечет за собой снижение эффективности охлаждения воды.

Вытяжные башни градирен должны иметь дневную маркировку – две горизонтальные полосы с разрывами красного и белого цветов в верхней части башни и световое ограждение, необходимость выполнения которых в каждом конкретном случае согласовывается с местным территориальным управлением гражданской авиации.

Вытяжные башни градирен должны быть оборудованы молниеприемниками и заземлением (на металлических башнях молниеприемники не устанавливаются).

ГЛАВА 11

РАЗМЕЩЕНИЕ ГРАДИРЕН

11.1. Расположение градирен на промплощадке

При размещении градирен на площадке предприятия учитывают характер застройки окружающей территории, стремятся к меньшей протяженности циркуляционных трубопроводов, соединяющих потребителей охлаждающей воды с градирнями, а также учитывают направление господствующих ветров зимой и летом, туманообразование и вынос капель воды за пределы градирни, вызывающие обмерзание расположенных вблизи сооружений.

В целях уменьшения диаметров и протяженности трубопроводов водопроводных сетей применяют при соответствующем технико-экономическом обосновании децентрализацию систем оборотного водоснабжения с максимальным приближением градирен к цехам – потребителям воды.

На основании результатов отечественных и зарубежных исследований по взаимовлиянию охладителей друг на друга рекомендуется принимать при проектировании минимальные расстояния между охладителями воды (табл. 11.1).

Расстояние от градирен к зданиям и сооружениям в соответствии с данными СНиП 11-89-80 Генеральные планы промышленных предприятий (М.: Стройиздат, 1981) приведено в табл. 11.2.

Таблица 11.1. **Минимальные расстояния между охладителями воды (между рядами градирен)**

Сооружения	Расстояния до градирен, м			
			Вентиляторных	
	Открытых	Башенных	секционных	одновентиляторных
Брызгальные бассейны	–	30	30	30
Открытые градирни	–	20	30	20
Башенные градирни	30	D	0,5D	21–33
Вентиляторные секционные градирни площадью секции, м^2:				
До 10	30	0,5D	9	15–20
До 20	30	–	12	15–20
До 100	30	–	21	20–25
До 200	30	–	27	20–30
Более 200	30	–	33	21–33
Одновентиляторные градирни площадью, м^2:				
300–400	30	21	21	21
400–800	30	27	27	27
800–1200	30	33	33	33

Примечания:

1. D – диаметр башенной градирни на уровне входных окон.

2. Минимальные расстояния между градирнями в одном ряду рекомендуются для градирен открытого типа и вентиляторных секционных 3 м, башенных 0,5D, одновентиляторных с верхним расположением вентилятора – две высоты входных окон. Градирни с нижним нагнетательным вентилятором могут устанавливаться боковыми стенками вплотную друг к другу или на некотором расстоянии для прохода обслуживающего персонала.

3. При числе секций в ряду менее трех расстояния между открытыми градирнями сокращаются на 30%.

4. В случае размещения в двух соседних рядах градирен разной площади расстояние между рядами принимается по градирням большей площади.

Таблица 11.2. **Расстояние от градирен к зданиям и сооружениям**

Здания и сооружения	Расстояние от градирен, м		
	Башенных	Вентиляторных – наземных	Размещенных на покрытиях зданий
Здания со стенами из материалов, имеющих марки по морозостойкости не менее МРз 25	21	21	9
Открытые электрические подстанции и линии электропередачи	30	42	42
Открытые наземные склады (не менее)	21	24	15
Наземные и надземные инженерные сети, ограждения	9	9	9
Ось железнодорожных путей внешних и сортировочных	42	60	21
Ось внутренних железнодорожных подъездных путей	12*	12*	9*
Край проезжей части автодорог общего пользования	21	39	9
Край проезжей части подъездных и внутризаводских автомобильных дорог	9	9	9

* При использовании паровозной тяги и применении сгораемых ограждений конструкций градирен расстояние принимается равным 21 м.

11.2. Взаимодействие вентиляторных градирен, расположенных группами

На промышленной площадке вентиляторные градирни обычно занимают большую территорию. Размеры градирен за последнее время значительно увеличились. Через них прокачиваются огромные массы воздуха. Например, в современной градирне площадью орошения 1200 м^2 подача только одного вентилятора достигает 2,8 тыс. м^3/с (10 млн. м^3/ч) воздуха. Таких градирен на площадке промышленного предприятия могут быть десятки. При расположении градирен вблизи друг от друга выходящий из них нагретый влажный воздух, попадая во входные

окна соседней градирни, ухудшает ее охлаждающую способность.

Слишком близкое расположение градирен друг к другу или к соседним сооружениям ухудшает распределение воздуха во входных окнах и в оросителе, снижает подачу воздуха вентиляторами, а следовательно, уменьшает охлаждающую способность градирен. Существенное влияние на работу градирен оказывает ветер.

Температура и влажность входящего воздуха при расчете градирен принимаются обычно по данным ближайшей метеостанции. Фактически вокруг группы градирен образуется зона более теплого и влажного воздуха. Расчет расположенных группами градирен без поправок на подогрев и увлажнение входящего воздуха может привести к занижению расчетной температуры охлажденной воды.

При правильном выборе схемы размещения градирен и расстояний между ними в значительной мере можно снизить неблагоприятное влияние градирен друг к другу. Этот выбор целесообразно обосновывать технико-экономическими расчетами с учетом всех перечисленных выше факторов.

Для установления степени рециркуляции необходимо оценивать скорость засасываемого в градирню наружного воздуха на различном расстоянии от входных окон. Значение этой скорости приближенно можно определить (при отсутствии ветра) по формулам, полученным в результате анализа расчетных спектров всасывания воздуха перед входными окнами.

Для отдельно стоящих круглых в плане градирен скорость засасываемого в градирню воздуха

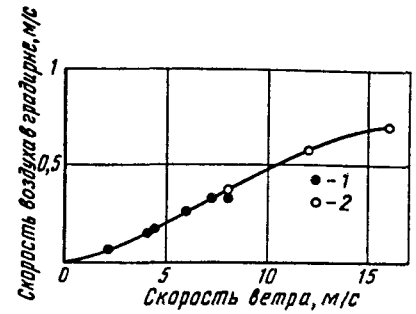
$$\omega_s = \frac{\omega_{ок}}{\left(\frac{0{,}5\pi}{H_{ок}} + \frac{2}{D}\right)s + 1}. \qquad (11.1)$$

Для секционных прямоугольных в плане градирен со входом воздуха с двух сторон

$$\omega_s = \frac{2H_{ок}\,l\,\omega_{ок}}{4\pi s^2 + \pi(4H_{ок} + l)s + 2H_{ок}\,l}, \qquad (11.2)$$

где $\omega_{ок}$ – средняя скорость воздуха во входных окнах градирни, м/с; $H_{ок}$ – высота входного окна, м; s – расстояние от входного

Рис. 11.1. График зависимости дефлекторного эффекта от скорости ветра при отдельно стоящих градирнях:
1 – данные НИИ ВОДГЕО; *2* – данные И. В. Брусиловского



окна до поверхности спектра равных скоростей, м; D – диаметр отдельно стоящей градирни, м; l – общая ширина входных окон градирни с одной стороны, м.

На расстоянии $s > 2H_{ок}$ скорость подсасывания воздуха во входные окна практически мало изменяется, а при $s = 2H_{ок}$ она составляет 0,16 для прямоугольной секционной и 0,12 для круглой в плане градирни от средней скорости во входных окнах. Расчеты показывают, что при расположении двух рядов однотипных секционных градирен, например, на расстоянии $2H_{ок}$ и в случае выключения в одном ряду вентиляторных установок можно ожидать подсоса влажного воздуха до 16%. Для круглых в плане однотипных секционных градирен подсос 12% влажного воздуха при этих условиях будет только в тех окнах, которые ближе расположены к соседней градирне с выключенным вентилятором. Такой подсос наблюдался при исследовании одновентиляторных градирен при отсутствии ветра.

В практике эксплуатации нередки случаи работы градирен с отключенным вентилятором, особенно в холодное время года. При обдувании ветром градирен с отключенными вентиляторами проявляется дефлекторный эффект. График зависимости скорости воздуха в градирнях в результате дефлекторного эффекта при ветре в диапазоне 0–8 м/с, по данным опытов НИИ ВОДГЕО, приведен на рис. 11.1. На этот же график нанесены результаты исследований дефлекторного эффекта при скоростях ветра 8, 12 и16 м/с, выполненных И. В. Брусиловским и др. В результате дефлекторного эффекта в отдельно стоящей градирне при обычных для средней полосы ветрах (5–15 м/с) в ней создаются скорости 0,2–0,7 м/с. При групповой работе градирен во второй (по направлению ветра) градирне влияние дефлекторного эффекта в 2 раза сильнее. Внутреннее сопро-

тивление градирни при обдувании ее ветром нарастает с увеличением скорости ветра по квадратичному закону.

Исследование зон распространения влажного теплого воздуха в районе расположения секционных градирен проведено в натуре. Температуру атмосферного воздуха замеряли по сухому и смоченному термометрам в 18 точках в районе расположения капельных секционных градирен с F_{op} = 192 м². Высота градирен до выходного сечения диффузора 16,7 м, высота входных окон 3,7 м. Гидравлическая нагрузка на секцию составляла 1,94–2,22 кг/(м² · с) [7–8 м³/(м² · ч)] при температуре горячей воды до 40 °С. Отношение высоты градирни к короткой стороне 16,7 : 12 = 1,3, к длинной 16,7 : 48 = 0,35. Градирни расположены в четыре ряда по шесть секций в каждом. Точки измерения температуры располагали на высоте 1,5 м от уровня земли в одном створе, проходящем параллельно направлению ветра примерно через центр группы градирен. Температура воздуха ϑ и особенно τ в районе градирен и с подветренной стороны значительно увеличивается по сравнению с температурой в контрольной точке, в которой не сказывается влияние градирен. В отдельных случаях разница достигает: по сухому термометру 3,2–3,7 °С, по смоченному 5–5,4 °С.

Зона повышенных температур за градирнями с подветренной стороны, например при ветре 4,5–6 м/с, может распространяться на большое расстояние – 100 м и более. Таким образом, в результате выброса теплового влажного воздуха в районе градирен и незначительном от них удалении с подветренной стороны создается свой микроклимат.

При расстоянии между рядами 20 м происходит локальная рециркуляция воздуха в градирнях, которой не наблюдается при расстоянии 40 м.

Ветер, движущийся параллельно продольной оси градирни, относит выходящий пар, и в первых секциях по ходу ветра рециркуляция отсутствует. Выходящий из градирни увлажненный воздух при ветре направляется вниз к входным окнам. Поэтому, чем длиннее градирня, тем меньше поступает свежего воздуха в подветренные торцевые секции. С увеличением скорости ветра рециркуляция возникает скорее с наветренных торцевых секций, за счет чего возрастает общее количество рециркулирующего в градирне воздуха. Результаты проведенных исследований совпадают с данными Г. Деглера, который на основании подобных наблюдений рекомендует принимать

в градирне не более трех секций, а сами градирни располагать уступами по ломаной линии таким образом, чтобы по возможности исключить взаимное воздействие влажного воздуха, выбрасываемого из градирен.

11.3. Корректировка расчетных параметров наружного воздуха при расположении градирен группами

Превышение фактической температуры воздуха по смоченному термометру перед входными окнами градирен над температурой по данным метеостанции на 1–2° наблюдается довольно часто, что снижает надежность работы градирен и носит существенный ущерб качеству и количеству выпускаемой продукции.

Разница между температурами воздуха по смоченному термометру на входе в градирню и расчетной при расположении градирен параллельными рядами поперек направления господствующего ветра может достигать 0,5–4° в зависимости от скорости ветра, числа рядов и расстояния между рядами. Эта разница может увеличится при расположении градирен вблизи или на территории объектов с большим тепловыделением, создающим микроклимат.

На основании имеющихся данных исследований можно предложить формулу для ориентировочного определения средней температуры входящего воздуха τ при расположении типовых секционных градирен с площадью секции 64–192 м² и отдельно стоящих с F_{op} = 400 м² параллельными рядами с расстоянием между последними 20–40 м и обычных тепловых нагрузках:

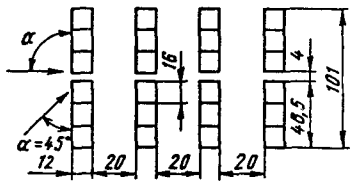
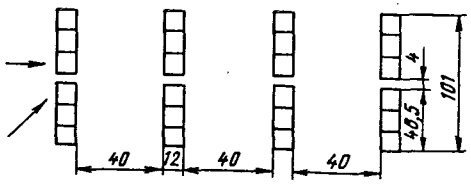
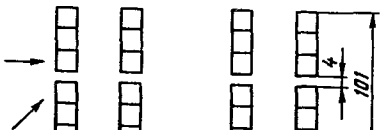
$$\tau = \tau_м + 0{,}2B[1 + K(n - 1)\sin\alpha], \qquad (11.3)$$

где $\tau_м$ – расчетная температура воздуха по смоченному термометру на основе данных метеостанции, °С; α – угол, образованный между направлением преобладающего в расчетный период ветра и длинной стороной градирен; n – порядковый номер ряда градирен по направлению ветра; K – коэффициент, учитывающий влияние расстояния L между рядами градирен (при L = 40, 35, 30, 25 и 20 м коэффициент K соответственно равен 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 и 1); B – коэффициент учитывающий влияние длины градирен (при разрыве между градирнями, меньшем двух высот входных окон): при длине ряда градирен 100, 75, 50, 25, 10 коэффициент B соответственно равен 1; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1.

Общая средняя поправка, учитывающая влияние длины градирен для группы градирен, определяется как среднее арифметическое из поправок к каждому ряду.

Для иллюстрации влияния расположения градирен на τ в табл. 11.3 приведены поправки к $\tau_м$, вычисленные указанным выше способом для некоторых вариантов расположения трехсекционных градирен с $F = 192$ м^2. Из табл. 11.3 видно, что расположение градирен по схеме 1 требует повышения расчетного $\Delta\tau$ на 0,5 °С и соответственно увеличения числа секций (при условиях примера на 2–3 шт.) для получения того же охлаждающего эффекта. Дополнительной постройки секций можно почти полностью или частично избежать при размещении градирен по схеме 4. Указанное следует учитывать при технико-экономических расчетах для определения числа градирен и их расположения.

Таблица 11.3. **Поправки к $\tau_м$ при различном расположении градирен**

№ схемы	Схемы размещения градирен (размеры даны в метрах)	α°	Δτ, °С
1		90	0,5
		45	0,4
2		90	0,5
		45	0,3
3		90	0,4
		45	0,3
4		90	0,2
		45	0,2

Таким образом, рациональное расположение градирен на площадке предприятия во многом определяет эффективность их работы. Расчеты охлаждающей способности без учета взаимного влияния градирен, а также других строений могут привести к ошибкам в определении температуры охлажденной воды.

Основными условиями рационального расположения градирен можно считать следующие: расстояние между отдельно стоящими градирнями в ряду – не менее двух высот входных окон; секционные градирни, а также ряды отдельно стоящих градирен целесообразно располагать в шахматном порядке параллельно друг к другу и направлению господствующего ветра; расстояние между рядами – не менее 10 высот входных окон; число секций в градирне или число отдельно стоящих градирен в ряду – не более трех.

Высокие и большие градирни способствуют лучшему рассеиванию выходящих паров воды, меньше увлажняют окружающий воздух и меньше повышают его температуру, чем градирни низкие и малых размеров. Исходя из этих соображений, число градирен в оборотном цикле желательно принимать возможно меньшим за счет увеличения их размеров. Рециркуляция и вредное влияние ветра на работу градирен могут быть в значительной мере снижены за счет рациональной конструкции градирен, например устройства высокого диффузора, сплошных ветровых перегородок от оросителя до уровня воды в резервуаре, поворотных жалюзи на окнах, закрываемых с подветренной стороны, входных окон с высотой, обеспечивающей оптимальные скорости воздуха и др. Увлажнение наружного воздуха вокруг градирен можно существенно уменьшить путем устройства высокоэффективных водоуловителей.

В некоторых случаях при соответствующем технико-экономическом обосновании возможно использование малогабаритных вентиляторных градирен полной заводской готовности в водооборотных циклах с расходом воды примерно 3000 м^3/ч вместо секционных градирен строительной конструкции. Высота малогабаритных градирен в 3–4 раза меньше типовых секционных.

Это накладывает определенные особенности работы малогабаритных градирен при большом их числе в группе: в холодное время года опасность рециркуляции, образование тумана на прилегающей территории, увеличивающегося с повышением перепада температур (количества испарившейся воды); переувлажнение территории и близрасположенных сооружений из-за низкого расположения верхней части таких градирен над уровнем земли даже при допустимом СНиП значении капельного уноса (не более 0,2%).

Эти обстоятельства требуют соответствующей компоновки и рамещения градирен в водооборотном цикле в плане и по высоте, т. е. может потребоваться размещение градирен небольшими группами на крышах производственных зданий и эстакадах.

В наибольшей мере из числа изготавливаемых в настоящее время пригодны для работы в таком качестве малогабаритные градирни типа "Росинка", которые характеризуются повышенной охлаждающей способностью и практическим отсутствием потерь воды с капельным уносом (0,002%).

ГЛАВА 12

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ГРАДИРНИ

12.1. Поперечно-точные градирни

В поперечно-точных градирнях воздух движется горизонтально, т. е. в поперечном направлении по отношению к стекающей по элементам оросителя вниз воде. Воздух может подаваться механическим способом – вентилятором или естественным путем за счет тяги вытяжной башни. По распределению воздуха такие градирни подразделяются на однопоточные и двухпоточные (см. рис.2.5). Тепловые и аэродинамические расчеты поперечно-точных градирен производятся по тем же принципам, как и противоточных градирен (см. гл. 3–7), но с учетом перекрестных направлений потоков воды и воздуха.

Коэффициент тепло-массопередачи β_{xv} при поперечном токе воды и воздуха примерно на 15–20% меньше, чем при противотоке при одинаковых условиях за счет менее эффективного использования поверхности охлаждения в первом случае

в сравнении со вторым. По этой причине размеры поперечно-точных градирен и их стоимость получаются бóльшими, чем градирен противоточных. Это обстоятельство, наряду с их сильным обмерзанием, главным образом и обусловило преимущественное применение противоточной схемы движения воды и воздуха в отечественной практике проектирования и строительства вентиляторных и башенных градирен.

Такой же подход к оценке этих двух схем и за рубежом, однако в странах с более теплым климатом (США, Япония и др.), чем в России, поперечно-точные градирни достаточно широко исследуются и применяются.

Меньшие высота и аэродинамическое сопротивление проходу воздуха поперечно-точных капельных градирен обеспечивают заметное снижение энергетических затрат на подачу воды и прокачку воздуха.

Экономический выигрыш в энергетических затратах за период окупаемости градирен (8–10 лет) во многих случаях перекрывает потери в капитальных затратах.

Условия расчета поперечно-точных градирен отличаются от противоточных. При противотоке для определения t_2 решается одномерная задача, так как параметры воды и воздуха изменяются только в одном направлении – вертикальной оси градирни. При поперечном токе изменение этих параметров происходит одновременно в двух направлениях – по вертикали и горизонтали. Для этого случая приходится решать двухмерную задачу изменения состояния воды и воздуха.

В НИИ ВОДГЕО выполнены сопоставительные испытания одного и того же деревянного капельного оросителя объемом 10,125 м^3 при противоточном и поперечно-точном движении воды и воздуха (рис. 12.1).

Охлаждающая способность такого оросителя при противотоке оказалась на 20% больше, чем при поперечном токе, а соотношение потерь напора при движении воздуха через ороситель составило в среднем 2 : 1.

Со стороны входа воздуха в ороситель поперечно-точной градирни предусматривают жалюзийную решетку для предотвращения разбрызгивания и уноса капель воды. Ширину лопастей решетки следует принимать около 400–500 мм, расстояние между ними по высоте 250–300 мм и угол наклона лопастей к вертикали 45°. Коэффициент аэродинамического сопротивления такой решетки при скорости движения воздуха через нее

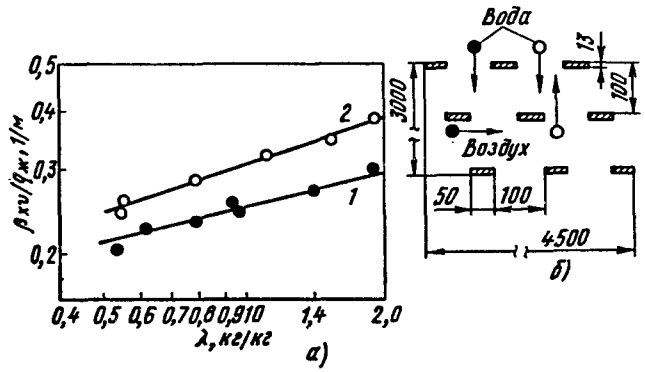


Рис. 12.1. Зависимость $\beta_{xv}/q_ж = f(\lambda)$ для деревянного капельного оросителя высотой 3 м при движении воды и воздуха *а*:

1 – поперечно-точном (A = 0,25 1/м; m = 0,239; $\zeta_{с.о}$ = 0,7 1/м; $K_{ор} = 2{,}21 q_ж^{-0{,}71}$ м · ч/кг; *2* – противоточном (A = 0,308 1/м; m = 0,341; $\zeta_{с.о}$ = 8,92 1/м; $K_{ор}$ = = 0,052 м · ч/кг; *б* – схема деревянного оросителя (размеры в мм); • – поперечный ток; ○ – противоток

2,5–2,8 м/с составляет 2,2–3,9. Уменьшение угла наклона лопастей до 21° приводит к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления решетки в 3,5 раза и неравномерному распределению скоростей при входе воздуха в ороситель.

Длину оросителя (размер в направлении движения воздуха) рекомендуется принимать не более 5–5,5 м. При большей длине оросителя следует устраивать двухпоточные градирни (см. рис. 2.5).

В нижней части входного сечения оросителя образовывается слабо орошаемая зона шириной около 1 м. Эта часть оросителя недостаточно эффективно используется в процессе теплообмена и подвержена сильному обледенению при холодном атмосферном воздухе. Поэтому входное сечение оросителя с жалюзийной решеткой рекомендуется устраивать наклонным, рис. 2.5, в сторону входа воздуха под углом примерно 80° к горизонту. Более высокий эффект охлаждения воды в поперечно-точных градирнях достигается также при перераспределении расхода воздуха по высоте оросителя, например, за счет переменной плотности укладки его элементов или регулирования углов наклона лопастей жалюзийной решетки. В верхнем сечении оросителя, примыкающему к водораспределителю, в

котором существует высокая разность температур воды и воздуха и парциальных давлений пара, расход воды целесообразно иметь на 15–20% больше, чем в нижнем сечении оросителя.

12.2. Сухие градирни

Сухие (радиаторные) градирни являются изобретением венгерских инженеров Геллера и Форго и были поначалу предназначены для охлаждения конденсаторов электростанций.

В нашей стране ВНИИНефтемашем разработаны аппараты воздушного охлаждения АВО, которые по сути являются сухими градирнями и применяются в основном в нефтехимической промышленности для непосредственного охлаждения воздухом технологических продуктов.

Сухие градирни представляют собой теплообменные сооружения, в которых теплопередающей поверхностью служат радиаторы из оребренных трубок. Для создания тяги такие градирни могут быть оборудованы вентиляторами или вытяжной башней (см. рис. 2.12). Сухие градирни применяются как для непосредственного охлаждения продуктов производства, например конденсации, так и для охлаждения воды, охлаждающей в свою очередь теплообменные аппараты.

Передача тепла от нагретой среды, протекающей внутри трубок радиатора, атмосферному воздуху осуществляется без непосредственного контакта через сильно развитую поверхность ребер, имеющихся на трубках, за счет теплопроводности и конвекции. Для интенсификации процессов теплопередачи ребристые трубы могут орошаться снаружи водой.

Радиаторы изготовляются самых разнообразных конструкций, главным образом, из стали или алюминия.

Сухие градирни применяются в случаях:

когда необходимо иметь закрытый, изолированный от контакта с атмосферным воздухом контур циркуляции воды в системе оборотного водоснабжения;

высоких температур нагрева оборотной воды в теплообменных технологических аппаратах, не допускающих ее охлаждения в градирнях испарительного типа;

отсутствия или серьезных затруднений в получении свежей воды на пополнение безвозвратных потерь в оборотных циклах.

Сухие градирни не имеют широкого распространения в сравнении с испарительными градирнями из-за их высокой стоимо-

сти, малой производительности и большого расхода электроэнергии.

Оборудованная, например, вентилятором 1ВГ70 сухая градирня имеет производительность 170–200 м³/ч, однако секция испарительной градирни с тем же вентилятором имеет производительность в пределах 1000–2000 м³/ч. Стоимость сухой градирни в 5 и более раз (по некоторым публикациям в 2–2,5 раза) превосходит стоимость испарительной градирни при одинаковой тепловой нагрузке. Поверхность охлаждения радиаторов должна быть из-за отсутствия испарения воды большей, чем поверхность непосредственного контакта воды и воздуха в испарительной градирне. Эта поверхность с воздушной стороны (включая ребра) может достигать 600 тыс. м², а в крупных охладителях превышает 1 млн. м². При этом размеры (сечение и высота) вытяжной башни или размеры и производительность вентилятора должны быть бóльшими, чем у испарительной градирни, так как расход воздуха, воспринимающего тепло лишь за счет нагрева, в 3–5 раз превышает расход воздуха при испарительном охлаждении воды. Поэтому при оборотной системе с сухой градирней оптимальное давление пара в конденсаторе выше, чем при испарительной градирне (рис. 12.2) и наряду с повышением первоначальных затрат возрастают также удельный расход топлива и расход электроэнергии на собственные нужды. Для АЭС при той же тепловой мощности парогенератора или реактора уменьшается расчетная электрическая мощность энергоблока, а в летнее время располагаемая

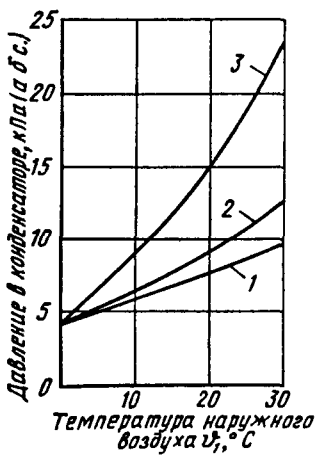


Рис. 12.2. График изменения давления в конденсаторных установках паровой турбины электроблока ПГУ-27:

1 – система охлаждения с вентиляторной испарительной градирней; *2* – комбинированная система охлаждения; *3* – система охлаждения с воздушным конденсатором

мощность турбоагрегата может быть заметно ниже расчетной (номинальной). Для промышленных предприятий при испарительном охлаждении конечная температура продукта $t_{пр}$ может быть выше начальной температуры охлаждающей воды t_2 на 4–8 °С, а при сухом – не менее, чем на 10–15° выше температуры воздуха ϑ.

Одним из недостатков систем воздушного охлаждения с сухими градирнями является зависимость их холодопроизводительности от температуры наружного воздуха ϑ, которая резко меняется не только в течение года, но и в течение суток. Для устойчивой работы таких градирен требуется также обеспечивать стабильную тепловую нагрузку, в особенности при холодном атмосферном воздухе. При эксплуатации промышленных производств и паротурбинных установок ТЭЦ имеет место значительная неравномерность отбора и поступления тепла на градирни, что сопряжено с повышенной опасностью замерзания и выхода из строя дорогостоящего теплообменного оборудования сухих градирен.

Расчет сухих градирен заключается в определении поверхности охлаждения радиаторов для заданных параметров охлаждаемой среды и наружного воздуха и необходимого расхода воздуха.

Поверхность охлаждения радиаторов $F_р$ определяется по формуле

$$F_р = W/q, \qquad (12.1)$$

где W – тепловая нагрузка радиатора, Дж/ч; q – плотность теплового потока, Вт/м², отнесенная к площади оребренной поверхности радиатора.

Значение плотности теплового потока q принимается от 1163 до 2093 Вт/м² [1000 – 1800 ккал/(м² · ч)]. Большое значение q соответствует большему значению разности $t_1 - \vartheta$ и $t_2 - \vartheta$. При $t_2 - \vartheta \leq 5$ °С $q = 233$ Вт/м² [200 ккал/(м² · ч)].

Расход воздуха в сухой градирне определяется по уравнению

$$G_в = \frac{G_ж(t_1 - t_2)c_ж}{(\vartheta_{вых} - \vartheta)c_в}, \qquad (12.2)$$

где $\vartheta_{вых} - \vartheta$ – разность температур нагретого в радиаторе и поступающего к радиатору воздуха, °С.

Необходимый напор, создаваемый вентилятором или вытяжной башней, определяется аэродинамическим сопротивлением градирни, которое равно сумме сопротивлений на вход воздуха, радиаторов и на выход воздуха.

12.3. Гибридные градирни

Гибридная градирня – это комбинированное сооружение, в котором совмещены процессы тепломассообмена, присущие испарительной и сухой градирне. Тяга воздуха может создаваться вытяжной башней, вентилятором или совместно башней и несколькими вентиляторами, размещенными по периметру башни в ее нижней части (см. рис. 2.13, 2.14).

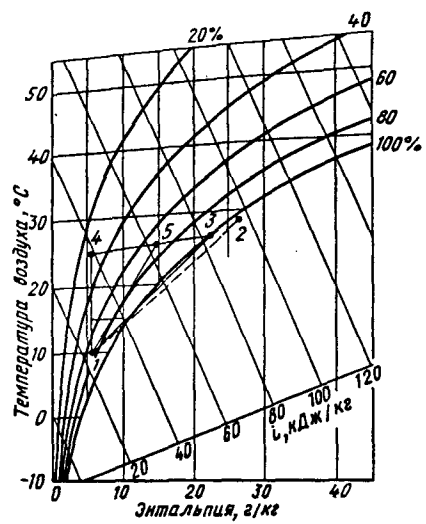
Технологические и технико-экономические показатели гибридных градирен лучше в сравнении с сухими, но уступают испарительным. Они имеют меньше дорогостоящего теплообменного оборудования и охлаждающая способность их в меньшей мере зависит от изменения температуры воздуха ϑ. К достоинствам гибридных градирен можно отнести заметное снижение безвозвратных потерь воды в сравнении с испарительными градирнями и возможность работы без видимого парового факела.

В качестве примера изменение состояния воздуха в гибридной градирне ТЭЦ Альтбах/Дейцизау (Германия), имеющей вид по схеме рис. 2.14, показано на диаграмме рис. 12.3.

Точка *1* на диаграмме характеризует состояние атмосферного воздуха, входящего в градирню: ϑ = 10 °С, τ = 7,5 °С, φ = = 70,8% и x = 5,38 г/кг. При работе в чисто "мокром" режиме воздух нагревается до ϑ = 28,8 °С с увеличением влажности до x = 26 г/кг, точка *2*. Состояние воздуха характеризует более чем 100%-ное насыщение влагой (паром); на выходе из градирни он наблюдается в виде парового факела.

При работе градирни в гибридном режиме воздух, прошедший мокрую часть, нагревается до ϑ = 26,5 °С с увеличением влажности до x = 22,8 г/кг, точка *3*. Воздух насыщен парами воды до 100%-ной влажности. Влагосодержание воздуха, прошедшего сухую часть градирни (радиаторы), не меняется и равно влагосодержанию входящего воздуха, т. е. x = 5,38 г/кг, а температура ϑ после подогрева в радиаторах повышается с ϑ = 10 °С до ϑ = 25 °С, точка *4*. Идеальному перемешиванию потоков сухого и насыщенного воздуха на выходе из градирни

Рис. 12.3. Диаграмма состояния воздуха в работающей гибридной градирне при $P_б$ = 760 мм рт. ст.; *1* – окружающего атмосферного; *2* – выходящего из градирни при работе только мокрой части; *3* – выходящего из мокрой части при работе в гибридном режиме; *4* – выходящего из сухой части при работе в гибридном режиме; *5* – выходящего из градирни после смешивания насыщенного и сухого воздуха



соответствует точка *5*, находящаяся примерно на середине линии 4–3, которая характеризует следующее состояние смешанного воздуха: $\vartheta \approx 26$ °С, $\varphi \approx 71\%$ и $x \approx 14{,}5$ г/кг. Как видно из диаграммы рис. 12.3, относительная влажность входящего воздуха φ практически не изменилась после смешения потоков воздуха за охладительными устройствами; повысилась только его температура и влажность. На выходе из градирни такой воздух визуально не отличается от окружающего атмосферного.

Предметом тепловых и аэродинамических расчетов гибридных градирен и является поиск оптимального количественного состношения поверхностей теплообмена сухой и испарительной части и необходимых в них расходов воздуха.

Расчеты сухой и испарительной части производятся раздельно путем последовательных приближений соотношения масс воздуха к требуемому состоянию на выходе из градирни.

По охлаждающей способности гибридные градирни превосходят сухие, но уступают испарительным градирням. На рис. 12.2, по данным Теплоэлектропроекта, приведены графики изменения абсолютного давления в конденсаторах паровых турбин в зависимости от вида системы охлаждения.

Гибридные градирни более сложны при проектировании и строительстве, требуют повышенного внимания и обслуживания при эксплуатации не только самих градирен, но и системы

водооборота в целом. При недостаточно качественной оборотной воде на стенках внутри труб радиаторов образуются солевые отложения, а оребрения труб загрязняются пылью входящего воздуха, что приводит к резкому возрастанию теплового сопротивления. Это вызывает нарушение расчетных режимов работы сухой и испарительной частей, а также аварийные ситуации в зимнее время.

В нашей стране гибридные градирни не получили распространения из-за повышенных требований при эксплуатации и большей стоимости в сравнении и обычными испарительными градирнями.

12.4. Градирни с тонкослойным отстойником в водосборном бассейне

В оборотной воде всегда присутствуют механические примеси, поступающие в систему с добавочной водой и с воздухом на градирнях, а также органические вещества, которые используются микроорганизмами в качестве углеродного и азотистого питания. Эти вещества поступают в воду за счет утечек продуктов из технологического оборудования, обработки воды реагентами, разложения водных организмов, заносимых с добавочной водой из источника, и др. В результате в оборотной воде достигается высокая степень концентрирования загрязнений, в том числе и взвешенных веществ. При этом концентрация последних в оборотной воде, например нефтехимических предприятий, превосходит на 20–30% произведение концентрации этих веществ в добавочной воде на коэффициент упаривания. Избыток образуется за счет продуцирования взвеси в самой системе – частицы биологического происхождения и продукты коррозии.

В оборотной воде нефтехимических предприятий и заводов СК до 80% взвешенных частиц имеют гидравлическую крупность менее 0,2 мм/с (размер менее 10–12 мкм). Такие частицы трудно поддаются отстаиванию и циркулируют в системе.

Взвешенные вещества с большей крупностью осаждаются в тех частях системы оборотного водоснабжения, где скорости воды не велики – в водосборных бассейнах градирен, в межтрубном пространстве теплообменных аппаратов и других и только незначительная часть их выводится из системы с капельным уносом и продувочной водой.

Вентиляторные и башенные градирни проектируются и строятся с бассейнами по всей площади для сбора и накопления оборотной воды. Объем воды в системе с учетом вместимости трубопроводов составляет 30 ÷ 60% производительности системы в час, а время пребывания воды в бассейнах при заполнении на глубину около 1,7 ÷ 2 м – 20–60 мин в зависимости от типа градирни и гидравлической нагрузки. При таком времени отстаивания из оборотной воды в бассейнах выделяется грубодисперсная взвесь с гидравлической крупностью более 0,5 мм/с. Осадок из резервуаров периодически удаляют вручную или размывом напором струи со сбросом загрязненной воды в ливневую канализацию. Например на нефтехимическом комбинате при опорожнении и чистке водосборных бассейнов градирен типа СК-1200 1 раз в год, из одного сооружения удаляется около 500 м^3 осадка влажностью примерно 90%. Компонентный состав осадка примерно соответствует составу загрязнений в воде, циркулирующей в системе: частицы биологического происхождения (≈ 30%), минеральные соединения – SiO_2 (≈ 25%), Al_2O_3 (≈ 20%), CaO (≈ 11%), Fe_2O_3 (≈ 5%) и прочие включения ≈ 9%.

Наиболее распространенным способом удаления взвешенных веществ из воды является отстаивание. Известно, что продолжительность отстаивания пропорциональна высоте слоя осветляемой воды. С уменьшением высоты слоя расчетная продолжительность отстаивания также уменьшается.

Для интенсификации осаждения взвеси в водосборных бассейнах градирен и организованного удаления из них осадка в НИИ ВОДГЕО разработаны несколько вариантов бассейнов с тонкослойными отстойниками. Они отличаются главным образом конструкцией устройств для удаления осадка.

Для вновь проектируемых систем, в которых можно ожидать интенсивного образования осадка, в водосборных бассейнах градирен СК-400 предусмотрено механическое вращающееся устройство со скребками для непрерывного удаления осадка по типу тех, которые применяются в канализационных радиальных отстойниках.

На рис. 2.4 приведена схема градирни типа СК-1200 с тонкослойным отстойником. Водосборный бассейн глубиной 2,5 м выполнен с профильным днищем и кольцевым лотком для сбора осадка. Лоток делит объем бассейна на центральную и периферийную зоны. Над лотком по разные стороны от его вер-

тикальной оси установлены две секции полок, выполненных из плоских или гофрированных листов жесткого материала (стеклопластик) и образующих с каждой стороны 20 каналов, наклонных под углом 45° к горизонту. Длина полок – 2 м, высота каналов (ярусов) – 70 мм. Над секциями полок, несколько выше уровня воды, размещен горизонтально экран из плоских плит. В нижней части лотка размещено устройство для сбора и удаления осадка в виде кольцевой перфорированной трубы, а под экраном – кольцевой перфорированный трубопровод для отвода из резервуара охлажденной и осветленной воды.

В прямоугольных водосборных бассейнах секционных вентиляторных градирен целесообразно применять упрощенные устройства для удаления осадка в виде дырчатых труб.

Проекты градирен типа СК-1200 с тонкослойными отстойниками в водосборных бассейнах, разработанные Гипрокаучуком и Госхимпроектом по рекомендациям НИИ ВОДГЕО, реализованы в строительстве на нескольких предприятиях нефтехимической отрасли. Однако широкого распространения такие конструкции не получили из-за большей стоимости градирни и затрат на эксплуатацию и ремонт, а также увеличенных потерь оборотной воды при сбросе из бассейнов малоконцентрированного осадка.

12.5. Малогабаритные градирни типа "Росинка"

Градирни "Росинка" (см. рис. 2.6, *а*) разработаны и изготавливаются Научно-производственной фирмой "Техэкопром" (г. Москва) на базе научных исследований НИИ ВОДГЕО примерно с 1992 г. Обладая высокими эксплуатационными качествами благодаря специфичности конструкции, градирни этого типа за сравнительно короткий срок стали находить все большее применение в системах оборотного водоснабжения различных холодильных установок с расходом воды 5–500 м³/ч и более. Специфичность конструкции заключается в схеме распределения воды.

Традиционная схема – это расположение системы водораспределения над оросителем, чем обусловливается подача воды соплами на него сверху. При этом время контакта воды с воздухом определяется скоростью движения пленок воды по элементам оросителя (0,1–0,3 м/с в зависимости от плотности

орошения, профиля и состояния поверхностей), скоростью падения капель и брызг между элементами и высотой оросителя.

В градирнях "Росинка" водораспределитель расположен между ярусами (слоями) оросителя. При этом сопла направлены вверх. Такая схема распределения воды применима при конструкции оросителя в виде пространственной решетки, проницаемой для капель воды в любом направлении.

В градирнях "Росинка" применен капельно-пленочный ороситель из призм решетчатых ПР50 – двухпоточный (см. рис. 8.4, п. 17). Причем верхние 4–5 рядов призм верхнего яруса оросителя выполняют роль водоуловителя.

Контактной поверхностью тепломассообмена между водой и воздухом в оросителе ПР50 служит поверхность пленок на перемычках призм и капель, образующихся в пространстве между ними. Для пластмассовых оросителей поверхность пленок относительно невелика – около 50 м² в 1 м³ ПР50. Однако в результате эффективного распределения воды в его объемной решетчатой структуре (в верхнем ярусе вода проходит двойной путь) коэффициент массопередачи β_{xv} в зависимости от модели градирен "Росинка" составляет 13 300 – 22 000 кг/(м³ · ч × × кг/кг) в рабочем диапазоне гидравлических нагрузок $q_ж$ = = 13,9 ÷ 19,2 м³/(м² · ч) и скорости движения воздуха ω = 2,2 ÷ 2,5 м/с. Такой высокий показатель массоотдачи (для малогабаритных градирен β_{xv} обычно не превышает 15 000 кг/(м³ × × ч · кг/кг) достигается благодаря увеличенному времени контакта воды с воздухом, многократному дроблению капель и турбулизации пленок и капель потоком воздуха, что интенсифицирует процессы испарения, т. е. охлаждения воды.

При обычных климатических условиях европейской части страны в летний период перепад температур воды Δt на градирнях "Росинка" равен 5,6–8,8 °С при температуре нагретой воды t_1 = 32 °С и τ = 19 °С с глубиной охлаждения $t_\tau = t_2 - \tau = 4 \div 7$ °С. Другие градирни (см. рис. 2.6, 2.7) в этих же условиях охлаждают воду при $\Delta t = 5$ °С с $t_\tau = 7 \div 8$ °С.

Сопоставление охлаждающей способности градирен при одинаковых значениях t_1, τ и $q_ж$ можно проводить по температурному коэффициенту эффективности охлаждения воды K_t, равному отношению действительного перепада температур воды к максимально возможному перепаду при теоретическом пределе охлаждения τ, т. е.

$$K_t = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - \tau}. \qquad (12.3)$$

Являясь безразмерным относительным значением, коэффициент K_t в некоторой мере соответствует требованиям термического КПД градирни: для идеального процесса охлаждения ($t_2 = \tau$) значение $K_t = 1$, для реального ($t_2 > \tau$) коэффициент $K_t < 1$.

Для моделей градирен "Росинка" коэффициент K_t различен из-за неодинаковой в них плотности орошения при номинальном расходе воды и составляет для $t_1 = 32$ °С и $\tau = 19$ °С от 0,43 до 0,67. Для градирен других конструкций при тех же условиях $K_t \approx 0{,}38 \div 0{,}4$.

Для малогабаритных градирен, размещаемых преимущественно в черте городской застройки, следует принимать нижний предел капельного уноса, регламентированного для вентиляторных градирен, т. е. 0,05% и менее.

В процессе эксплуатации "Росинок" значение капельного уноса не превышает 0,002% расхода воды. Капельки воды эффективно задерживаются при многократном контакте с перемычками решеток ПР50 на выходе воздушного потока из градирни. Однако для балансовых расчетов безвозвратные потери воды за счет капельного уноса для градирен "Росинка" принимаются 0,01% с запасом на утечку воды через сальники насосов и арматуры.

Существенные проблемы при эксплуатации градирен вызывает отложение на оросителях солей карбоната кальция в виде накипи в комплексе с продуктами биологического происхождения, коррозии и пыли. Загрязнение оросителя, как правило, снижает охлаждающую способность градирни из-за увеличения аэродинамического сопротивления проходу воздуха и уменьшения его расхода. Часто по этой причине градирни выходят из строя. Солевым отложениям и загрязнению наиболее подвержены оросители из листов с малыми (до 10–16 мм) каналами для прохождения воды и воздуха.

В градирнях "Росинка" размеры ячеек призм ПР50 составляют примерно 20 × 30 мм (см. схему *16, д* на рис. 8.4). Загрязняться они могут лишь в особо неблагоприятных случаях – при высокой карбонатной жесткости воды, не прошедшей стабилизационную обработку, и наличии в воде механических примесей с концентрацией более 120 мг/л. В таких случаях оросители ПР50 легко, в течение 3–4 ч, демонтируются через открытый верх градирни, прочищаются и устанавливаются на место.

12.6. Градирни "Озон-400"

В соответствии с типовым проектом 901-6-105.93 градирня "Озон-400" площадью орошения 400 м² предназначена для применения в системах оборотного водоснабжения с расходом воды до 3300 м³/ч. Оборотная вода не должна содержать самовозгорающиеся примеси, масла, нефтепродукты и загрязнения, вызывающие трудноудаляемые отложения, а также не должна быть агрессивной по отношению к конструкциям градирни.

Отличительной особенностью градирни "Озон-400" от одновентиляторных градирен типа СК-400 площадью орошения 400 м², широко распространенных на нефтехимических предприятиях в особенности заводах синтетического каучука, является наличие трех вентиляторов марки ВГ-70 (рис. 12,4) вместо одного марки ВГ-104.

Градирня "Озон-400" представляет собой двенадцатигранник в плане, разделенный на три секции (сектора) перегородками из стеклопластика. Каждая секция снабжена индивидуальным вентилятором *1* и имеет индивидуальный подвод нагретой воды.

Водосборный бассейн, общий для трех секций, выполнен из монолитного железобетона. Несущий каркас выполнен из стальных прокатных профилей с обшивкой из листового стеклопластика. Система распределения воды *2* предусмотрена из полиэтиленовых напорных труб с установленными на них соплами раструбного типа, направленными факелами разбрызгивания вверх, ороситель *3* – из тонкостенных (0,9 мм) полиэтиленовых гоф-

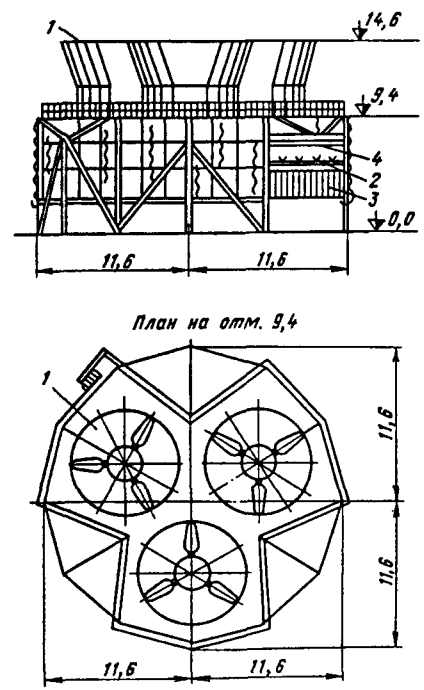


Рис. 12.4. Градирня "Озон-400" с площадью живого сечения орошения 400 м²

ротруб диаметром 63 мм, водоуловитель *4* – также из полимерных материалов.

Вентиляторы градирни работают в автоматическом режиме с включением и выключением отдельных секций для регулирования температуры охлажденной воды.

При привязке градирни "Озон-400" к конкретным условиям эксплуатации требуется замена примененного в типовом проекте устаревшего оросителя из гофротруб с невысокой охлаждающей способностью (см. табл. 8.3, п. 13) на более эффективные полимерные оросители, изготавливающиеся в настоящее время в Российской Федерации. В особенности конструктивно подходит для этой градирни двухпоточный ороситель (рис. 8.4, п. 17).

12.7. Применение градирен в процессах очистки воды

Вентиляторные градирни применяются в качестве пленочных дегазаторов для улучшения качества воды артезианских скважин. Использующиеся в дегазаторах контактные насадки в виде многослойных поддонов, загруженных кусками кокса, антрацита, керамическими кольцами Рашига, неудобны в эксплуатации из-за частого засорения взвесью и требуют высоконапорных вентиляторов для прокачки воздуха.

Для применения в качестве дегазаторов наиболее подходящими являются градирни с незасоряющимися, высокопроницаемыми пластмассовыми оросителями, обеспечивающими в то же время достаточно большую поверхность контакта воды с воздухом при интенсивной их турбулизации.

В зависимости от типа вентиляторной градирни на 1 м^3 охлаждаемой (аэрируемой) воды подается от 500–700 до 1000–1500 м^3 воздуха, что значительно больше требуемого относительного расхода воздуха для удаления из воды растворенных газов.

При использовании градирен в качестве водоподготовительных установок целесообразно эксплуатировать их с плотностью орошения 15–20 м^3/(м^2 · ч) и более.

На окисление 1 мг двухвалентного железа расходуется 0,143 мг кислорода. Процесс обогащения воды кислородом при непосредственном контакте ее с атмосферным воздухом в оросителе вентиляторной градирни происходит весьма интенсивно до полного насыщения – 11–12 мг/л O_2 при температуре артезианской воды 7–10 °С и атмосферном давлении. Для окисления, например, 30 мг/л Fe^{2+} в Fe^{3+} требуется 4,25 мг/л O_2. Процесс окисления железа кислородом завершается достаточно полно при обеспечении необходимого времени контакта в резервуаре после градирни.

В оборотной воде содержится, как правило, достаточное количество органических загрязнений. Они поступают в систему с добавочной водой и технологическими продуктами при неплотностях теплообменной аппаратуры.

Необходимое количество воздуха и благоприятная температура среды при наличии питательных веществ в охлаждаемой воде обусловливают образование на оросителе градирен биологической пленки, которая может быть использована для проведения процесса окисления органических веществ. В нашей стране градирни, специально эксплуатирующиеся в режиме биоокислителей, не применяются, а сам процесс окисления, протекающий в этих сооружениях, пока не вышел из стадии экспериментальных исследований. При этом на многих предприятиях при эксплуатации промышленных охлаждающих систем оборотного водоснабжения с градирнями наблюдается значительное улучшение санитарно-гигиенического состояния оборотной воды по сравнению с добавочной водой.

Основным сдерживающим фактором эксплуатации градирен специально в режиме биоокислителей является опасность загрязнения окружающей среды в районе расположения градирен выбросами вредных веществ с отработанным атмосферным воздухом, что требует разработки специальной конструкции градирни для проведения процессов окисления сточных вод. Другим важным фактором является то, что при подаче в систему оборотного водоснабжения недостаточно доочищенных по органическим загрязнениям сточных вод, из расчета на их окисление на охлаждающих градирнях, не решена проблема предотвращения биологических обрастаний теплообменного оборудования. Кроме того, не определена область применения градирен, как биоокислителей, их окислительная мощность в зависимости от категории сточных вод и др. При этом следует отметить, что никакое другое сооружение систем водного хозяйства промышленности, кроме градирен, не может осуществлять одновременно четыре функции – охлаждение воды, биохимическую очистку от органических примесей, отдувку летучих органических веществ и осветление путем отстаивания воды в водосборных бассейнах под градирней.

В технической литературе приводится качественный состав биоценоза биологической пленки на оросителе вентиляторных градирен нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий. Отмечается цикличность в формировании биоценоза. Биопленка нарастает до определенной толщины, обусловленной количеством питательных веществ в воде, затем отрывается от оросителя и смывается в водосборный бассейн градирни. В этот период ухудшается качество воды по ХПК и прозрачности. Максимальная длительность пребывания биоценоза биопленки на оросителе градирен составляет 20–30 сут. Степень биохимической очистки, %, на градирнях ориентировочно можно принимать: по эфироизвлекаемым – до 40; по ХПК – 36–29 и по $БПК_5$ – 40–50. Зависимость между ХПК воды до градирни (X) и ХПК на выходе из градирни (Y) для нефтеперерабатывающих предприятий: $Y = 0{,}695X - 12{,}859$; для заводов синтетического спирта $Y = 0{,}733X - 4{,}105$.

Абсолютное снижение $БПК_5$ при однократном прохождении оборотной воды через градирню для нефтеперерабатывающих предприятий составляет 20 – 40 мг/л, а для заводов синтетического спирта – 10–20 мг/л. Градирню в оборотной системе можно рассматривать как один из видов биологических окислителей с малой органической нагрузкой.

Перспективно использовать полимерные оросители ПР50 (см. рис. 8.4, схема 16), имеющие объемную решетчатую структуру, в качестве загрузки биофильтров и аэротенков при новом строительстве и модернизации станций биофильтрации и аэрации.

ГЛАВА 13

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ГРАДИРЕН

13.1. Общая часть

Требования к материалам, применяемым при строительстве и модернизации градирен, сформулированы в ряде нормативных документов. В настоящем справочном пособии считаем полезным привести следующие основные положения и рекомендации.

Строительные конструкции и технологическое оборудование градирен подвергаются интенсивному механическому воздействию потоков воды и воздуха в специфических условиях работы, вызывающих ускоренный их износ: влажность паровоздушной среды внутри градирни достигает 100% при температуре до 50 °С; температура воды, орошающей конструкции, составляет обычно до 50 °С, но на некоторых производствах достигает 60 °С и более; значительные внутренние напряжения в конструкциях, возникающие в зимнее время при замораживании в водонасыщенном состоянии пористых строительных материалов; попеременное увлажнение и высушивание конструкций в летнее время; изменение физико-химических свойств строительных материалов под воздействием агрессивных примесей, нередко присутствующих в оборотной воде и атмосферном воздухе, а также солнечной радиации; напряжения, возникающие в конструкциях от вибрации при работе вентиляторов и скоростного напора ветра.

Агрессивность воздействий усугубляется их циклическим характером, зависящим от климатических факторов (колебания наружних температур, изменения направления и скорости ветра, интенсивности солнечной радиации и др.) и технологических условий эксплуатации градирен (тепловой нагрузки, частоты и длительности перерывов в работе и др.).

При температуре оборотной воды более 50 °С для изготовления строительных конструкций и технологического оборудования градирен применяют материалы, способные работать в такой среде длительное время (15–20 лет) без разрушения, специальные меры защиты конструкций от температурных воздействий или предварительного охлаждения воды.

При особенно агрессивной по отношению к строительным материалам оборотной воде целесообразна ее обработка для исключения или уменьшения степени агрессивности.

Нагрузки, воздействующие на конструкции градирен, принято подразделять на основные и особые сочетания нагрузок. Основные сочетания нагрузок состоят из постоянных, длительных и кратковременных нагрузок. Особые сочетания нагрузок состоят из постоянных, длительных, кратковременных и одной из особых нагрузок.

К постоянным нагрузкам относятся: вес сооружения (вес несущих и ограждающих конструкций); вес и давление грунтов (насыпка и засыпка). К длительным относятся нагрузки: от водораспределительной системы; от оросителей и веса водяной пленки; от водоуловителей; от веса вентилятора, электродвигателя, конфузора и диффузора; от пыли; от снега, принимае-

мая по СНиП 2.01.07–85 с коэффициентами: 0,3; 0,5; 0,6 соответственно для III; IV; V и VI климатических районов.

К кратковременным нагрузкам относятся: масса людей, ремонтных материалов в зонах ремонта конструкций и оборудования; снеговая нагрузка, принимаемая по СНиП 2.01.07–85 с коэффициентами: 0,7; 0,5; 0,4 соответственно для III; IV; V и VI климатических районов; от наледей, образующихся на ограждающих конструкциях и оросителе; аэродинамическая от скоростного напора ветра.

Обледенение может возникнуть практически в любом месте ограждающих конструкций градирни, но чаще всего лед образовывается на конструкциях воздуховходных окон и нижнего сечения оросителя даже при применении специальных устройств для противообледенительной защиты, в особенности при их неисправности и неправильной эксплуатации (см. гл. 14.3).

Из опыта проектирования и эксплуатации вентиляторных градирен при средней зимней температуре наиболее холодной пятидневки ниже минус 10 °С как для каркаса в целом, так и для оросителя принимают расчетную равномерно распределенную нагрузку от обледенения по всей площади оросителя, равную 200 кг/м². При температуре от минус 10 до минус 5 °С эта нагрузка принимается равной 100 кг/м². При температуре выше минус 5 °С нагрузка от обледенения не учитывается. Нагрузку от обледенения не рекомендуется учитывать и при применении проверенных практикой надежных способов защиты воздуховходных окон и оросителя от образования льда.

Для башенных градирен дополнительная нагрузка от льда, образующегося на оросителе, принимается равной примерно 10% его собственного веса.

К особым нагрузкам относятся: сейсмические; от дебаланса ротора вентилятора; аварийая при отрыве лопасти у вентилятора.

Нормативные нагрузки с коэффициентами перегрузки и динамичности выдаются технологическими организациями в виде заданий на проектирование по стандартам или каталогам, а для нестандартного оборудования – в соответствии с паспортными данными заводов-изготовителей или по рабочим чертежам.

При проектировании и расчете строительных конструкций градирен учитывают коэффициент надежности, зависящий от класса ответственности зданий и сооружений.

Форма, габаритные размеры и расположение элементов строительных конструкций и технологического оборудования в значительной мере влияют на аэродинамическое сопротивление проточной части градирни, определяющей электропотребление электродвигателями вентиляторов и тягу башни, а в конечном счете ее охлаждающую способность. Элементы, расположенные внутри градирни, должны оказывать минимальное сопротивление проходящему через нее воздушному потоку. С этой целью необходимо стремиться, чтобы конструкции расположенные на пути воздушного потока, имели обтекаемую форму и гладкую поверхность. Учитывая, что аэродинамическое сопротивление элементов градирни можно достоверно оценить лишь в комплексном взаимодействии их друг с другом, при разработке новых конструкций градирен требуются их аэродинамические испытания на моделях или головных образцах в натуре.

Следует учитывать, что в зависимости от режима работы технологических аппаратов конкретный режим работы градирни в течение суток и года может быть различным. В типовых проектах вентиляторных градирен для усредненных условий применяется обычно общее число часов работы градирни в году – 7000, в том числе с вентилятором 4000. Разнообразие технологических режимов и климатических условий, в которых работают строительные и технологические конструкции градирен, а также разнообразие статических и динамических нагрузок создают предпосылки, а во многих случаях вызывают необходимость проработки нескольких вариантов проектных решений с применением различных строительных материалов.

Надлежит предусматривать доступ к водоуловителю, системе распределения воды и вентиляторной установке для ремонта и обслуживания путем устройства лестниц, входных дверей, решетчатых ходовых мостков и площадок, не создающих заметного препятствия проходу воздуха.

Строительные конструкции и технологическое оборудование могут быть из различных материалов, пригодных для работы в условиях градирен. При этом следует по возможности избегать применения асбестоцемента в обшивке, оросителях и водоуловителях из-за его канцерогенных свойств.

Водосборные бассейны градирен выполняются из монолитного или сборно-монолитного железобетона. По периметру бассейна предусматривается железобетонная розетка. Водо-

сборные бассейны – поддоны для вентиляторных градирен, располагаемых на кровлях насосных станций или производственных зданий, допускается выполнять стальными. Поддоны из стали выполняются также в градирнях малогабаритных и комплектно-блочного исполнения.

Аэродинамические козырьки, жалюзи поворотные, тамбуры, ветровые перегородки и перегородки между секциями (в вентиляторных градирнях) выполняются из листовой стали, дерева, стеклопластиковых или пластмассовых листов.

Выбор материалов для градирен и расчеты конструкций следует производить согласно рекомендациям пособия.

В настоящем справочном пособии не рассматриваются способы антикоррозионной защиты строительных конструкций и оборудования из-за большого их разнообразия и непрерывного совершенствования, а также по той причине, что эти способы защиты предусматриваются в проектах строящихся и реконструируемых градирен.

При необходимости возобновления антикоррозионной защиты конструкций при ремонте градирни следует руководствоваться СНиП 2.03.II–85, СНиП III–18–75 и положениями проекта, по которому построена градирня.

13.2. Ограждающие конструкции

Надежность работы и срок службы градирен в значительной мере определяются типом материала, прочностью и качеством исполнения ограждающих конструкций (обшивки). В зимнее время перепад температур снаружи и внутри градирни может достигать 60 °С и более, что создает значительные в них температурные напряжения.

При наличии неплотностей в обшивке, вследствие протечек через них воды, контактирующей с холодным воздухом, с внешней стороны ограждающих конструкций образуются наледи, разрушающие, как правило, обшивку в зоне этих неплотностей. Кроме того, неплотности в обшивке ухудшают режим работы вентилятора и снижают тягу башни, что приводит к ухудшению охлаждающей способности градирни. Щели общей площадью всего лишь 4% площади обшивки могут уменьшить расход воздуха через ороситель на 20%, что приводит к недоохлаждению воды не менее чем на 1 °С в зависимости от состояния воздуха, расхода воды и конструкции оросителя. Поэтому при

проектировании и строительстве градирен необходимо обращать внимание на обеспечение герметичности обшивки.

При температуре атмосферного воздуха примерно минус 20 °С и ниже лед интенсивно начинает образовываться на внутренней и внешней стороне устья вытяжной башни (в вентиляторных градирнях – диффузора) за счет выделения конденсационной влаги на их холодных поверхностях при контакте с нагретым насыщенным воздухом, выходящим из градирни. Куски льда при падении повреждают лопасти вентилятора, разрушают конструкции водоуловителя, системы распределения воды и оросителя. Разработаны специальные мероприятия для предотвращения обмерзания железобетонных оболочек и обшивных каркасных вытяжных башен (см. гл. 14.3).

Вентиляторы градирен в процессе разгонки, работы и остановки создают вынужденные колебания несущих конструкций. Параметры колебаний зависят от типа вентилятора, схемы установки (отсасывающая или нагнетательная) и режима его работы (частоты вращения). Эти колебания градирен не влияют на людей и производственные процессы, а оценивается лишь их влияние на несущую способность строительных конструкций градирен.

Динамические нагрузки от вентиляторов в эксплуатационном режиме могут значительно превышать значения, рекомендуемые заводами-изготовителями и принятые в типовых проектах. Необходимо обращать особое внимание на балансировку при их монтаже и ее проверку в процессе эксплуатации.

Поэтому при расчете несущих конструкций градирни необходимо учитывать резонансные области, создаваемые вентиляторной установкой. В некоторых случаях может рассматриваться возможность применения вибровыключателей.

Строительные несущие конструкции градирен могут быть выполнены из монолитного или сборно-монолитного железобетона, стали и дерева.

Вентиляторные градирни с железобетонным несущим каркасом могут быть применены в районах с расчетной температурой наружного воздуха –40 °С и выше (расчетная температура наружного воздуха принимается средней наиболее холодной пятидневки по СНиП 2.01.01–82 "Строительная климатология и геофизика"), кроме градирен, эксплуатируемых в условиях, когда оборотная вода агрессивна к сульфатостойкому бетону и происходит частая остановка градирен в течение суток или

недели из-за отрицательных температур атмосферного воздуха.

Вентиляторные градирни со стальным несущим каркасом могут быть применены: в местностях с расчетной температурой наружного воздуха ниже 40 °С; в случаях установки их на кровлях зданий и сооружений; в районах труднодоступных или отдаленных от предприятий, изготавливающих элементы сборных железобетонных конструкций; в случаях частой остановки работы градирен из-за отрицательных температур атмосферного воздуха (в течение суток или недели).

В башенных градирнях вытяжную башню из монолитного железобетона принимают в районах с расчетной температурой наиболее холодной пятидневки (–28 °С и выше). Такие башни проектируют гиперболической формы.

Стальной каркас башни каркасно-обшивных градирен принимают в районах с расчетной температурой наиболее холодной пятидневки, как правило, до –40 °С.

Вытяжные башни с металлическим каркасом и из сборных железобетонных панелей могут иметь различную форму в зависимости от размеров. Башни градирен малой и средней производительности (площадью орошения до 800–900 м²) проектируют пирамидальной формы, градирен большой производительности (площадь орошения 1000 м² и более) гиперболической или близкой к ней формы.

Вентиляторные градирни с деревянным несущим каркасом могут быть применены: при секции градирни площадью не более 64 м²; при оборотной воде или газовой среде, имеющих слабоагрессивную кислую среду; в районах, где древесина не является дефицитным материалом.

В башенных градирнях дерево для изготовления несущего каркаса не используется за исключением одного типоразмера – площадью 16 м².

В деревянном исполнении запроектированы открытые градирни.

Обшивка градирни с металлическим каркасом может быть выполнена из алюминиевых или стальных (оцинкованных) гофрированных листов толщиной не менее 1 мм, листового стеклопластика и железобетонных стеновых панелей. В отдельных случаях возможно применение обшивки из асбестоцементных волнистых листов усиленного профиля или деревянных антисептированных досок.

Для возможности осмотра, профилактического ремонта и окраски стального каркаса обшивочный материал к нему крепится с внутренней стороны градирни, а к каркасу из сборных железобетонных элементов и дерева – с внешней.

Асбестоцементные волнистые листы по ГОСТ 16233–77 применяются в районах с расчетной температурой пятидневки до –23 °С. При более низкой температуре обшивка выполняется из металлических листов или деревянных щитов.

Железобетонные стеновые панели применяются при отрицательных температурах (–30 °С и выше), при оборотной воде, не агрессивной к сульфатостойкому бетону, и работе градирни при отрицательных температурах без частых остановок в течение суток или недели.

При режимах работы с частыми остановками обшивка градирни выполняется металлической с соблюдением следующих условий: должны быть решены вопросы защиты алюминиевых листов от электрохимической, межкристаллитной, щелевой и кавитационной коррозии; стальные оцинкованные листы применяются преимущественно в вентиляторных градирнях и только при слабоагрессивных средах.

Из-за тяжелых температурно-влажностных условий эксплуатации градирен применяемые для устройства их ограждающих конструкций материалы в большинстве случаев не отвечают требованиям долговечности без дополнительных средств защиты.

По опыту эксплуатации градирен обшивка, как правило, выходит из строя значительно раньше, чем каркас, что примерно соответствует данным табл. 13.1.

Приведенный в табл. 13.1 срок службы асбестоцементной обшивки 15 лет соответствует условию обязательной пропитки листов на всю глубину петролатумом или каменно-угольным пеком. Без такой пропитки асбестоцементные листы начинают расслаиваться уже после 2–3 лет от начала эксплуатации.

Срок службы алюминиевой обшивки наибольший в сравнении с деревянной антисептированной и асбестоцементной, но и стоимость ее выше. Стоимость 1 м² этих обшивок соотносится как 1 : 0,62 : 0,33.

Большое преимущество в сравнении с деревом и асбестоцементом как материалами для обшивки градирен имеет стеклопластик. За счет его пластичности, легкости, высокой прочности на изгиб, широкого температурного интервала примени-

Таблица 13.1. **Срок службы каркасно-обшивных конструкций градирен по данным ЛОАТЭП**

Конструкция	Срок службы, годы
Металлический каркас без антикоррозионной защиты (неагрессивная среда)	15–20
Металлический каркас с регулярно возобновляемой антикоррозионной защитой	35
Деревянная неантисептированная обшивка	10
Деревянная антисептированная обшивка	15
Алюминиевая обшивка	20
Асбестоцементная обшивка	15

мости (табл. 13.3), а также стойкости к агрессивным средам увеличивается срок службы обшивки и при правильном монтаже и эксплуатации повышается ее герметичность.

Листы полиэфирного стеклопластика по ОСТ 6.II–390–75, используемые в качестве обшивки градирен, принимаются размерами: ширина 1200 мм; толщина 1,9 мм; шаг волны 125 мм; высота волны 51 мм; водопоглощаемость 0,7. Длина листов может достигать 4800 мм.

По данным исследований ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, срок службы обшивки из волнистых листов полиэфирного стеклопластика с учетом воздействия эксплуатационных и климатических условий для районов средней полосы России и Сибири составляет не менее 25 лет при условии, что напряжения в листах не превышают расчетных (130 МПа на изгиб и 62,5 МПа на растяжение).

Для повышения огнестойкости ограждающих конструкций целесообразно применять стеклопластик самозатухающего типа на основе полиэфирной смолы ПН-1С.

Научно-исследовательскими и проектными организациями предлагались и другие листовые материалы в качестве обшивки градирен: винизол, керопласт, гетинакс, стеклотекстолит и др. Однако по ряду причин практического применения они пока не получили.

Наиболее долговечными являются ограждающие конструкции градирен из железобетона. Можно рассчитывать на 35–40-летний срок их службы. В значительной мере разрушение железобетонных несущих опор и оболочки в зоне воздуховходных окон происходит из-за отсутствия защитных покрытий и несовершенства конструкции противообледенительных устройств.

В последние годы для обшивки каркасов вентиляторных градирен (в основном малогабаритных и секционных) стали использовать длинномерные профили типа ЭПЛ-200, имеющие ширину 200 мм, толщину 1,5 мм и длину до 11 мм. Они изготовляются из материала на основе поливинилхлорида с добавлением стабилизаторов, модификаторов, смазок и других компонентов, в основном отечественного производства. Минимальная температура атмосферного воздуха, при которой могут применяться профили ЭПЛ-200, составляет –30 °С. Стыковка профилей, прикрепляемых к каркасу вертикально, осуществляется при помощи имеющихся в их боковых гранях специальных пазов круглой формы в поперечном сечении. Однако из-за отсутствия достаточного опыта эксплуатации градирен с такой обшивкой в течение значительного времени выводы о пригодности работы ЭПЛ-200 в таком качестве делать преждевременно.

Для изготовления конфузоров и диффузоров вентиляторов используется преимущественно листовая сталь. Имеется положительный опыт эксплуатации секционных градирен с вентиляторами ВГ25, ВГ50 и ВГ70, в которых диффузоры выполнены из стеклопластика. В отдельно стоящих градирнях с вентиляторами диаметром 10,4 и 20 м конфузоры и диффузоры целесообразно изготавливать в монолитном или сборном железобетоне.

13.3. Технологическое оборудование

К материалам для изготовления оросителей и водоуловителей градирен предъявляются следующие требования:

срок службы 15–20 лет без разрушений и выщелачивания при соблюдении норм эксплуатации;

достаточная жесткость и прочность конструкции при малой толщине составляющих ее элементов (листы, рейки, планки и т. п.);

хорошая смачиваемость при относительно гладкой поверхности конструкций;

недефицитность и сравнительно невысокая стоимость.

Кроме того, в отдельных случаях материалы должны иметь повышенную огнестойкость.

В период 1950–85 гг. материалом для изготовления оросителей и водоуловителей вентиляторных градирен была древесина, а башенных – асбестоцемент и древесина. В те годы эти материалы при качественном изготовлении из них конструкций удовлетворяли требованиям по технологическим показателям и сроку службы, соответствующему нормативному сроку окупаемости капиталовложений для градирен. Однако древесина и асбестоцемент не позволяют совершенствовать конструкции и повысить эффективность работы градирен, увеличить срок амортизации и снизить затраты ручного труда.

Деревянные оросители и водоуловители приходят в полную негодность через 10–12 лет эксплуатации, а иногда и раньше из-за вымывания из них связывающего вещества – целлюлозы. В результате постепенно происходит разрушение древесины, а соответственно ухудшение технологических показателей. Этому в значительной мере способствует хлорирование оборотной воды, а также биологические и химические процессы, происходящие на поверхности древесины, находящейся во влагонасыщенном состоянии. Интенсивность химического разрушения древесины повышается с увеличением pH оборотной воды. Так, при увеличении pH с 5 до 9 основной материал оросителей – сосна – разрушается в 10–15 раз быстрее. Делигнификация деревянных изделий, обработанных специальными антисептическими растворами, замедляется и срок их службы увеличивается в 2 раза. При некачественной обработке (пропитке не на всю глубину) или при ее отсутствии, что нередко практикуется, деревянные оросители и водоуловители интенсивно разрушаются уже после 2–3 лет эксплуатации.

Стоимость оросителей из асбестоцементных листов и сохранность их технологических показателей за время работы во многом зависят от качества листов и сборки блоков, химического состава оборотной воды и уровня эксплуатации градирни. Следует отметить, что качество асбестоцементных листов в последние годы ухудшилось – они заметно начинают разрушаться (расслаиваются при попеременном замораживании и оттаивании) после 3–5 лет эксплуатации. Кроме того, на поверхности асбестоцементных листов иногда происходит выделение карбоната кальция в виде накипи, нарастание которой в комплексе с продуктами биологического происхождения и пылью из атмосферного воздуха приводит к уменьшению зазоров между листами оросителя и увеличению его массы. Вследствие этого

происходит снижение охлаждающей способности градирни за счет увеличения аэродинамического сопротивления проходу воздуха и соответственного уменьшения его расхода.

ЛОАТЭП приводит следующие данные по срокам службы оросителей (табл. 13.2).

Таблица 13.2. **Сроки службы оросителей**

Оросители	Срок службы, годы
Деревянные неантисептированные	6
Деревянные антисептированные	14
Асбестоцементные	15
ПНД (негорючая композиция)	Более 15

Примерно с 1980 г. в Российской Федерации с нарастающим объемом производства для изготовления оросителей и водоуловителей применяются полимерные материалы (пластмассы). Используется преимущественно полиэтилен низкого давления марки 273–79 стабилизированный сажей с повышенной стойкостью к термо- и фотоокислительному старению при переработке и эксплуатации и в меньшей мере – поливинилхлорид.

Пластмассы механически прочны, долговечны (при правильном выборе условий и надлежащей эксплуатации можно рассчитывать на 20–25 летний срок службы пластмассовых оросителей и водоуловителей), стойки к различным агрессивным средам и воздействию влаги, упруги и эластичны. По массе пластмассы для пленочного оросителя требуется в 10–15 раз меньше, чем асбестоцемента и в 3–4 раза меньше, чем дерева. Пластмассы легко поддаются прессованию, сварке, литью, экструзии, склеиванию. С помощью добавок-наполнителей пластмассам можно придавать различные желаемые физико-механические характеристики. Высокая технологичность обработки обеспечивает возможность изготовления из них изделий различных конструктивных форм и способствует индустриализации строительства. Указанные свойства пластмасс позволяют обеспечить конструкции градирен и повысить их эксплуатационные качества.

Вместе с тем пластмассовые конструкции подвержены биологической коррозии, для предотвращения которой в со-

став пластмасс вводят специальные присадки, например производные винила. В качестве антибактерицидных добавок к пластмассам применяют также производные трихлормеркаптанов и четвертичных нефтеновых солей аммония. Некоторые материалы горючи (табл. 13.3), что в общем случае не ограничивает применение конструкций из них в градирнях, а диктует лишь необходимость соблюдения правил противопожарной безопасности при проведении монтажных работ и эксплуатации градирен с такими конструкциями. Учитывая высокие технологические свойства ПНД фирмой "ЭКО-сервис К" проведены экспериментальные работы и начат выпуск оросителей из негорючей его композиции. Они дороже оросителей из полиэтилена обычных марок.

Поливинилхлорид по надежности от возгорания занимает первое место после асбестоцемента. Он характеризуется как трудновоспламеняемый и самозатухающий, для возгорания его необходимо инициирующее пламя.

Системы распределения воды в градирнях изготавливаются, как правило, из стальных труб. Срок их службы значительно превышает время работы оросителей и водоуловителей за редким исключением, когда система выходит из строя из-за солевых и других отложений на стенках труб при отсутствии стабилизационной обработки и очистки оборотной воды.

Существенный интерес представляет выполнение систем распределения воды в градирнях из пластмассовых труб. В сравнении со стальными они имеют меньшую массу, легко поддаются механической и тепловой обработке, обладают небольшим гидравлическим сопротивлением, стойкостью к коррозионному воздействию оборотной воды, а также в меньшей мере подвержены отложениям на их стенках минеральных солей и взвешенных веществ.

Проект вентиляторной секционной градирни с системой распределения воды из пластмассовых труб разработан Союзводоканалпроектом. Градирня предназначена для охлаждения морской воды. Особенностью конструкции системы является наличие в ней частых опор под трубами во избежание их прогиба от веса нагретой воды.

За последние 30 лет в нашей стране и за рубежом для изготовления сопел стали применять пластмассу: полиэтилен, полистирол и др.

Таблица 13.3. **Физико-механические свойства полимерных материалов**

Свойства материалов	Полиэтилен		Полипропилен (ПП)	Полиэфирный стеклопластик	Поливинилхлорид (ПВХ)		Полистирол
	ПНД	ПВД			Жесткий	Пластифицированный	
Физические							
Средняя плотность, г/см^3	0,96–0,97	0,92–0,93	0,9–0,92	1,4	1,38–1,43	1,28–1,38	1,01–1,06
Влагопоглощаемость за 30 сут, %	0,035	0,03	0,02–0,06	2,4	0,03	–	0,01–0,05
Механические							
Предел прочности, МПа, при:							
растяжении	7–24,5	22–32	25–35	60	15–55	10–16	27–45
сжатии	9–12	–	60–70	90	50–80	–	70–90
изгибе	7–17	20–35	56–110	130	90–100	–	60–80
Модуль упругости, МПа, при растяжении	150–250	550–800	900–1200	6000	3000–4000	–	1190–3280
Относительное удлинение при разрыве, %	550–700	400–800	300–500	1,7–2	10–15	200–280	10–35
Термические							
Температура плавления, °С	105–108	120–125	160–170	150–180	–	–	–
Морозостойкость, °С	Ниже –50	Ниже –50	0 ÷ –25	–	0 ÷ –30	–30 ÷ –60	Ниже –50
Температура текучести, °С	108–115	130–140	160–170	–	160	160–180	145–160
Температурный интервал применимости, °С	Ниже –50 ÷ + 50	Ниже –50 ÷ + 50	0 ÷ –25 ÷ + 90	–40 ÷ + 60	0 ÷ –30 ÷ + 50	Ниже –30 ÷ + 60	Ниже –50 ÷ + 60
Горючесть	Г	Г	Г	НГ	СМЗ	СМЗ	Г

Примечание. Г – горючий, НГ – негорючий, СМЗ – самозатухающий.

Сопла из пластических масс не подвергаются коррозии в условиях работы градирен, они проще и дешевле в изготовлении и имеют меньшую шероховатость внутренней поверхности, что при прочих равных условиях увеличивает их пропускную способность. При выделении из воды взвешенных частиц и минеральных солей отложения на поверхности таких сопел не образуются.

ГЛАВА 14

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГРАДИРЕН

14.1. Приемка градирен в эксплуатацию

Необходимо уделять внимание тщательной приемке градирен в эксплуатацию, своевременному техническому обследованию и поддержанию в рабочем состоянии строительных конструкций и технологического оборудования. Кроме того, необходимо поддерживать правильный водный режим в оборотной системе.

При приемке градирен в эксплуатацию нужно проверить соответствие выполненных работ проекту, обратив особое внимание на правильность основных размеров и высотных отметок отдельных элементов градирни, наличие проектного количества установленных разбрызгивающих устройств, запорно-регулирующей арматуры, противообледенительных устройств и т. п.; нужно проверить качество выполненных работ, в том числе отсутствие щелей и проемов в обшивке, надежность крепления листов, наличие антикоррозионного покрытия металлических конструкций, гидравлическую плотность трубопроводов и резервуаров, а также состояние установленной арматуры, воздухонаправляющих козырьков и ветровых перегородок, действие поворотных щитов. Особое внимание следует уделять качеству монтажа вентиляторных агрегатов, в частности, правильности их центровки и балансировки, обеспечению требующихся углов установки лопастей и указанных заводом зазоров между лопастями и корпусом вентилятора. Следует проверить мощность, потребляемую электродвигателем при

работе вентилятора с лопастями, установленными на указанные в паспорте оптимальный и максимальный углы. Все обнаруженные при приемке дефекты должны быть устранены до окончательной передачи градирни в эксплуатацию.

Для обеспечения нормальной эксплуатации градирен должна быть составлена соответствующая инструкция для обслуживающего персонала. Периодические осмотры градирен рекомендуется производить не реже чем один раз в месяц.

Ороситель должен равномерно заполнять все горизонтальное сечение градирни; при монтаже оросителя из отдельных блоков не должно оставаться промежутков, так как через них может устремиться воздух, минуя блоки. Необходимо устранить все повреждения конструкций оросителя и завалы их посторонними предметами (щитами, досками и т. д.), влияющие на равномерность распределения воды и воздуха. Стеснение живого сечения градирни вызывает перераспределение воздуха и воды и, как следствие, ухудшение работы градирни.

При наличии в градирне пластмассовых оросителей и водоуловителей не следует производить сварочные работы в местах непосредственной близости к ним во избежание возгорания.

Перед заполнением системы трубопроводов и резервуара градирни водой необходимо убрать строительный мусор и лишние предметы.

В период эксплуатации градирни должен быть организован сбор двух видов информации о ее работе.

Технологический вид информации включает: измерения и регистрацию в журнале температур нагретой и охлажденной воды, параметров атмосферного воздуха, расхода воды на градирню, данных о загрязнениях оборотной воды и их концентрации; сведения об эффективности работы отдельных элементов: оросителя, водоразбрызгивающих устройств, водоуловителя, противообледенительной системы и др.; вентиляторной установки – частота вращения, потребляемая мощность, наличие вибрации, режим и периодичность работы и др.

Строительно-конструктивный вид информации включает наблюдения с регистрацией в журнале за состоянием строительных конструкций и технологического оборудования градирни.

Программа сбора данных в эксплуатационных условиях должна тщательно планироваться и контролироваться.

Известно, что приблизительно до 50% случаев выхода из строя (отказов) инженерных сооружений и оборудования проис-

ходит по вине обслуживающего персонала вследствие необученности и плохой организации производства. В этой связи знание своего сооружения, в данном случае градирни, особенностей ее работы на базе систематической регистрации данных позволит более целенаправленно и с большим эффектом использовать трудовые и материальные средства на ремонт или реконструкцию.

14.2. Испытания градирен

Испытания градирен различных типов и видов сходны между собой по методике, применяемым измерительным приборам и приспособлениям. Отличаться они могут объемом выполняемых измерений в зависимости от поставленной цели и задачи испытаний.

Проверка соответствия охлаждающей способности и аэродинамической характеристики вентиляторной градирни расчетным условиям производится обычно при приемке градирен в эксплуатацию, а также с целью внесения необходимых коррективов в проекты. Перед началом испытаний на градирне следует устранить все строительные недоделки и нарушения конструкций, полученные во время эксплуатации. Проточная часть градирни должна быть очищена от биообрастаний, заиления и т. п., элементы водоуловителя, водораспределителя и оросителя должны быть расположены в строгом соответствии с проектом или техническими предложениями, а неисправные или поврежденные заменены. Следует обратить особое внимание на целостность обшивки и плотность швов. Дверные и другие проемы во время испытаний должны быть плотно закрыты. Живое сечение проточной части градирни и входные окна должны быть освобождены от посторонних предметов: досок, пристроек, дополнительных ходовых мостов и т. п.

Вентилятор должен быть приведен в рабочее состояние. Лопасти установлены под одинаковым фиксированным углом. Угол установки лопастей рекомендуется подобрать путем пробных пусков так, чтобы потребляемая электродвигателем мощность соответствовала паспортному максимальному КПД, или по крайней мере находилась в рабочей зоне мощности двигателя.

Недопустимо снижение гидравлической нагрузки ниже предела, при котором факелы разбрызгивания воды не перекрываются. При этом происходит неравномерное распределение воды по оросителю, сохраняющееся практически по всей его высоте. В тех случаях, когда снижение гидравлической нагрузки обосновано, нужно вносить соответствующие изменения в водораспределительные системы градирен: заменять принятые по проекту разбрызгивающие сопла на сопла меньшей пропускной способности, изменять тип, число, расстановку сопел и др.

Схема подвода воды к градирне должна обеспечивать возможность ее работы во время испытания с плотностью орошения, отличающейся на 10% расчетной, и с тепловой нагрузкой, отличающейся на 20% расчетной.

Для проверки работы градирни при приемке ее в эксплуатацию можно считать достаточным получение следующих данных: расхода воды, температуры воды на входе и выходе из градирни, температуры атмосферного воздуха по сухому и смоченному термометрам, поля скоростей и давлений воздуха перед вентилятором, мощности, потребляемой электродвигателем вентилятора, скорости и направления ветра, напора воды перед соплами, атмосферного давления.

Для оценки системы оборотного водоснабжения с градирней целесообразно иногда определять количество и температуру добавочной воды, количество взвешенных и растворенных веществ в циркуляционной и добавочной воде, которые могут вызвать отложения взвешенных веществ и солей, коррозию, биологические обрастания и др.

При аэродинамических испытаниях градирни измеряются скорость и направление ветра, а также температура наружного воздуха. Скорость ветра измеряется чашечным анемометром на уровне верхней части входных окон на некотором отдалении от нее – чтобы не было побочных воздействий. Желательно также измерить скорость ветра на уровне выхода из вентилятора (диффузора). Хорошие результаты могут быть получены, если скорость ветра составляет не более чем 75% средней скорости воздуха на выходе из вентилятора. Испытания не следует производить при скорости ветра на уровне верхней части входных окон более 5 м/с, если ветер меняет направление более чем на 45°, а также, если порывы ветра превышают на 2,5 м/с среднюю скорость потока воздуха во входных окнах во время измерений.

Направление ветра измеряеся флюгером в тех же точках,

что и скорость. Простейший флюгер – рейка с привязанной на конце легкой нитью.

Температура наружного воздуха по сухому и смоченному термометрам измеряется с помощью психрометра на расстоянии до 50 м от градирни. Измерения производятся в начале и конце. Психрометр помещается на высоте 1,5 м от земли в защищенном от воздействия прямых солнечных лучей и ветра месте.

Поток наружного воздуха всасывается в градирню через входные окна горизонтально, затем поворачиваясь к верху, проходит через ороситель, водораспределитель и водоуловитель. При проходе через эти элементы в зависимости от их конфигурации поток воздуха растекается и перераспределяется по сечению градирни. Конфигурация водоуловителя во многом определяет характер потока воздуха на входе в конфузор и подходе к вентилятору. В зависимости от конструкции и расположения решеток водоуловителя поток воздуха может быть закрученным, направленным вертикально вверх или иметь другие формы. Практически водоуловитель на входе в конфузор градирни работает по отношению к потоку воздуха как направляющий аппарат. Конфузор, на сколько это оказывается возможным, выравнивает за счет поджатия поток воздуха на подходе к вентилятору. Для уменьшения сопротивления выхода воздушного потока из вентилятора служит диффузор, который является частью вентиляторной установки и предназначен для выполнения трех задач:

1) повышения КПД вентилятора, в частности, за счет снижения потерь на удар при выходе воздуха и, как следствие, приводит к экономии мощности, расходуемой на его привод (на 12–20% и более);

2) снижения рециркуляции влажного горячего воздуха из вентилятора во входные окна градирни;

3) снижения шума, создаваемого вентиляторной установкой.

Измерения расхода воздуха на вентиляторной градирне могут быть выполнены в четырех местах: 1) на выходе потока воздуха из диффузора; 2) в сечении перед вентилятором, отстоящем от него на 0,5–1 м; 3) в сечении над водоуловителем на расстоянии 1–1,5 м от него; 4) во входных окнах.

Наиболее точные результаты могут быть получены в сечении перед вентилятором, однако выполнение измерений в этом сечении связано с определенными трудностями и не всегда безопасно.

С позиций меньшей трудоемкости и достаточной точности результатов лучше проводить измерения расхода воздуха крыльчатыми или чашечными анемометрами в сечении над водоуловителем на расстоянии 1–1,5 м от него. При меньшем расстоянии на результатах измерений может сказываться влияние аэродинамических следов элементов конструкций водоуловителя, а при большем расстоянии неудобно производить измерения.

Выбранное мерное сечение необходимо точно измерить в натуре на уровне устанавливаемой при измерениях оси анемометра. Площадь мерного сечения должна быть определена "в чистоте" – за вычетом всех площадей, находящихся в сечении конструкций градирни – опорная колонна вентилятора, стойки каркаса и т. п. Необходимо помнить, что ошибка в определении площади мерного сечения приведет к соответствующей ошибке в рачетах расхода воздуха.

Перед началом разметки измерительных точек рекомендуется оценить распределение потока воздуха по выбранной площади мерного сечения с помощью флюгеров или легких бумажек, подхватываемых потоком воздуха. Это делается для выявления наличия или отсутствия в мерном сечении "мертвых" зон и завихрений. "Мертвые" зоны могут образовываться над широкими лотками, в местах развала лопаток водоуловителя и т. п. Завихрения обычно образуются при неудачном раскладе решеток водоуловителя с наклонными лопатками, могут быть и другие причины.

Площадь "мертвых" зон должна быть вычтена из площади мерного сечения, так как воздух там не идет.

Влияние площади завихрений на площадь мерного сечения и расхода воздуха должно быть оценено с учетом направления результирующей скорости.

Число точек измерения скорости принимается в зависимости от степени неравномерности поля скоростей в мерном сечении. Очевидно, что чем больше искажено поле скоростей, тем больше точек измерения должно быть расположено в этом сечении. Расположение точек измерения во многом определяется формой мерного сечения. Способ обработки результатов (подсчета средней скорости) также влияет на число и размещение точек измерения.

Существует довольно много различных способов подсчета средней скорости и соответственно вариантов размещения и

числа точек измерения, в том числе и нормированных международными стандартами (ИСО).

Для измерения расхода воздуха в мерном сечении над водоуловителем градирни наиболее подходящим представляется линейно-логарифмический метод Чебышева как универсальный метод для симметричного, симметрично-неравномерного и неравномерного профилей скоростей в круглом кольцевом и прямоугольном сечениях. Он имеет широкое применение, предложен стандартами ИСО и в рекомендациях для производственных испытаний вентиляторов. Средняя по расходу скорость подсчитывается при этом методе как среднеарифметическое значение измеренных местных скоростей.

Например, мерное сечение над водоуловителем градирни СК-400 является кольцевым с отношением диаметра (радиуса r) опорной колонны под вентилятором к диаметру (радиусу R) градирни $r/R = 0{,}15$; это соотношение должно быть подсчитано по измерениям, проведенным в натуре (табл. 14.1).

Таблица 14.1. **Координаты точек измерения в кольцевом сечении при различных отношениях r/R**

Отношение радиусов r/R	Расстояние точек измерения от стенки конфузора в долях радиуса R при 4 точках на радиусе			
	1	2	3	4
0,1	0,04	0,2	0,4	0,70
0,15	0,04	0,19	0,39	0,67
0,2	0,04	0,18	0,38	0,64
0,3	0,04	0,18	0,36	0,58

Измерение целесообразно проводить на двух взаимно перпендикулярных диаметрах, т. е. на четырех радиусах при общем числе точек измерения равным 16. При этом диаметры (радиусы) с точками измерений не должны проходить через мертвые зоны или зоны завихрений.

Могут быть использованы и другие способы разметки точек измерения и подсчета средней скорости (расходной составляющей). Важно, чтобы они обеспечивали достаточно представительные и точные результаты при относительно небольших трудозатратах на измерения и подсчеты расхода воздуха.

При измерениях чашечным анемометром следует иметь в виду, что чашечный анемометр по своим конструктивным особенностям (отсутствие обечайки) измеряет полный вектор скорости независимо от его направления. В расчет количества воздуха проходящего через мерное сечение над водоуловителем входит только вертикальная составляющая этого вектора. Поэтому необходимо в точках измерения с помощью флюгера определить углы отклонения вектора скорости от вертикали для учета этого фактора при вертикальной составляющей и по ним – средней вертикальной составляющей скорости расхода воздуха.

Крыльчатый анемометр располагается перпендикулярно к плоскости вращения лопастей вентилятора, а не к потоку.

Аэродинамическое сопротивление градирни может быть определено путем измерения полных давлений в том же мерном сечении над водоуловителем и в тех же точках, что и измерение скоростей.

Для оценки потерь давления от этого сечения до вентилятора можно также произвести измерения полного давления на расстоянии примерно 1 м перед вентилятором. Для измерений полных давлений используются датчики полного давления (экранированные трубки Пито) или трубки Прандтля (пневмометрические трубки). Отсчеты перепадов давлений в трубках производятся с помощью микроманометров, соединенных с трубками резиновыми шлангами. При измерении полных давлений следует обращать внимание на возможные погрешности в случае отклонения потока от вертикали особенно возле стенки конфузора.

Коэффициент сопротивления градирни подсчитывается по формуле

$$\zeta = \frac{2gP}{\gamma_в \cdot \omega^2}, \qquad (14.1)$$

где P – среднее полное давление под вентилятором, кгс/м²; $\gamma_в$ – плотность воздуха, принимаемая равной 1,2 кг/м²; ω – средняя по расходу скорость движения воздуха подсчитанная из соотношения

$$\omega_{мер.сеч} F_{мер.сеч} = \omega F_{общ.гр}, \qquad (14.2)$$

$F_{общ.гр}$ – общая площадь живого сечения градирни внутри оболочки в свободном сечении над оросителем.

При безветренной погоде (штиле) расход воздуха через градирню может быть измерен во входных окнах с помощью чашечных анемометров. В расчет в этом случае берется горизонтальная составляющая вектора скорости. Разметку точек во входных окнах выполняют так, чтобы каждая из них была центром равновеликой площади свободного сечения входных окон. Точки измерения рекомендуется размещать в вертикальных мерных створах, расположенных равномерно по периметру градирни. Целесообразно принимать не менее 8 створов по 5 точек в каждом вертикальном створе, итого не менее 40 точек измерения. При подсчете расхода воздуха из общей площади живого сечения входных окон вычитается площадь живого сечения, занимаемая колоннами и другими конструкциями, если они имеются во входных окнах. При штиле расход воздуха по измерениям во входных окнах может быть измерен с достаточной для практики точностью. Однако при наличии ветра отклонения в значениях скоростей и соответственно расхода воздуха могут быть весьма существенны.

Обычно измерения производятся на "сухой" градирне (без подачи на нее воды) во избежание закупоривания капельками воды импульсных отверстий измерительных трубок. Сопротивление градирни при подаче на нее воды с различной плотностью орошения определяется пересчетом полученного по данным экспериментов значения ζ по формуле

$$\zeta = q_{ж}(h\zeta_{с.о} + 0{,}025L + 0{,}2), \qquad (14.3)$$

где L – половина расстояния по горизонтали, которое проходит воздух под оросителем; $\zeta_{с.о}$ – коэффициент сопротивления сухого оросителя высотой 1 м.

Количество воды, поступающей на градирню, измеряют с помощью диафрагмы или другими приборами. Диафрагма должна быть изготовлена и установлена на трубопроводе, подающем воду на градирню, в соответствии с Правилами 28–64. В качестве вторичного прибора может быть применен ртутный дифманометр ДТ-50, цифровой электронный или в крайнем случае водовоздушный П-образный дифманометр.

Температуру воды измеряют ртутными стеклянными термометрами или электротермометрами с ценой деления 0,1 °С (точность отсчета 0,05 °С) при прямом контакте с водой. Для этого на подающем трубопроводе монтируют выпускную трубку и в поток воды помещают термометр. Температура воды,

падающей в виде капель и брызг в сборный резервуар, почти всегда значительно колеблется и в любой точке резервуара неустойчивая. Поэтому температуру воды на выходе из градирни измеряют в сборных лотках, устанавливаемых под оросителем на уровне нижнего края входных окон и проходящих от центра (или от разделительной перегородки в секционных градирнях) до наружной кромки резервуара. Число лотков (не менее четырех) принимают в зависимости от размеров градирни, формы ее в плане и степени равномерности распределения температур воды в струях по площади под оросителем.

Полученные по данным испытаний значения подачи воздуха и потери давления вентилятора наносят на его заводскую характеристику. На эту же характеристику наносят результаты измерений мощности, потребляемой электродвигателем и подсчитанной на основе полученных данных КПД вентиляторной установки. Произведенное таким образом сопоставление паспортных данных вентиляторной установки с результатами испытаний ее работы на действующей градирне позволяет судить о режиме работы вентилятора, загрузке электродвигателя, правильности выбранного угла установки лопастей, возможности (в случае необходимости) повышения подачи или давления вентилятора или снижения количества потребляемой электроэнергии.

Отклонение скоростей воздуха в сечении перед вентилятором от средних значений по концентрическим окружностям обычно допускается не более 10%. Большие отклонения могут явиться причиной поломки лопастей вентилятора или снижения его КПД.

Оценку охлаждающей способности градирни производят путем сопоставления расчетных температур охлажденной воды с температурами, полученными при испытаниях, а также по коэффициентам массоотдачи. Последний способ является основным. Он позволяет производить относительную оценку охлаждающей способности градирни, когда условия ее работы при испытаниях отличаются от расчетных.

Коэффициенты массоотдачи β_{xv} по данным испытаний вычисляют по формулам, приведенным в гл. 4.

После подсчета значений β_{xv} строят график зависимости $Me = f(\lambda)$. Сопоставление результатов испытаний с линией, построенной по расчетным (проектным) данным, показывает насколько охлаждающая способность испытываемой градирни соответствует расчетным условиям.

Необходимо учитывать, что на охлаждающую способность градирни и соответственно на β_{xv} оказывают влияние степень равномерности распределения воздуха и воды по оросителю, степень раздробления воды на капли и пленки в оросителе, т. е. поверхность соприкосновения воды с воздухом, перепад температур воды и средняя температура воздуха. Поэтому испытания градирни следует производить в условиях, максимально приближающихся к расчетным.

Материалы испытаний градирни должны содержать:

краткое описание градирни: конструкция и материал оросителя, водоуловителя и водораспределителя; обшивки, ветровых перегородок, вентиляторной установки;

схему вертикального сечения градирни с указанием фактических размеров ее общей площади и координаты расположения мерного сечения;

схему градирни в плане с указанием точек измерения скорости ветра и его направления;

схему мерного сечения с разметкой точек и указанием конструкций могущих повлиять на результаты измерений;

ведомости измерений всех необходимых для расчетов величин, в том числе расхода воды, если аэродинамические испытания производились при подаче воды на градирню, температур нагретой и охлажденной воды, параметров атмосферного воздуха;

результаты подсчета расхода воздуха и полного давления с указанием при какой скорости и направлении ветра производились измерения, а также на "сухой" или "мокрой" градирне;

мощность, потребляемую вентилятором с указанием угла установки лопастей;

результаты измерений капельного уноса, если такие измерения производились.

Испытания башенной градирни в системах технического водоснабжения тепловых и атомных электростанций регламентированы инструкцией Минэнерго (ВСН 25-80). Эти испытания подразделяются в зависимоси от поставленной цели на: приемочные; эксплуатационные; балансовые исследования головных градирен.

Приемочные испытания градирни при вводе ее в эксплуатацию сводятся к определению фактической температуры охлажденной воды и сопоставлению с расчетным ее значением. Если фактическая температура охлажденной воды на выходе из градирни не превышает расчетное ее значение, то работу такой градирни можно признать удовлетворительной. В противном случае выявляются причины неудовлетворительного охлаждения воды с последующим их устранением и доведением работы градирни до расчетных параметров. Это и является целью приемочных испытаний. Эксплуатационные испытания градирни проводятся в процессе ее эксплуатации с целью контроля за работой градирни после проведения ремонтов и получения исходных данных, небходимых для составления графиков поддержания режима экономического вакуума со стороны циркуляционного водоснабжения.

В задачу испытаний головных градирен входят:

установление эффективности охлаждения воды в градирне, влияния действия ветра на работу градирни, а также отдельных ее частей (оросительное устройство, разбрызгивающее устройство, воздухораспределительное пространство и др.) при основных исследованиях;

определение значений опытных величин, входящих в число исходных данных для технологического расчета градирни (коэффициенты тепло- и массоотдачи, общий коэффициент аэродинамических сопротивлений и пр.) при специальных исследованиях;

определение величин, учитываемых в технологическом расчете градирни по данным лабораторных исследований (охлаждение воды в факелах разбрызгивания, оросителе и воздухораспределительном пространстве);

определение эффективности водоулавливания и коэффициента аэродинамического сопротивления установленного водоуловителя;

определение выпадения осадков из факела градирни (интенсивность выпадения, гранулометрический состав капель, длина и ширина зоны выпадения осадков).

На основании полученных результатов испытания головных образцов градирни производится оценка эффективности примененных оросителя, водораспределительной системы и водоуловителя.

14.3. Эксплуатация градирен в зимнее время

Поступление в градирни холодного атмосферного воздуха, даже с температурой близкой к 0 °С, приводит, как правило, к обледенению их конструктивных элементов, что значительно усложняет эксплуатацию.

Особенно интенсивно происходит обмерзание входных окон градирен. Образующиеся в период низких (минусовых) температур наружного воздуха наледи во входных окнах стесняют их проходное сечение, затрудняют, а иногда и прекращают проникновение воздуха в пределы градирен. В ряде случаев наледи распространяются внутрь градирен, что приводит к поломкам, а иногда и к обрушению оросителя.

При льдообразовании в проточной части градирни сокращается поверхность контакта охлаждаемой воды с воздухом, уменьшается расход воздуха и в результате ухудшается охладительный эффект этих сооружений. В вентиляторных градирнях уменьшение расхода воздуха, прокачиваемого через градирню, приводит к сдвигу "рабочей точки" на характеристике вентилятора ($G_в - H$) влево, а следовательно, к использованию этого оборудования при низких значениях КПД. Кроме того, наледи в оросителе, а также во входных окнах, могут быть причиной крайне неравномерной эпюры скоростей движения воздуха перед вентилятором, что может повлечь за собой повышенный износ и даже поломки ступицы и лопастей вентилятора. Нередко к этому нежелательному явлению приводит и образование наледей внутри градирни в конфузоре и диффузоре при эксплуатации градирни в зимнее время с неисправным водоуловителем.

Проблема предотвращения льдообразования является общей как для вентиляторных, так и для башенных градирен, и средства борьбы с этим нежелательным явлением могут быть в некоторой мере одинаковыми. В вентиляторных градирнях льдообразование может происходить интенсивнее, так как температура охлажденной воды у этого типа сооружений, как правило, ниже, а скорость движения воздуха выше (относительный расход воздуха λ больше), чем в башенных.

Зимняя эксплуатация башенных градирен является более сложной, что связано с трудностями регулирования в них расхода воздуха (башенного эффекта) и со значительно более неравномерным распределением воздуха по горизонтальному сечению из-за большей площади в сравнении с вентиляторными градирнями. Обобщение методов предотвращения льдообразования в градирнях по опыту эксплуатации и литературным данным показывает, что эти методы сводятся в основном к следующему:

1. Перераспределение воды по площади градирни – повышение плотности орошения в центральной части оросителя за счет полного прекращения подачи воды на его периферийную часть.

2. Создание повышенной плотности орошения – "водяной завесы" на периферии оросителя с уменьшением или полным прекращением подачи воды на его центральную часть.

3. Установка против входных окон на 0,5–0,7 м над уровнем земли на расстоянии 1,5–2 м от градирни разбрызгивающих устройств, через которые подается часть (25–30%) поступающей на градирню нагретой воды.

4. Установка разбрызгивающих устройств над верхней кромкой входных окон внутри градирни.

5. Прокладка трубопровода с разбрызгивающими устройствами на уровне верхней кромки входных окон снаружи градирни при подаче в него части (25–30%) нагретой воды.

6. Установка защитного экрана входных окон на расстоянии примерно 2 м от градирни при размещении верхней кромки экрана на уровне или несколько ниже (на 0,5–1 м) верхней кромки входных окон и при установке разбрызгивающих устройств по п. 5.

7. Устройство обогревающего трубопровода по периметру входных окон и по стойкам несущего каркаса при подаче в него части нагретой воды, поступающей на градирню.

8. Расположение крайних стоек опорной конструкции оросительного устройства внутри градирни на расстоянии 1,5–2 м от вертикальной плоскости входных окон.

9. Устройство над входными окнами плотного козырька (навеса) для улавливания воды, стекающей по внутренней поверхности обшивки, и для отвода этой воды во внутрь градирни.

10. Устройство наружных тамбуров перед входными окнами градирен, навесных щитов, перекрывающих часть входных окон, поворотных щитов во входных окнах и внутреннего экрана вытяжной башни.

11. Подача всей охлаждаемой воды на часть секций градирен

с полным отключением остальных, т. е. работа части секций с повышенными удельными гидравлическими нагрузками.

12. Подача всей охлаждаемой воды на все секции, но с выключенными вентиляторами.

13. Изменение режима работы вентиляторов – снижение их производительности посредством уменьшения частоты вращения электродвигателя, с помощью гидромуфт скольжения или изменения угла атаки лопастей вентилятора.

14. Реверс вентилятора – прокачка воздуха через ороситель в обратном направлении.

15. При остановке градирни – подача воды по байпасу в резервуар градирни.

16. Дополнительно к основной водораспределительной системе, располагаемой выше оросителя, – устройство нижней вспомогательной водораспределительной системы в воздухораспределительном пространстве под оросителем с размещением сопел равномерно по площади живого сечения градирни для работы факелами разбрызгивания, направленными вертикально вверх. Для этого целесообразно применять центробежные или струйно-винтовые сопла (см. табл. 8.3). При холодном атмосферном воздухе в нижнюю вспомогательную систему подается не менее 50% нагретой воды от расчетного расхода на градирню. При подаче в эту систему всей воды верхняя система выключается из работы.

Степень эффективности перечисленных методов зависит от условий эксплуатации градирни, состояния ее конструкции и метеорологических факторов и каждый из методов не является радикальным для всех случаев. Один и тот же метод может оказаться эффективным при одних условиях эксплуатации градирни в одном регионе и не давать эффекта при этих же условиях в другом. Это обстоятельство обусловливает необходимость поиска методов борьбы с обмерзанием градирен на конкретных промплощадках, чем и объясняется большое их разнообразие.

Следует также отметить, что проблема предотвращения обмерзания градирен не проста и может быть решена только при определенных затратах за счет некоторого удорожания стоимости градирни и увеличения эксплуатационных затрат в зимнее время.

Методы 11, 12 и 13 обеспечивают в большинстве случаев положительный эффект, причем в зарубежной практике широко

используются все три метода, а в отечественной практике применяется преимущественно метод 12 – отключение вентиляторов.

Эффективным методом (14) ликвидации наледей во входных окнах градирен является работа вентилятора в режиме реверса при полной или половинной скорости вращения лопастей. В этом случае воздух всасывается через верх градирни и выбрасывается через входные окна. При низкой температуре атмосферного воздуха каждый вентилятор должен работать в режиме реверса в течение 15–20 мин в каждые 2–3 ч. Если вентиляторы работают в реверсивном режиме более 30 мин, льдообразование может начаться на лопастях вентилятора, ступице и водоуловителе.

При реверсе необходимо учитывать, что выбрасываемый из входных окон теплый воздух может образовывать туман в районе расположения градирен и при прекращении реверса возможно образование инея и наледей на расположенных вблизи градирни сооружениях.

Метод 15 особенно рекомендуется для тех случаев, когда градирня работает периодически или при незначительных нагрузках в холодное время года. Он предусматривает при плотно закрытых входных окнах рециркуляцию воды в системе через водосборный бассейн, не прокачивая ее через ороситель градирни при пуске до тех пор, пока температура воды не достигнет примено 27 °С. Затем байпас закрывается полностью или частично и поток воды прокачивается через градирню, как это делается при нормальной эксплуатации.

Метод 16 оказался весьма удобным и эффективным для улучшения работы в зимний период вентиляторных градирен.

Поперечно-точные градирни в большей мере подвержены обледенению, чем градирни с противоточным движением воды и воздуха.

Для предупреждения обмерзания жалюзи входных окон поперечно-точных вентиляторных градирен может быть целесообразным выключение на зимний период крайних рядов насадков или сопел водораспределительного устройства и закрытие верхней части жалюзи.

При отсасывающих вентиляторах наличие водоуловителей и поднимающегося вверх теплого воздуха исключают возможность обмерзания самих вентиляторов. Однако при выключении отдельных секций градирен (при прекращении подачи на

них воды) вентиляторы могут покрыться льдом в результате конденсации на их поверхности пара и замерзании образующегося конденсата. В таких случаях до пуска вновь вентилятора в работу необходимо очистить от льда и прогреть секцию (пустить на нее воду).

Нагнетательные вентиляторы подвержены обмерзанию. Это может вызываться двумя причинами: попаданием на вентилятор водяных капель изнутри градирни, если он не отнесен на достаточное расстояние от оросителя, и рециркуляцией уходящего из градирни воздуха, содержащего мелкие капли воды (унос) и пар, который конденсируется при смешении с холодным наружным воздухом. В первом случае можно избежать обледенения лопастей вентилятора, выключив на зиму ближайшие к входным окнам сливные трубки или сопла водораспределительного устройства; во втором случае может быть применена смазка лопастей каким-либо составом, предохраняющим от обледенения. Следует указать, что неравномерное образование льда на лопастях может приводить к разбалансировке и вибрации вентилятора. В малогабаритных градирнях "Росинка" нагнетательный осевой вентилятор расположен в специальной трубе – воздуховоде, являющейся одновременно его обечайкой, что исключает обледенение лопастей.

14.4. Допустимая температура охлажденной воды

Тепловые расчеты градирен в зимний период эксплуатации – при минусовых температурах атмосферного воздуха, прежде всего связаны с оценкой экономии электроэнергии на подачу воды и воздуха и ограничением температуры охлажденной воды с целью предупреждения обледенения градирен при работе зимой.

Независимость технологических характеристик оросителей от параметров атмосферного воздуха обосновывает возможность расчетов градирен на зимние условия работы по общепринятой методике по формулам теории испарительного охлаждения воды, изложенной в гл. 4.

При этом методикой, естественно, не предусматриваются расчеты предельно допустимой температуры охлажденной воды $t_{2доп}$ при работе градирен зимой из условия предупреждения их обледенения.

Вообще, до настоящего времени отсутствует достаточно обоснованный метод расчета этой допустимой температуры.

В нормативных и проектных материалах принимается предельно допустимая температура охлажденной воды $t_{2доп}$ при минусовых температурах воздуха, равная 16 и 18 °С.

В. П. Щукин на основании расчетов градирни СК-400 рекомендует принимать $t_{2доп} = 7 \div 8$ °С при $\vartheta = -8 \div 12$ °С с постепенным ее повышением до 15 °С при понижении температуры воздуха ϑ до –30 °С. Ороситель этой градирни деревянный капельно-пленочный ($A = 0{,}324$ 1/м; $m = 0{,}733$; $h_{op} = 4{,}7$ м).

Г. Вистром (США) при длительных экспериментах на поперечно-точной градирне с расходом воды $G_ж = 36\,600$ м³/ч в диапазоне температур наружного воздуха τ от 26,7 до –28,9 °С и температур охлажденной воды t_2 от 43,3 до 4,4 °С установил допустимую температуру $t_{2доп} = 21{,}1$ °С из условий предупреждения льдообразования, т. е. эта допустимая температура значительно выше, чем для противоточных градирен.

Недостаточную эффективность ряда перечисленных противообледенительных устройств можно объяснить тем, что в большинстве случаев не только не устраняется, но и не уменьшается влияние основных причин образования льда, в числе которых на первом месте стоит переохлаждение воды в зоне входных окон. На условия льдообразования решающее влияние оказывают два параметра – температура атмосферного воздуха τ и его удельный расход λ. При прочих равных условиях интенсивность льдообразования зависит еще и от равномерности распределения воздуха по горизонтальному сечению градирни. В местах оросителя, где скорость воздуха больше, вероятность образования наледей повышается.

Параметр τ регулировке не поддается. Удельный расход λ в зимнее время рекомендуется уменьшать до значений, не превышающих 0,5 кг/кг за счет уменьшения расхода воздуха, соответствующего скорости движения в градирне 0,3–0,5 м/с или увеличения расхода воды до плотности орошения 15 – 20 м³/(м² · ч). Другими словами, при холодном атмосферном воздухе следует обеспечивать высокие тепловые нагрузки на всю площадь живого сечения градирни или на площадь, примыкающую к воздуховходным окнам, путем увеличения плотности орошения до указанного значения (например, за счет отключения отдельных секций или градирен, а также перераспределения воды по площади живого сечения в пределах

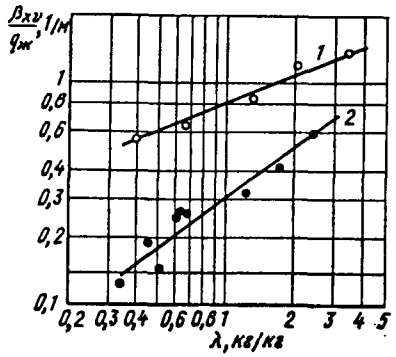


Рис. 14.1. Зависимость $\beta_{xv}/q_ж = f(\lambda)$ для оросителя из ПВХ высотой 1 м при противоточной и прямоточной схемах движения воды и воздуха:

1 – противоток (A = 0,805 1/м; m = 0,42; $\zeta_{с.о}$ = 13,49 1/м; $K_{ор}$ = 0,471 × × 10^3 м · ч/кг); *2* – прямоток (A = = 0,305 1/м; m = 0,76; $\zeta_{с.о}$ = 13,49 1/м; $K_{ор} = 0{,}07 \cdot 10^3$ м · ч/кг)

одной градирни), отвод оборотной воды от ограждающих конструкций в зоне расположения воздуховходных окон, применение средств противообледенительной защиты и др.

Для некоторых производств, например в нефтехимической отрасли, целесообразно охлаждать оборотную воду до 3–5 °С, чтобы использовать градирни зимой взамен холодильных установок. По данным исследований НИИ ВОДГЕО опытной градирни с пленочным оросителем из ПВХ, воду можно охладить до такой низкой температуры при работе вентилятора в режиме реверса с прямоточной схемой движения воды и воздуха в градирне. Вентилятор должен быть защищен от атмосферных осадков. При этом наледи на конструкциях градирни не образовывались в широком диапазоне условий работы: $q_ж = 4 \div 25$ м³/(м² · ч), $\lambda = 0{,}35 \div 2{,}6$ кг/кг, ϑ до –21 °С.

При обычном противоточном движении воды и воздуха с тем же оросителем получить указанную температуру охлажденной воды 3–5 °С не представлялось возможным из-за интенсивного обледенения градирни.

Наледи начинали образовываться при $q_ж = 8 \div 10$ м³/(м² · ч), $\lambda \approx 0{,}8 \div 1{,}2$ кг/кг и $t_1 = 35 \div 40$ °С еще при положительной температуре атмосферного воздуха, приближающейся к 0 °С.

Характеристики охлаждающей способности градирни при прямоточном и противоточном движении воды и воздуха, включающие охлаждение воды в оросителе, водораспределителе и воздухораспределительном пространстве, приведены на рис. 14.1.

14.5. Оценка работы градирен с выключенными вентиляторами

Системы оборотного водоснабжения относятся к крупным потребителям электроэнергии, расходуемой в основном на перекачку воды и подачу воздуха для ее охлаждения на градирнях. Количество потребляемой электроэнергии ориентировочно можно оценить из расчета, что на перекачку 1 м³/ч оборотной воды расходуется примерно 100 Вт, а на подачу 1000 м³ воздуха для охлаждения 1 м³/ч воды на вентиляторной градирне – примерно 50 Вт. Например, на типичном нефтеперерабатывающем заводе затраты электроэнергии, потребляемой только электродвигателями насосов и вентиляторов градирен оборотных систем, составляют в летний период 30–40% всех энергозатрат.

В зимний период целесообразно использовать естественный холод атмосферного воздуха для получения требуемой технологией производства температуры охлажденной оборотной воды. При этом все градирни или некоторая их часть по расчету может работать с выключенными вентиляторами, чем в значительной мере уменьшается обледенение сооружений и достигается экономия электроэнергии.

На предприятиях широко практикуется эксплуатация вентиляторных градирен в таком режиме.

НИИ ВОДГЕО провел испытания при отрицательной температуре атмосферного воздуха целого ряда градирен различных типов и видов при выключенных вентиляторах.

Установлено, что даже при положительной температуре атмосферного воздуха по сухому термометру примерно до 5 °С происходит в некоторых случаях образование наледей на элементах входных окон и оросителе. Чаще всего это наблюдается при сильной неравномерности распределения воды в горизонтальном сечении оросителя, неисправном водоотбойном козырьке и малой общей удельной плотности орошения градирни.

Скорость движения воздуха, м/с, в градирнях, работающих в режиме с выключенным вентилятором за счет естественной тяги вследствие разности температур (плотности) входящего и выходящего потока, по данным НИИ ВОДГЕО, можно принимать для градирен:

СК-1200	0,4–0,6
СК-400	0,3–0,5
Секционных с вентилятором	
ВГ25	0,2–0,3
ВГ-50	0,2–0,4
ВГ-70	0,3–0,5
Малогабаритных с вентилятором 0,6–300	0,15–0,3

Эта скорость воздуха в градирнях в сильной степени зависит от разности температур воды и наружного воздуха, а также скорости и направления ветра (дефлекторный эффект, см. гл. 11).

В табл. 14.2 приведены в качестве примера результаты расчетов рационального режима работы вентиляторов по расходу электроэнергии в течение года при работе трех градирен типа СК-400 с капельно-пленочными оросителями высотой 4,7 м при двух вариантах расхода оборотной воды: 9177 м³/ч (t_1 = 37 °С; t_2 = 27 °С; $q_ж$ = 8,05 м³/(м² · ч) и 5506 м³/ч (t_1 = 42,7 °С; t_2 = 26 °С; $q_ж$ = 4,83 м³/(м² · ч)). При расходе воды по обоим вариантам требовалось обеспечить охлаждение продукта с расходом 2 353 077 кг/ч; c = 2,1 кДж/(кг · К), с 110 до 32 °С в летний период при τ = 19 °С.

Расчеты выполнены по методике, в основе которой лежит решение уравнений, определяющих совместную работу теплообменных аппаратов и градирен. В результате расчета получено: площадь живого сечения охлаждения теплообменных аппаратов $F_{т.а}$ = 15 709 м², коэффициент теплопередачи $K_{т.а}$ = 268 Вт/(м² · К), тепловая нагрузка W = 106 728 МВт/м².

Из табл. 14.2 следует, что можно получить довольно большую годовую экономию электроэнергии, если регулировать подачу воздуха вентиляторами в зависимости от температуры воздуха τ. Так, при расходе воды 9177 м³/ч максимальный расход электроэнергии 245 тыс. кВт·ч, естественно, приходится на самый жаркий месяц года – июль. Минимальный расход 58 тыс. кВт·ч приходится на январь, т. е. в 4,2 раза меньше максимального. В зимние месяцы практически может работать вентилятор только на одной градирне даже не с максимальной частотой вращения. На остальных двух градирнях охлаждение воды обеспечивается за счет воздуха в количестве 500 тыс. м³/ч, проходящего через градирню при скорости ω = 0,34 м/с в результате башенного эффекта. Еще более значительную экономию электроэнергии можно получить, если

Таблица 14.2. **Потребление электроэнергии вентиляторами градирен в зависимости от среднемесячных температур атмосферного воздуха τ, °С**

Месяц	τ, °С	Градирня № 1				Градирня № 2				Градирня № 3				Потребление электроэнергии вентиляторами, тыс. кВт/ч, при:	
		$G_в$, тыс. м³/ч, при:		Мощность вентилятора N, кВт, при:		$G_в$, тыс. м³/ч, при:		Мощность вентилятора N, кВт, при:		$G_в$, тыс. м³/ч, при:		Мощность вентилятора N, кВт, при:			
		II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I
I	–10	2100	1760	78	55	500	500	–	–	500	500	–	–	58	40
II	–9,4	2100	1760	78	55	500	500	–	–	500	500	–	–	52	36
III	–5,1	2100	2100	78	78	500	500	–	–	500	500	–	–	58	58
IV	2,4	3000	2760	158	130	500	500	–	–	500	500	–	–	113	936
V	8,6	3000	3000	158	158	1450	950	33	14	500	500	–	–	142	127
VI	12,8	3000	3000	158	158	2460	1760	102	55	500	500	–	–	187	153
VII	15,0	3000	3000	158	158	3000	2100	158	78	950	500	14	–	245	175
VIII	14,0	3000	3000	158	158	3000	2100	158	78	500	500	–	–	235	175
IX	9,1	3000	3000	158	158	1760	1160	55	20	500	500	–	–	155	128
X	3,2	3000	2760	158	130	500	500	–	–	500	500	–	–	117	96
XI	–2,5	2760	2460	102	102	500	500	–	–	500	500	–	–	73	73
XII	–7,6	2100	2100	78	78	500	500	–	–	500	500	–	–	58	58
												Итого:		1496	1218

Примечание. II – расход воды $G_ж$ = 9177 м³/ч (работают два насоса); I – расход воды $G_ж$ = 5506 м³/ч (работает один насос).

регулировать подачу воздуха вентиляторами не по среднемесячным, а по среднесуточным температурам.

При расчетах теплообменных аппаратов иногда принимается неоправданно низкая температура горячей воды t_1, что приводит к нетребуемому большому резерву расхода воды насосами и непроизводительному расходованию электроэнергии на ее перекачку. Свидетельством этому могут служить данные табл. 14.2.

Экономию электроэнергии в больших размерах можно достигнуть при совместном регулировании работы вентиляторов градирен и насосных агрегатов по температуре воздуха по смоченному термометру τ. Такое регулирование можно осуществлять отключением отдельных насосных агрегатов (табл. 14.2), дросселированием (прикрытием задвижек на напорных линиях) или регулированием частоты вращения электродвигателей, табл. 14.3.

Таблица 14.3. **Возможное достижение годовой экономии электроэнергии при совместном регулировании режимов работы насосных агрегатов и вентиляторов градирен (данные НИИ ВОДГЕО)**

Способ регулирования		Годовая экономия электроэнергии, %
насосов	вентиляторов	
Дросселирование	Двухчастотное	23
То же	Плавное регулирование частоты вращения	31
Двухчастотное	Двухчастотное	39
То же	Плавное регулирование частоты вращения	45
Плавное регулирование частоты вращения	Двухчастотное	49
То же	Плавное регулирование частоты вращения	55

При всяком регулировании подачи воды следует поддерживать гидравлический режим работы градирни, обусловливающий достаточный напор воды перед соплами в пределах их рабочих характеристик. В зимних условиях при этом плотность орошения градирни должна поддерживаться из условия предотвращения образования льда на ее элементах.

14.6. Ремонт градирен

Система планово-предупредительного ремонта градирен, а также сооружений и оборудования водооборотных циклов – это совокупность организационно-технических мероприятий, осуществляемых периодически по заранее составленному плану для предупреждения преждевременного износа и аварий с целью обеспечения обслуживаемых производств оборотной водой требуемого качества и количества.

Ремонты бывают трех видов: планово-предупредительный (текущий), аварийно-восстановительный и капитальный. Выполняются еще профилактические ремонты, входящие в обязанность дежурного обслуживающего персонала, и проводятся без отсрочки по мере возникающей необходимости.

Текущие ремонты планируются ежегодно. Аварийно-восстановительный ремонт возникает внезапно, главным образом из-за несоблюдения правил технической эксплуатации. Капитальный ремонт осуществляется через 7–8 лет и более после постройки градирни. Обычно под капитальным ремонтом подразумевается реконструкция градирни, выполняемая согласно дефектным ведомостям технического осмотра. В зависимости от состояния градирни ее реконструкция может быть совмещена с модернизацией, т. е. с использованием новых прогрессивных технических решений.

При реконструкции (модернизации) градирни по заранее выполненному проекту чаще всего заменяется ороситель, водоуловитель и водоразбрызгивающие устройства и вентилятор, реже – обшивка, несущие и опорные конструкции.

В нашей стране реконструкция вентиляторных градирен в таких отраслях промышленности, как химическая, нефтехимическая, минеральных удобрений, машиностроительная и других отраслях, осуществляется с использованием научных разработок ВНИИ ВОДГЕО, а башенных ТЭС и АЭС – ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и НИИ ВОДГЕО.

Наиболее важной проблемой при этом является разработка и внедрение эффективных конструкций из полимеров, прежде всего технологических элементов – оросителей, водоуловителей и водоразбрызгивающих сопел с целью повышения надежности, долговечности работы этих элементов и экономии энергозатрат путем уменьшения высоты подачи воды на градирни, напора воды перед соплами и сокращения потерь оборотной воды с капельным уносом.

При тепловых и аэродинамических расчетах реконструируемых градирен плотность орошения и число градирен обычно являются заданными. Поэтому цель расчетов состоит в определении высоты оросителя выбранной конструкции, обеспечивающей восстановление проектной охлаждающей способности градирни в соответствии с требованиями технологии производства к температуре охлажденной воды. При этом в большинстве случаев производится замена разрушенных деревянных оросителей на оросители из полимерных материалов.

Особенностью является то, что новый ороситель должен быть вмонтирован в существующую высотную схему градирни и обеспечивать эквивалентный или больший теплосъем по сравнению с заменяемым оросителем.

Это условие может быть выполнено, когда число испарения Меркеля нового оросителя равно или больше числа испарения Меркеля заменяемого оросителя, т. е.:

$$(A h \lambda^m)_{нов} \geqslant (A h \lambda^m)_{зам}. \qquad (14.4)$$

Подбор пластмассового оросителя с соответствующими ему характеристиками A и m производится на основании тепловых и аэродинамических расчетов градирни.

Вместо асбестоцементных и деревянных оросителей пока преимущественное применение находят полиэтиленовые оросители, изготавливающиеся в нашей стране в достаточно большом объеме – из призм решетчатых ПР50, Бальке-Дюрр, а также трубчатые, сетчатые и перегородчатые типа БОС ПНД и БОП ПНД. Все большее применение с развитием производства находят оросители из поливинилхлорида – ТПВ, ТПВВ и др. (гл. 8.1).

В качестве водоуловителей чаще всего используются конструкции из профилей поливинилхлорида в виде полуволны и уголковый, трапециевидный и ПР50 из полиэтилена (см. гл. 8.2).

Основным типом разбрызгивающих устройств при реконструкции систем распределения воды вентиляторных градирен являются тангенциальные сопла из полиэтилена, а башенных градирен – чашечные с тремя державками отражателя и сферозубчатые (см. гл. 8.3).

При реконструкции градирен используется весь набор вентиляторного оборудования, приведенного в гл. 6.2. Кроме того, в небольшом объеме на некоторые предприятия поступают вентиляторы по закупкам у зарубежных фирм.

В качестве обшивки каркасно-обшивных башенных и вентиляторных градирен хорошо зарекомендовали себя листовые материалы из волнистого стеклопластика, профилированных листов ПВХ и гофрированного алюминия.

ГЛАВА 15

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГРАДИРЕН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проекты вентиляторных и башенных градирен разрабатываются СОЮЗВОДОКАНАЛПРОЕКТОМ и ЛОАТЭП, по данным исследований НИИ ВОДГЕО и ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, с соблюдением общетехнических требований надежности работы градирен, соответствующих категории водопотребителя и местным условиям. При этом количественная оценка уровня надежности в проектах не производится из-за отсутствия показателей надежности градирен.

Следует отметить, что наука о надежности, занимающаяся, в частности, определением долговечности работы различных технических систем и сооружений, в области промышленного водоснабжения пока достаточного развития не получила. ГОСТ 27.002–89 (М.: Госкомстандарт СССР, 1990) по надежности в технике на строительную отрасль не распространяется. Между тем применительно к системам коммунального водоснабжения понятие надежности было сформулировано в нашей стране еще в 70-х годах.

Методы оценки и обеспечения надежности водопроводных сетей и сооружений в основном нашли свое отражение в монографиях Н. Н. Абрамова и Ю. А. Ильина. В них дан вывод зависимостей показателей бесперебойной работы водопроводов, гарантирующих транспортировку воды потребителям, и рассмотрены вопросы практического решения задач обеспечения надежности и качества коммунального водоснабжения. Вопросы надежности градирен в этих монографиях, а также в другой технической литературе не рассматриваются.

Разработанные методы в полной мере могут быть применены и для оценки надежности охлаждающих систем оборотного водоснабжения, поскольку в таких системах используется многое однотипное с коммунальным водопроводное оборудование и сооружения – насосы, трубы, арматура, фильтры, хлораторы

и др. Но для этого требуются также данные о показателях надежности градирен – одних из основных сооружений оборотного водоснабжения.

На современных химических, нефтехимических и других производствах, ТЭС и АЭС номенклатура оборудования и сооружений более разнообразна и технически сложнее, а круг вопросов, связанных с обеспечением надежности водоснабжения значительно шире. Это обстоятельство обусловливает необходимость накопления данных о надежности работы оборудования и сооружений, в том числе градирен, по результатам длительных наблюдений и исследований в процессе эксплуатации.

Под надежностью градирни подразумевается ее свойство в период нормативного срока окупаемости капиталовложений обеспечивать заложенные в проекте технологические, экономические и экологические показатели при соблюдении норм эксплуатации.

В настоящее время широко распространены так называемые элементные методы расчета надежности, которые исходят из предположения, что техническая система или сооружение состоит из самостоятельных, в смысле надежности, элементов. Отказом элемента считается выход его параметров (гидравлических, механических, тепловых и др.) за пределы, при которых он частично или полностью перестает выполнять свои функции. Это влечет за собой нарушение исходной технологической функциональной взаимосвязи его с другими элементами и переход сооружения в целом на более низкий уровень работоспособности или в полностью неработоспособное состояние.

По характеру процессов проявления отказы могут быть внезапными или постепенными. Градирням, как и другим строительным сооружениям, в большей мере свойственны постепенные отказы составляющих элементов (оросителей, ограждающих конструкций и др.), обусловленные плавным ухудшением технологических характеристик в результате старения и износа в тяжелых температурно-влажностных условиях работы, которые имеют место в градирнях. Внезапный отказ градирни может быть вызван выходом из строя механического или электрического оборудования вентилятора, дебалансом его крыльчатки, обледенением входных окон и оросителя, разрывом трубопроводов, а также в результате таких непредсказуемых событий, как возгорание конструкций и др., которые в настоящей работе не рассматриваются. Свойство горючести некоторых материалов – дерева, отдельных видов пластмасс, например полиэтилена, в общем случае не ограничивает их применение, а диктует лишь необходимость соблюдения правил противопожарной безопасности при проведении монтажных работ и эксплуатации градирен.

Основной количественной характеристикой надежности технической системы является вероятность безотказной работы $p(t)$, т. е. вероятность того, что в планируемом интервале времени t при заданных режимах эксплуатации отказа системы не произойдет. Параметр $p(t)$ представляет значения чисел от 0 до 1. Для теоретически абсолютно надежной системы $p(t) = 1$. Скорость изменения вероятности безотказной работы системы характеризуется интенсивностью отказов $\lambda(t)$ в интервале времени $t + \Delta t$. Параметр $\lambda(t)$ измеряется в $ч^{-1}$ для оборудования и сооружений и в $(ч \cdot км)^{-1}$ для трубопроводов (лотков). Высоконадежным элементам свойственны малые значения $\lambda(t)$, $0{,}1 \cdot 10^{-4}\ ч^{-1}$ или $(ч \cdot км)^{-1}$ и менее.

Продолжительность работы (время наработки) отдельных элементов, ч, составляющих систему, до первого отказа

$$T_o = 1/\lambda. \tag{15.1}$$

Когда отказы отдельных элементов происходят в пределах некоторого периода времени, пользуются значениями λ_{min}, $\lambda_{ср}$ и λ_{max} – соответственно минимальная, средняя и максимальная интенсивность отказов.

По теории надежности отказ отдельных элементов, составляющих любую систему, является событием случайным и независимым, при этом вероятность безотказной работы p за промежуток времени t системы в целом

$$p(t) = p_1 p_2 \ldots p_n = \prod_{i=1}^{n} p_i(t), \tag{15.2}$$

где p_i – вероятность безотказной работы i-го элемента; n – число элементов.

Применительно к градирням такими элементами являются строительные конструкции и технологическое оборудование, перечень которых приведен в табл. 15.1.

Вероятность безотказной работы системы (градирни) представляет собой экспоненциальную функцию вида:

Таблица 15.1. **Интенсивность отказов элементов градирен**

Элемент и материал, из которого он изготовлен	Интенсивность отказов $\times 10^4$, $ч^{-1}$		
	λ_{min}	$\lambda_{ср}$	λ_{max}
Ограждающие конструкции:			
монолитный железобетон p_1	0,03	0,04	0,05
сборные железобетоиные элементы p_2	0,04	0,05	0,06
Несущий каркас:			
монолитный или сборный железобетон p_3	0,04	0,05	0,07
сталь профильная p_4	0,04	0,06	0,11
дерево (антисептированное) p_5	0,07	0,09	0,11
Обшивка:			
алюминий (гофрированные листы) p_6	0,04	0,05	0,07
сталь оцинкованная (гофрированные листы) p_7	0,07	0,09	0,11
сталь листовая ($\delta = 3$ мм) p_8	0,07	0,09	0,11
стеклопластик полиэфирный (гофролисты) p_9	0,04	0,05	0,07
асбестоцемент (гофрированные листы) p_{10}	0,07	0,11	0,23
дерево (антисептированное) p_{11}	0,06	0,08	0,11
дерево (неантисептированное) p_{12}	0,1	0,16	0,23
Конфузор, сталь листовая ($\delta = 4$ мм) p_{13}	0,05	0,07	0,1
Диффузор:			
сталь листовая ($\delta = 4$ мм) p_{14}	0,05	0,07	0,1
стеклопластик полиэфирный p_{15}	0,04	0,06	0,09
Опорный каркас:			
железобетон p_{16}	0,05	0,06	0,07
сталь профильная p_{17}	0,05	0,08	0,11
дерево (антисептированное) p_{18}	0,08	0,1	0,14
Вентиляторы:			
марки ВГ p_{19}	0,11	0,45	0,76
06-300 общепромышленного назначения p_{20}	0,14	0,23	0,57
Оросители и водоуловители[1]:			
полиэтилен низкого давления p_{21}	0,05	0,07	0,09
поливинилхлорид пластифицированный p_{22}	0,06	0,08	0,11
стеклопластик полиэфирный (гофролисты) p_{23}	0,05	0,06	0,08
асбестоцемент (плоские листы) p_{24}	0,07	0,11	0,23
дерево (антисептированное) p_{25}	0,07	0,09	0,14
дерево (неантисептированное) p_{26}	0,14	0,23	0,4
Система распределения воды[2]:			
трубчатая, сталь p_{27}	0,06	0,08	0,11
лотковая; железобетон p_{28}	0,07	0,09	0,11
дерево p_{29}	0,11	0,19	0,4

Продолжение табл. 15.1

Элемент и материал, из которого он изготовлен	Интенсивность отказов $\times 10^4$, $ч^{-1}$		
	λ_{min}	$\lambda_{ср}$	λ_{max}
Водоразбрызгивающие устройства[1], полимерные материалы:			
сливные трубки с розетками p_{30}	0,19	0,25	0,4
сопла:			
ударные с державками отражателя и многотарельчатые p_{31}	0,14	0,19	0,23
тангенциальные, эвольвентные и раструбные p_{32}	0,09	0,1	0,11
струйно-винтовые p_{33}	0,23	0,32	0,57
Водосборный резервуар, железобетон p_{34}	0,03	0,04	0,05
Водосборный поддон, сталь ($\delta = 4$ мм) p_{35}	0,07	0,09	0,11
Другие конструкции (кольцевой обогревающий трубопровод с разбрызгивателями воды, тамбур, поворотные щиты, аэродинамический козырек, ветровые перегородки, секционные перегородки)[1] p_{36}	0,11	0,16	0,23

[1] Учитываются как один элемент.

[2] То же, без деления на размеры труб (лотков) и без учета их длины.

для оборудования и строительных конструкций

$$p(t) = e^{-t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i}; \qquad (15.3)$$

для трубопроводов (лотков)

$$p(t) = e^{-t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i l}, \qquad (15.4)$$

где $t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ и $t \sum_{i=1}^{n} \lambda_i l$ – интенсивность отказов элементов системы за время t, $ч^{-1}$ и $(ч \cdot км)^{-1}$; l – длина трубопроводов (лотков), км.

Показатели $\lambda(t)$ определяются на основании специальных испытаний, проведения экспериментов или сбора данных по

наблюдению за работой системы и ее элементов в течение длительного времени эксплуатации.

С повышением вероятности безотказной работы $p(t) \to 1$ увеличивается стоимость строительства и эксплуатации градирен. Поэтому можно достичь состояния, когда затраты на повышение надежности не компенсируются прибылью от улучшения их работы. Следовательно, надежность градирен является технико-экономической категорией и должна иметь в каждом конкретном случае свой уровень. На основании многолетнего опыта проектирования и эксплуатации этот уровень надежности для градирен ограничивается при технологических расчетах их размеров (площади) обеспеченностью параметров атмосферного воздуха, принимаемой 1, 5 и 10% соответственно для I, II и III категории водопотребителя, а также проектной глубиной охлаждения оборотной воды $t_2 - \tau$ (4 – 5 °С для вентиляторных градирен и 8 – 10 °С для башенных).

Градирни в процессе работы постоянно воспринимают внешнее возмущающее воздействие, выражающееся в изменении температуры и влажности атмосферного воздуха не только по сезонам года, но и в течение суток. Через 2–3 цикла прохождения оборотной воды по системе температура нагретой и охлажденной воды на градирнях, а также температура охлажденного продукта в теплообменных аппаратах или значения вакуума в конденсаторах приходит в соответствие с изменившимися погодными условиями. При этом режим работы производственного оборудования не должен выходить за пределы норм в период всего расчетного срока службы градирен, кроме 1, 5 или 10 дней в году, соответствующих принятой обеспеченности параметров атмосферного воздуха для I, II или III категории водопотребителя. Нередко, однако, в практических условиях эксплуатации градирни недоохлаждают оборотную воду большее количество дней, чем расчетное, по причине износа конструктивных элементов градирен без своевременного восстановления их технологических свойств, т. е. за счет снижения уровня надежности.

Для возможности количественной оценки надежности проектируемых градирен и изменения ее в процессе эксплуатации в табл. 15.1 приведены данные об интенсивности отказов строительных конструкций и технологического оборудования. Следует отметить при этом сильную зависимость показателей надежности однотипных конструкций градирен из одинаковых

материалов от качества их сборки и антикоррозионной обработки, уровня эксплуатации, вида производства и местных условий (климатических, загазованности воздуха, качества воды и др.).

Общим приемом повышения надежности любой многоэлементной технической системы является применение равнонадежных элементов с показателем интенсивности отказов $\lambda(t) \to \min$. Для градирен на практике этот прием неприемлем из-за необходимости использования в конструкциях (элементах) различных материалов для обеспечения прочностных и технологических свойств всего сооружения и по причине работы его конструкций в неодинаковых условиях. В таких случаях требуются некоторые дополнительные мероприятия, компенсирующие меньшую надежность отдельных элементов, в качестве которых выступают резервирование и непременный периодический ремонт.

Теоретически вероятность безотказной работы $p(t)$ сооружения после каждого ремонта составляющих его элементов повышается до первоначального уровня. Однако на практике этого не происходит из-за невозможности технически обнаружить и устранить все неисправности (снижается качество ремонта) и износ материалов, что и приводит к постепенному уменьшению $p(t)$ сооружения в целом в процессе эксплуатации.

Вероятность безотказной работы сооружения после очередного ремонта определяется из выражения

$$p(t_{\text{р}} + t_{\text{рм}}) = 1 - (1 - e^{-t_{\text{р}} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i})\kappa, \qquad (15.5)$$

где $1 - e^{-t_{\text{р}} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$ – вероятность неисправности сооружения перед началом очередного ремонта; $t_{\text{р}}$ – продолжительность работы сооружения между предыдущим и очередным ремонтом, ч; $t_{\text{рм}}$ – продолжительность ремонта, ч; κ – коэффициент, учитывающий качество ремонта и износ материалов.

Применительно к градирням коэффициент κ по опыту эксплуатации можно принимать равным 0,05–0,25 для строительных конструкций и 0,1–0,5 для технологического оборудования. Большее значение этого коэффициента следует прини-

мать для деревянных и асбестоцементных конструкций и по мере увеличения срока эксплуатации градирни.

Пример 15.1. Определить среднюю вероятность безотказной работы построенной башенной градирни и ее элементов через каждые 8000 ч работы при продолжительности ежегодных ремонтов 100 ч. Состав элементов (см. табл. 15.1): p_1, p_3, p_{16}, p_{21}, p_{27}, p_{31}, p_{34} и p_{36}, где p_{21} – ороситель и водоуловитель из ПНД.

Решение. Расчеты производим по параметру интенсивности отказов $\lambda_{ср}$ (табл. 15.1) с использованием (15.3) и (15.5). Коэффициент κ в (15.5) принят равным 0,05 для строительных конструкций и 0,1 для технологического оборудования. Результаты расчетов сведены в табл. 15.2, а динамика изменения вероятности безотказной работы каждого элемента и градирни показана на графике рис. 15.1. Табл. 15.2 и рис. 15.1 представляют собой соответственно "карту надежности" и "график надежности" данной градирни.

Из результатов расчетов примера можно сделать два основных вывода:

"Слабым звеном" в цепи общей надежности градирни является технологическое оборудование, которое требует еже-

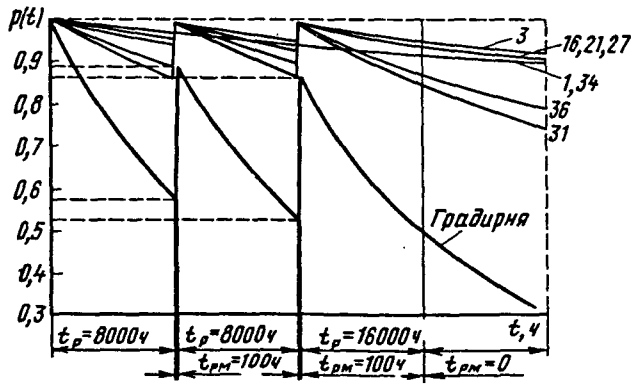


Рис. 15.1. График изменения вероятности безотказной работы башенной градирни и составляющих ее элементов:

номера кривых соответствуют индексам элементов в табл. 15.1:

p_1 – ограждающая конструкция из монолитного железобетона; p_3 – несущий каркас из монолитного железобетона; p_{16} – опорный каркас из железобетона; p_{21} – оросители и водоуловители из ПНД; p_{27} – трубчатая система распределения воды; p_{31} – сопла ударные; p_{34} – водосборный резервуар из железобетона; p_{36} – другие конструкции (аэродинамический козырек, тамбур и др.)

Таблица 15.2. **Расчет надежности градирни и ее элементов**

Элемент (см. табл. 15.1)	Число элементов n_i	$\lambda_{ср} n_i \times 10^4$, $ч^{-1}$	Работа 8000 ч		Ремонт 100 ч	Работа 8000 ч		Ремонт 100 ч	Работа 8000 ч		Работа 8000 ч	
			$\lambda_{ср} n_i t$	$p(t)$	$p(t)$	$\lambda_{ср} n_i t$	$p(t)$	$p(t)$	$\lambda_{ср} n_i t$	$p(t)$	$\lambda_{ср} n_i t$	$p(t)$
p_1	1	0,04	0,032	0,97	0,97*	0,064	0,94	0,94*	0,096	0,91*	0,128	0,88
p_3	1	0,05	0,040	0,96	0,96*	0,080	0,92	0,99	0,040	0,96*	0,08	0,92
p_{16}	1	0,06	0,048	0,95	0,99	0,048	0,95	0,99	0,049	0,95*	0,097	0,91
p_{21}	1	0,07	0,056	0,94	0,99	0,057	0,94	0,99	0,057	0,94*	0,113	0,89
p_{27}	1	0,08	0,064	0,93	0,99	0,065	0,93	0,99	0,065	0,93*	0,129	0,88
p_{31}	1	0,19	0,152	0,86	0,98	0,152	0,86	0,98	0,156	0,85*	0,308	0,73
p_{34}	1	0,04	0,032	0,97	0,97*	0,064	0,94	0,94*	0,096	0,91*	0,128	0,88
p_{36}	1	0,16	0,128	0,88	0,99	0,128	0,88	0,98	0,131	0,88*	0,259	0,77
Итого:	8	0,69										
$\Sigma \lambda_{ср} n_i t =$			0,552			0,661			0,692		1,244	
$p =$		1,00	$p(t_р) = 0,57$				0,52			0,50*		0,29
			$p(t_р + t_{рм}) = 0,89$					0,87				

* Ремонт элементов не производился.

годного ремонта для восстановления технического состояния. "Пропуск" очередного ремонта приводит к резкому снижению надежности градирни (рис. 15.1), для повышения которой потребуется затратить больше средств и времени в сравнении с тем, если бы ремонт производился ежегодно.

Для поддержания надежности градирни на уровне с параметром $p(t)$ порядка 0,6–0,95 надежность каждого из составляющих ее элементов должна быть заметно выше – с $p(t) \approx 0{,}8 \div 0{,}99$.

Пример 15.2. Определить минимальную и максимальную вероятность безотказной работы вентилятора градирни марки ВГ70 через 500, 1000, 1750 и 2750 ч, а также при установленной ТУ 26-02-1067-88 безотказной наработке вентилятора этой марки, равной 6000 ч.

Решение. Расчеты производим по параметрам интенсивности отказов λ_{min} и λ_{max} (табл. 15.1) с использованием формулы (15.3). Результаты расчетов приведены в табл. 15.3 и показаны графически на рис. 15.2.

Приведенные в табл. 15.1 показатели интенсивности отказов позволяют расчетом оценить количественно надежность проектируемых градирен и снижение ее в процессе эксплуатации. Рекомендуется дополнять проекты градирен "картой надежности" или "графиком надежности", подобным табл. 15.2 и рис. 15.1, с указанием в них периодичности профилактического и ремонтного обслуживания строительных конструкций и технологического оборудования.

С учетом показателей интенсивности отказов для водопроводных сетей и оборудования по Ю. А. Ильину (приложение 6) можно определять степень надежности проектируемых и эксплуатируемых систем оборотного водоснабжения в целом.

Надежность эксплуатируемых градирен должна поддерживаться на определенном уровне для возможности получения охлажденной воды с расчетной (проектной) температурой t_2 при обеспеченности в течение года 99, 95 и 90% соответственно принятым параметрам атмосферного воздуха в данной местности для водопотребителей I, II и III категории, табл. 5.2.

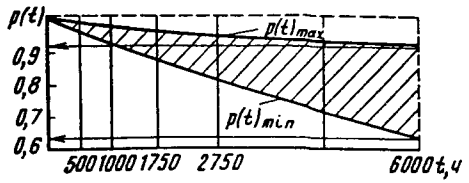


Рис. 15.2. График изменения вероятности безотказной работы вентилятора марки ВГ70

Таблица 15.3. **Расчет надежности вентилятора**

Время t, при котором определяется $p(t)$, ч	Произведение λt при:		Вероятность безотказной работы	
	$\lambda_{min} = 0{,}11 \cdot 10^{-4}$, $ч^{-1}$	$\lambda_{max} = 0{,}76 \cdot 10^{-4}$, $ч^{-1}$	$p(t)_{min}$	$p(t)_{max}$
500	0,005	0,038	1,00	0,96
1000	0,011	0,076	0,99	0,92
1750	0,019	0,133	0,98	0,87
2750	0,030	0,209	0,97	0,81
6000	0,066	0,456	0,93	0,63

Вывод: отказ (поломка) вентилятора при гарантированной ТУ наработке 6000 ч может произойти с вероятностью в интервале надежности от 0,93 (93%) до 0,63 (63%).

Превышение температуры воды t_2 над расчетной может быть вызвано многими факторами, основными из которых являются параметры воздуха, превышающие расчетные при проектировании, и состояние конструктивных элементов градирен. Когда температура t_2 выше расчетной имеет место снижение уровня надежности градирни. Это приводит обычно к снижению охлаждающей способности и тепловой нагрузки градирни и, как следствие, к уменьшению количества отводимой оборотной водой теплоты от технологического оборудования.

Зависимость охлаждающей способности градирни от уровня ее надежности может быть определена введением в расчеты коэффициента снижения тепловой нагрузки $K_{с.т.н}$. Коэффициент $K_{с.т.н}$ характеризует степень влияния комплекса различных факторов на эффективность применения градирни по назначению и определяется отношением фактической (действительной) тепловой нагрузки градирни $W_ф$ при реальном состоянии и работоспособности конструктивных элементов при наличии отказов к расчетной тепловой нагрузке градирни $W_р$, т. е.

$$K_{с.т.н} = \frac{W_ф}{W_р} = \frac{[G_ж(t_1 - t_2)c_ж]_ф}{[G_ж(t_1 - t_2)c_ж]_р}. \qquad (15.6)$$

Таблица 15.4. **Зависимость коэффициента $K_{с.т.н}$ от характера наиболее распространенных отказов конструктивных элементов градирен**

Характер отказов	$K_{с.т.н}$
Разрушение обшивки ограждающих конструкций и коррозионные повреждения конфузора и диффузора с образованием в конструкциях проемов до 5% общей площади	0,85–0,9
Разрушение аэродинамического козырька, межсекционных и ветровых перегородок, щитов жалюзийной решетки	0,9–0,95
Неработоспособность в зимний период противообледенительной системы	0,7–0,8
Засорение или поломка до 25% водоразбрызгивающих устройств, вызывающие образование неорошаемых зон на оросителе до 25% общей площади	0,7–0,9
Засорение взвесью труб водораспределительной системы, вызывающее снижение подачи воды на градирню, уменьшение габаритов факелов разбрызгивающих устройств и нарушение равномерности распределения воды по оросителю при смачивании водой всей его площади	0,85–0,9
Образование на элементах оросителя сплошного слоя загрязнений, приводящее к увеличению аэродинамического сопротивления проходу воздуха с уменьшением его расхода до 25% расчетного	0,7–0,9
Разрушение оросителя объемом до:	
10%	0,9–0,95
25%	0,7–0,9
50%	0,5–0,7
Обрушение оросителя	0,2–0,5
Неработоспособность вентилятора	0,5–0,7
Зашламовывание водосборного бассейна	0,9–0,95

Зависимость коэффициента снижения тепловой нагрузки $K_{с.т.н}$ от характера наиболее распространенных отказов конструктивных элементов градирен может быть оценена по данным табл. 15.4, полученным в результате обобщения опыта эксплуатации и натурных испытаний градирен различных типов.

По данным оценки охлаждающей способности натурных градирен и факторов на нее влияющих установлен параболический характер зависимости коэффициента $K_{с.т.н}$ от вероятности безотказной работы этих сооружений, которая может быть представлена в виде:

$$W_ф/W_р = \sqrt[5]{p} \quad \text{или} \quad W_ф = W_р \sqrt[5]{p}. \qquad (15.$$

С помощью зависимости (15.7) можно установить для различных категорий водопотребителей уровень надежности градирен, который необходимо поддерживать при эксплуатации для обеспечения расчетной охлаждающей способности: для водопотребителей I категории (99% обеспеченности) – $p(t) = 0,95$; для водопотребителей II категории (95% обеспеченности) – $p(t) = 0,77$; для водопотребителей III категории (90% обеспеченности) – $p(t) = 0,59$.

Данные табл. 15.4 и результаты расчетов по (15.7) не могут претендовать на большую точность, так как на охлаждающую способность градирен влияют многие другие, кроме рассмотренных, факторы (изменение расхода и температуры воды в процессе эксплуатации, химический состав воды, вид и концентрации загрязнений и др.), но в целом они дают близкую к достоверной оценку зависимости работы градирен от состояния их конструкций.

Пример 15.3. Для водопотребителя III категории определить фактическую тепловую нагрузку башенной градирни площадью орошения 1200 м² по примеру 15.1 после 8000 ч работы, когда $p(t) = 0,57$, табл. 15.2. Расчетная (проектная) тепловая нагрузка градирни $W_р = 80$ Гкал/ч.

Решение. По зависимости (15.7): $W_ф = 80\sqrt[5]{0,57} = 71,49$ Гкал/ч. $W_ф/W_р = 71,49/80 = 0,89$, т. е. 89%.

Для водопотребителя III категории обеспеченность тепловой нагрузки должна быть не менее 90%. Следовательно, требуются мероприятия по повышению охлаждающей способности градирни.

ГЛАВА 16

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

16.1. Общие положения

Экологические требования по защите окружающей среды, в частности, от воздействия промышленных объектов постоянно возрастают. Градирню рассматривают в двух аспектах – как источник шума и как источник выбросов аэрозолей вместе с выходящим из нее насыщенным воздухом в атмосферу.

При согласовании строительства вентиляторных градирен санитарная инспекция прежде всего рассматривает их как источник шума. Градирни должны отвечать требованиям защиты окружающей среды от шума в соответствии с допустимыми санитарными нормами.

При размещении градирен на жилых или производственных территориях с нормируемым уровнем шума, требуется производить акустический расчет и при необходимости предусматривать мероприятия по снижению шума.

16.2. Шумовые характеристики градирен

Градирня как источник шума представляет собой сооружение, в котором шум может создаваться вентиляторной установкой с приводом преимущественно на низких и средних частотах (63–500 Гц) и движением воды (шум "дождя") – на частотах 500–8000 Гц. В зависимости от конструкций и размеров вентиляторной градирни в создаваемом ею шуме может преобладать один из указанных источников, или они могут быть равны по мощности звука. На уровень шума, создаваемого вентилятором градирни, влияют окружная скорость колеса u м/с, профиль лопаток, их число z. Влияют также конструкция подшипников, работа электродвигателя и тип привода. Дополнительные шумы могут возникнуть также при колебаниях и вибрациях отдельных элементов градирни (оболочки, диффузора и т. п.). В градирнях, изготовленных с высоким качеством, влияние дополнительных шумов от электродвигателя, редуктора, вибрацией конструкций, дебаланса лопастей вентилятора на общий шум не существенно.

В малых вентиляторных градирнях (площадь сечения не более 16 м²) преобладающим источником шума является вентиляторная установка. При больших размерах секции значительную долю в общий шум, создаваемый градирней, может вносить и шум "дождя", особенно на высоких частотах. Разница в шуме градирни с различными типами капельных и пленочных оросителей несущественна и колеблется в пределах 3 дБ.

Шум, создаваемый градирней, оценивается по ее шумовой характеристике. Шумовой характеристикой вентиляторной градирни принято считать уровни звукового давления на среднегеометрических частотах октавных полос в диапазоне 63-

Таблица 16.1. **Шумовые характеристики вентиляторных градирен по данным натурных исследований (приняты по максимальным данным)**

Площадь живого сечения секции градирни, м²	Марка вентилятора (градирни)	Частота вращения вентилятора, об/мин	Уровень звукового давления, дБ, при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц								Уровень звука, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
400	1ВГ-104	110	84	82	80	83	77	79	81	79	86
192	2ВГ 70	145	90	88	86	84	79	79	79	79	86
64	2ВГ 50	178	89	87	82	78	78	80	81	79	87
16	1ВГ 25	380	88	88	87	84	83	77	72	72	86
8	06-300 № 12,5	730	88	88	87	85	82	79	71	65	86
107	1ВГ 47	95	92	90	92	92	85	78	73	66	91
16	Осевой Д = 2м	–	90	87	84	82	75	71	70	68	84
4	06-300 № 12,5	730	85	85	84	83	84	73	68	66	84
1	06-300 № 8	930	86	87	86	83	79	75	67	65	84
4	ККТ-100	–	80	81	83	86	84	83	78	72	89
	"Балтимор" (США)	–	81	80	83	87	81	75	73	63	86
2	ККТ-50	–	77	78	80	83	81	80	75	69	86
1,5	ККТ-25	–	74	75	77	80	78	77	72	66	83
1,3	ККТ-17	–	70	71	73	76	74	73	68	62	79
0,9	ККТ-9	–	69	70	72	75	73	72	67	61	78
5,2	Росинка-100 06-300 № 12,5	730	87	90	90	89	84	79	75	72	89
7,1	Харьков-1000 В.06-290-11-01	1460	81	82	80	80	81	75	67	56	80

8000 Гц на расстоянии 1 м от звукоактивных поверхностей. Звукоактивная поверхность – часть поверхности градирни с наибольшим излучением шума (входные окна, корпус вентилятора, выход из диффузора, выход из поперечно-точных градирен).

Уровень звукового давления L, дБ, вычисляется по формуле

$$L = 20\lg\frac{P}{P_0}, \qquad (16.1)$$

где P – действующее значение звукового давления, Па (Н/м²); P_0 – пороговая величина среднеквадратичного звукового давления, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па (Н/м²), $P_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ кг/м².

Для ориентировочной оценки (например, при проверке органами надзора, выявлении необходимости по шумоглушению и др.) допускается за характеристику постоянного шума на рабочем месте принимать уровень звука, дБА, измеряемый по шкале A шумомера и определяемый по формуле

$$L_a = 20\lg\frac{P_a}{P_0}, \qquad (16.2)$$

где P_a – среднеквадратичное звуковое давление с учетом коррекции A шумомера, Па.

НИИ ВОДГЕО выполнены натурные измерения и составлены шумовые характеристики вентиляторных градирен различных типов.

Измерения шума были проведены в четырех наиболее звукоактивных точках при обычных эксплуатационных режимах работы градирен:

на расстоянии 1 м над верхней кромкой диффузора;

на расстоянии 1 м сбоку от вентилятора или вдоль его оси – для вентиляторов с горизонтальной осью;

на расстоянии 1 м от середины входных окон (на высоте 1,5 м от борта резервуара);

на расстоянии 1 м от градирни со стороны выхода воздуха.

В табл. 16.1 приведены расчетные шумовые характеристики вентиляторных градирен, принятые по максимальным значениям измеренных.

16.3. Допустимые уровни шума

Допустимые уровни шума звукового давления, дБ, в октавных полосах частот, уровни звука, дБА, для жилых, общественных, производственных зданий и их территорий следует принимать в соответствии с табл. 16.2 с поправками к ним по табл. 16.3 на время суток и месторасположение объекта.

16.4. Расчет требуемого снижения шума, создаваемого градирнями

Определение требуемого снижения шума производится на основании акустического расчета. Акустический расчет проводят в восьми октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Расчет производится в следующем порядке.

Определяются шумовые характеристики (октавные уровни звукового давления градирен) по табл. 16.1. Выбираются точки в помещениях или на их территориях, для которых производится расчет (расчетные точки). Выбор расчетных точек осуществляется на территории или в помещениях, наиболее близко расположенных к градирне, а также в помещениях с наименьшим допустимым уровнем шума. Акустический расчет производится отдельно для каждой из выбранных расчетных точек.

Определяются допустимые уровни звукового давления в расчетных точках $L_{доп}$, дБ.

Октавные уровни звукового давления, создаваемые градирнями в расчетных точках на территории $L_{тер}$, определяются по формуле

$$L_{тер} = L - \Delta L_{рас} + \Delta L_{н} - \Delta L_{зел}. \qquad (16.3)$$

Уровень звукового давления, создаваемый градирней L, определяется по табл. 16.1; снижение звукового давления в зависимости от расстояния между градирней и расчетной точкой $\Delta L_{рас}$ – по графику рис. 16.1; показатель направленности излучения шума $\Delta L_{н}$ – по табл. 16.4; снижение уровня звукового давления полосами зеленых насаждений определяется как

$$\Delta L_{зел} = \alpha_{зел} C. \qquad (16.4)$$

где C – ширина полосы зеленых насаждений, м.

Таблица 16.2. **Допустимые уровни звукового давления и уровни звука для различных помещений и территорий**

Территории, здания и помещения	Допустимые уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровень звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Территории:									
Больниц, санаториев, непосредственно прилегающих к зданию	59	48	40	34	30	27	25	23	35
Непосредственно прилегающие к жилым домам, площадки отдыха, микрорайонов, площадки детских дошкольных учреждений, участки школ	67	57	49	44	40	37	35	33	45
Производственные предприятия	99	92	86	83	80	78	76	74	85
Жилые и общественные здания									
Палаты больниц и санаториев, операционные больниц	51	39	31	24	20	17	14	13	25
Жилые комнаты квартир, жилые помещения домов отдыха и пансионатов, спальные помещения в детских дошкольных учреждениях и интернатах	55	44	35	29	25	22	20	18	30
Кабинеты врачей больниц, санаториев, поликлиник, концертные залы, номера гостиниц, жилые комнаты в общежитиях	59	48	40	34	30	27	25	23	35
Классные помещения, аудитории учебных заведений, конференц-залы, читальные залы, зрительные залы театров, клубов, кинотеатров, залы судебных заседаний и совещаний	63	52	45	39	35	32	30	28	40
Рабочие помещения управлений, конструкторских и проектных организаций и научно-исследовательских институтов, холлы гостиниц, общежитий, учреждений отдыха	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Залы кафе, ресторанов, столовых, фойе театров и кинотеатров	75	66	59	54	50	57	45	43	55
Торговые залы магазинов, спортивные залы, пассажирские залы аэропортов и вокзалов, приемные пункты предприятий бытового обслуживания	79	70	63	58	55	52	50	49	60
Производственные помещения									
Помещения конструкторских бюро, расчетчиков и программистов вычислительных машин лабораторий для теоретических работ и обработки экспериментальных данных, приема больных в здравпунктах	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Помещения управления, рабочие комнаты	79	70	63	58	55	52	50	49	60
Кабины наблюдений и дистанционного управления:									
без речевой связи по телефону	95	87	82	78	75	73	71	70	80
с речевой связью по телефону	83	74	68	63	60	57	55	54	65
Помещения счетно-электронных машин и участки точной сборки, машинописные бюро	83	74	68	63	60	57	55	54	65
Помещения лабораторий для проведения экспериментальных работ, помещения для размещения шумных агрегатов вычислительных машин	95	87	82	78	75	73	71	70	80
Постоянные рабочие места и рабочие зоны производственных помещений	99	92	86	83	80	78	76	74	85

Таблица 16.3. **Поправки к уровням звука, приведенным в табл. 16.2**

Влияющий фактор	Условия	Поправки к $L_{доп}$, дБ
Время суток	Ночное время с 23 до 7 ч	0
	Дневное время с 7 до 23 ч	+10
Местоположение объекта	Курортный район	–5
	Новый проектируемый городской жилой район	0
	Жилая застройка, расположенная в существующей (сложившейся) застройке	+5

Примечания: 1. Поправки на время суток вносятся при определении допустимых уровней звукового давления для жилых комнат, квартир, спальных помещений домов отдыха и пансионатов, спальных помещений в детских дошкольных учреждениях и школах-интернатах, палат больниц и спальных комнат санаториев, жилых комнат общежитий, номеров гостиниц, для территорий, непосредственно прилегающих к жилым домам, территорий больниц, санаториев, непосредственно прилегающих к зданиям.

2. Поправки на местоположение объекта следует учитывать только для внешних источников шума при определении допустимых уровней звукового давления и уровней звука для жилых комнат квартир, спальных помещений домов отдыха и пансионатов, спальных помещений в детских дошкольных учреждениях и школах интернатах, палат больниц и спальных комнат санаториев, жилых комнат общежитий и номеров гостиниц.

Поправку на местоположение объекта не следует принимать для вновь строящихся зданий в существующей (сложившейся) застройке.

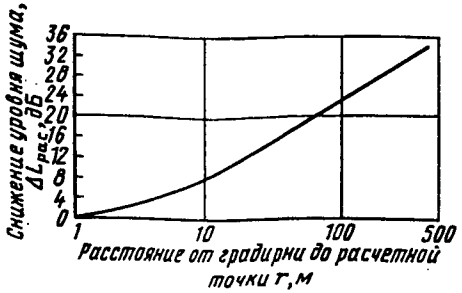


Рис. 16.1. График снижения шума $\Delta L_{рас}$ в зависимости от расстояния r между градирней и расчетной точкой

Таблица 16.4. **Показатель направленности излучения шума**

Выход звуковой энергии в градирне	Показатель направленности излучения шума $L_н$, дБ, при направлении звуковой энергии		
	в сторону объекта	под углом 90° к объекту	в противоположную сторону от объекта
Круговой	0	0	0
Двухсторонний	0	–5	0
В одну сторону	0	–5	–15

Постоянная затухания шума $\alpha_{зел}$ определяется по табл. 16.5.

Результаты натурных измерений показали, что уровень звукового давления, создаваемый градирней при одной работающей секции, и суммарный УЗД нескольких работающих секций (градирен) отличаются между собой не более, чем на 1 – 2 дБ, что находится в пределах точности измерений. Это объясняется тем, что из-за больших размеров секции (градирни) шум от соседних секций до расчетной точки доходит значительно сниженным по сравнению с шумом от секции, расположенной на минимальном расстоянии от расчетной точки.

Расчеты суммарных уровней звукового давления показывают, что они численно равны уровню звукового давления одной секции.

Таблица 16.5. **Постоянная затухающая шума**

Зеленые насаждения	Постоянная затухания шума $\alpha_{зел}$, дБ/м, при среднегеометрических частотах октавных полос, дБ/м							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Кроны сосен	0,06	0,08	0,11	0,14	0,15	0,16	0,19	0,2
Сосновый лес	0,08	0,1	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,2
Кроны елей	0,08	0,1	0,12	0,16	0,18	0,17	0,25	0,3
Густой лиственный лес	0,03	0,04	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2	0,25
Зеленая густая изгородь	0,1	0,13	0,15	0,25	0,35	0,4	0,5	0,6

16.5. Основные мероприятия по снижению шума градирен

Уровень шума от вентиляторных градирен, как правило, не превышает допустимого по санитарным нормам для территорий промышленных предприятий уже на расстоянии 10 м (см. табл. 16.2), поэтому их можно размещать в любом месте промышленного предприятия без проведения каких-либо мероприятий по защите от шума. Однако если поблизости находятся жилые или другие здания, уровень шума для которых ограничен санитарными нормами, следует предусматривать мероприятия для снижения уровня шума в расчетных точках до значений, допустимых санитарными нормами.

Эти мероприятия необходимо предусматривать на стадии проектирования и привязки к местности, что обходится обычно в 2–3 раза дешевле, чем обеспечение защиты от шума после пуска градирен в эксплуатацию.

Борьба с шумом вентиляторных градирен осуществляется по следующим основным направлениям:

уменьшение шума в источнике (градирне) конструктивными и административными методами (создание и применение малошумного источника, регламентация времени его работы и мест расположения на территории);

снижение шума на пути его распространения в городской среде от источника (градирни) до объекта шумозащиты;

устройство шумозащиты непосредственно на объекте конструктивно-строительными методами, обеспечивающими повышение звукоизолирующих качеств ограждающих конструкций, зданий и сооружений.

В качестве мероприятий по борьбе с шумом внутри источника (градирни) могут быть рекомендованы:

установка вентилятора на плавающем основании и "мягкое" соединение вентилятора с корпусом градирни в противоточной градирне с вентилятором типа 06-300;

снижение скорости вращения вентиляторов за счет изменения конструкции или применения двухскоростных двигателей;

устройство удлиненных диффузоров с непрерывным течением потока при покрытии внутренней поверхности диффузора звукопоглощающим материалом с пластмассовой пленкой для защиты от воды;

усовершенствование аэродинамических характеристик лопастей и проточной части вентиляторов;

целесообразность режима работы градирни с остановкой в ночное время (с 23 до 7 ч) в тех случаях, когда это возможно;

размещение градирен с выходом звуковой энергии в сторону, противоположную рассматриваемому помещению.

В качестве мероприятий по борьбе с шумом на путях его распространения могут быть рекомендованы:

удаление от жилых домов на достаточное расстояние;

размещение градирен в естественных или искусственных выемках или среди зданий;

устройство между градирней и рассматриваемым объектом экранов в виде насыпей, ограждений, стенок, полос зеленых насаждений;

размещение вентиляторных градирен с использованием в качестве экранов существующих сооружений зданий, рельефа местности;

использование глушителей.

16.6. Воздействие выбрасываемых из градирен аэрозолей на окружающую среду

Работающая градирня выбрасывает в атмосферу нагретый до 35–45 °С насыщенный водяными парами воздух, содержащий капли воды размером 100–500 мкм в количестве 0,5–1 г на 1 м³ воздуха. С парами в атмосферу поступает примерно 95% тепла, отводимого от охлаждаемого оборудования, а оставшаяся часть тепла отводится в водоисточники с продувочной водой. Интенсивность теплового потока на выходе из градирни в зависимости от тепловой нагрузки может достигать 250–300 кВт/м². Он создает факел тумана (паровой факел), поднимающийся на высоту до 150–300 м и распространяющийся в направлении ветра на 2–10 км. Наличие парового факела является неотъемлемым признаком мокрых градирен, работающих по принципу испарительного охлаждения воды.

При работе на промплощадке большого количества мокрых градирен и определенном сочетании погодных условий группа факелов может формировать в районе предприятия местный микроклимат с повышенной влажностью атмосферного воздуха. Кроме того, при наличии в атмосферном воздухе газообразных примесей выходящая из градирни влага может с ними взаимодействовать и образовывать вредные для окружающей среды соединения.

При требованиях к работе охладителей, исключающих видимость паровых факелов, применяются сухие или гибридные градирни (см. гл. 12 и 17).

При использовании для подпитки оборотных систем городских и промышленных сточных вод, а также сильно минерализованных природных вод (например, морской воды) градирни могут быть источником вредного воздействия на окружающую среду – атмосферу, почву, водные объекты.

Вредное воздействие происходит в результате выброса капель оборотной воды в атмосферу, осаждения их на почву и на поверхность воды водных объектов.

В каплях могут содержаться также ингибиторы коррозии, накипеобразования и химические реагенты для предотвращения биологических обрастаний, добавляемые в оборотную воду.

Минздравом опубликованы следующие документы, регламентирующие способы применения очищенных сточных вод в системах оборотного водоснабжения с градирнями:

"Методические указания по гигиенической оценке использования очищенных городских сточных вод в промышленном водоснабжении". № 3224-85 от 04.03.85. Главное санитарно-эпидемиологическое управление Министерства здравоохранения СССР;

"Временные методические рекомендации к использованию очищенных городских сточных вод и смеси их с очищенными сточными водами предприятий синтетического каучука в оборотных системах охлаждающего водоснабжения". Министерство здравоохранения СССР. Главное санитарно-эпидемиологическое управление (утверждены 3 декабря 1981 г. № 2501-81).

Капли воды распространяются в атмосфере в районе градирен и увлажняют поверхность земли и близрасположенные сооружения, а в зимний период вызывают их обледенение, поэтому в СНиП 11-89-80 приведены допустимые минимальные расстояния от градирен до ближайших сооружений (см. табл. 11.2).

Градирни размещают по отношению к жилым застройкам с учетом розы ветров. При этом следует предусматривать санитарно-защитные зоны.

Зона выпадения капельной влаги на поверхности земли имеет форму элипса с большой осью, проходящей через центр

градирни в направлении ветра. Наибольшая интенсивность выпадения капель на поверхность земли в этой зоне находится на большой оси элипса на расстоянии примерно двух высот градирни. Размер зоны зависит от высоты градирни, скорости ветра, степени турбулентности воздуха в приземном слое, концентрации и крупности капель, а также от температуры и влажности атмосферного воздуха.

Применение в оборотной воде для борьбы с коррозией токсичных ингибиторов, например, содержащих шестивалентный хром, требует контроля воздушной среды и почвы в районе градирен. Предельно допустимая концентрация (ПДК) Cr^{+6} в почве составляет 0,5 мг на 1 кг почвы. ПДК Cr^{+6} в атмосферном воздухе на промышленной площадке составляет 0,003 мг/м^3 (30% ПДК для воздуха рабочей зоны, составляющего 0,01 мг/м^3 согласно СН 245-71), а в населенных местах – ПДК Cr^{+6} 0,0015 мг/м^3. Приведенные данные о ПДК обычно обеспечиваются при содержании Cr^{+6} в оборотной воде не более 1,7 мг/л.

При оценке вредности выноса хрома из градирен необходимо принимать во внимание концентрацию шестивалентного хрома в воздухе, создаваемого за счет других источников (фоновые концентрации).

При использовании в системах оборотного водоснабжения с градирнями очищенных сточных вод остаточные примеси вредных веществ и токсичных ингибиторов коррозии могут повлиять на санитарно-гигиенические условия в зоне выброса и распространения водного аэрозоля, выносимого из градирен.

На основе экспериментальной и расчетной оценки токсичности аэрозолей оборотных вод устанавливаются гигиенические нормативы – ориентировочные безопасные уровни воздействия аэрозолей (ОБУВ). Такие нормативы должны учитываться при определении допустимого выноса капельной влаги из градирен при расчетах минимальной санитарно-защитной зоны от градирен до жилой зоны.

Минздравом утверждены ОБУВ аэрозолей оборотных вод на основе очищенных городских сточных вод для атмосферного воздуха близлежащих населенных мест для вод с солесодержанием: 3 г/л – 20 мг/м^3 (0,02 мл/м^3) воздуха; 6 г/л – 10 мг/м^3 (0,01 мл/м^3) воздуха.

Возможен контроль загрязнения атмосферы в районе расположения градирни и по аэрозолям отдельных компонентов, которые встречаются в оборотной воде при использовании сточных вод, при этом их концентрация не должна превышать ПДК. Для некоторых веществ, встречающихся в оборотной воде, ПДК в атмосферном воздухе приведена в табл. 17.8.

Эпидемическая безопасность в районе градирен обеспечивается обработкой сточных вод, используемых в системах оборотного водоснабжения различными реагентами или безреагентными методами обеззараживания воды. Гигиеническим критерием эпидемической безопасности очищенных и обеззараженных городских сточных вод является уровень коли-индекса не более 1000.

При применении хлора безопасность возникновения эпидемий обеспечивается следующим режимом хлорирования:

при содержании взвешенных веществ до 3 мг/л, биологической потребности кислорода (БПК) до 6 мг/л и химической потребности кислорода (ХПК) до 45 мг/л – длительность контакта воды с хлором не менее 30 мин, концентрация остаточного хлора не менее 1 мг/л;

при содержании взвешенных веществ 3–10 мг/л, БПК до 6 мг/л и ХПК до 45 мг/л – длительность контакта воды с хлором не менее 1 ч, концентрация остаточного хлора не менее 1 мг/л.

Допускается обработка оборотной воды гипохлоридом натрия, озоном, озоном с хлором.

ГЛАВА 17

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГРАДИРЕН

Охлаждение воды заданного расхода до требуемой температуры может быть обеспечено на градирнях различных типов и конструкций с неодинаковыми затратами материальных и трудовых ресурсов и при неодинаковых дополнительных нагрузках на окружающую среду. Поэтому при разработке новых и привязке существующих проектов градирен к местным условиям строительства и эксплуатации следует производить расчеты технико-экономических и эколого-экономических показателей возможных вариантов градирен для оценки и выбора наиболее рационального в каждом конкретном случае.

Предварительно на основании технологических расчетов назначаются возможные вариантные решения, обеспечивающие требования технологии производства по расходу оборотной воды и температуре, но отличающиеся типом и конструкцией градирен. Градирни, работающие совместно в одном оборотном цикле, должны быть, как правило, однотипными.

Критерием выбора варианта является минимум затрат, рассчитываемых с учетом фактора времени, или максимум народнохозяйственного (экономического и эколого-экономического) эффекта.

Все представленные в настоящем справочном пособии стоимостные оценки даны без учета происходящей в настоящее время в России инфляции и отвечают уровню цен, действующих до 01.01.91 г. (база). Для определения цен текущего периода пользуются коэффициентом $K_{инф}$, значение которого в 1997 г. составляло 5800 – 16 000 в зависимости от территориального расположения объекта строительства, отрасли промышленности, организационной структуры предприятия, вида работ и других факторов. С учетом деноминации рубля с 01.01.98 г. значение $K_{инф}$ уменьшается в 1000 раз.

17.1. Технико-экономические показатели

Капитальные вложения. Они расходуются на ввод в эксплуатацию новых градирен, определяются по сметной стоимости строительно-монтажных работ. Капитальные вложения включают в себя: стоимость всех видов строительных работ и монтажа оборудования $K_{стр}$; стоимость технологического, энергетического, подъемно-транспортного и других видов оборудования $K_{об}$, включая механизмы, инвентарь и инструменты (входящие в состав основных фондов); прочие капитальные работы и затраты $K_{пр}$:

$$K = K_{стр} + K_{об} + K_{пр}. \qquad (17.1)$$

В статью затрат $K_{стр}$ входят капитальные вложения раздельно по элементам градирни: ограждающая конструкция (оболочка башни); опорная колонада и фундамент; водосборный бассейн; несущий каркас; ороситель и водоуловитель; водо-

распределительная система; вентиляторное оборудование и подводящие трубопроводы.

В случае блокирования градирни с насосными станциями или производственными зданиями следует учитывать дополнительно протяженность инженерных коммуникаций и затраты на освоение территории генерального плана объекта.

При сравнении систем охлаждения с градирнями отличающимися своей охлаждающей способностью надлежит определять затраты на сооружения, оборудование и коммуникации, связанные с очисткой и транспортировкой подпиточной воды и продувки системы. Кроме того, следует учитывать различную мощность производств из-за неодинаковой возможности градирен в обеспечении температуры охлаждающей воды и предусматривать в связи с этим дополнительные капитальные вложения в замещающую мощность. Для тепловых электростанций замещающая мощность определяется как сумма разности значения снижения мощности турбоагрегатов при высоких температурах охлаждающей воды и разности значения мощности, потребляемой циркуляционными насосами.

В капитальных вложениях следует предусматривать резерв средств на непредвиденные работы и затраты. Резерв зависит от мощности системы водоснабжения, категории водопотребителя и профиля предприятия.

Эксплуатационные затраты (издержки). Они включают в себя стоимость электроэнергии $Э_э$ и материалов $Э_м$, расходы на заработанную плату $Э_з$, амортизационные отчисления по основным фондам $Э_а$, отчисления на текущий ремонт $Э_р$, прочие расходы $Э_{пр}$ на эксплуатацию и социальное страхование $Э_с$:

$$Э = Э_э + Э_м + Э_з + Э_а + Э_р + Э_{пр} + Э_с. \qquad (17.2)$$

Затраты на оплату электроэнергии промышленными и приравненными к ним потребителями определяются по одно- или двухставочному тарифам в зависимости от присоединенной мощности.

Присоединенная мощность – суммарная мощность понизительных трансформаторов, преобразующих энергию на рабочее напряжение и мощность высоковольтных потребителей энергии, присоединенных непосредственно к щитам высокого напряжения понизительных подстанций.

Промышленные предприятия, предприятия коммунального обслуживания населения и другие потребители с присоединенной мощностью до 750 кВ · А оплачивают электроэнергию по одноставочному тарифу $Ц_1$, т. е. только за отпущенную электроэнергию, учитываемую счетчиком в кВт · ч. Потребители с присоединенной мощностью 750 кВ · А и выше оплачивают электроэнергию по двухставочному тарифу – за потребленную электроэнергию $Ц_2$ и за 1 кВт максимальной нагрузки $Ц_3$.

Для энергосистемы Главцентрэнерго, например, в ценах до 01.01.91 г. $Ц_1$ = 0,03 руб/(кВт · ч) (для Мосэнерго – 0,08), $Ц_2$ = 0,009 ÷ 0,012 руб/(кВт · ч) и $Ц_3$ = 36 ÷ 39 руб/кВт (для Мосэнерго – 36). С учетом инфляции в 1997 г. в системе Мосэнерго $Ц_2$ = 415 руб/(кВт · ч) и $Ц_3$ = 29 799 руб/кВт в месяц.

Стоимость 1 кВт · ч принимается по тарифам, действующим для расчетов за электроэнергию на конкретном предприятии, или по прейскуранту.

Для градирни с естественной тягой воздуха электроэнергия затрачивается только на подачу воды, а для градирен с механической подачей воздуха – дополнительно на привод вентиляторов.

Стоимость электроэнергии на подачу воды насосом

$$Э_{эн} = \frac{G_ж H k t_1 Ц}{102 \eta_н n}, \qquad (17.3)$$

где $G_ж$ – расход воды, кг/с; H – полная высота подъема воды с учетом избыточного напора для работы разбрызгивающих устройств, м; k – коэффициент запаса мощности (1,25 – 1,1); t_1 – число часов работы насосов в течение года (t_1 = 8760 ч); $Ц$ – цена 1 кВт · ч активной электроэнергии, учитываемой счетчиком, руб; $\eta_н$ – КПД насоса (из характеристики, $\eta_н$ = 0,7 ÷ 0,8); n – количество рабочих насосов.

Стоимость электроэнергии на привод вентилятора градирни

$$Э_{э.в} = \frac{G_в P k t_2 Ц}{1000 \eta_в}, \qquad (17.4)$$

где $G_в$ – подача воздуха вентилятора, м³/с; P – полное давление, развиваемое вентилятором, Па; $\eta_в$ – КПД вентилятора (из характеристики, $\eta_в$ = 0,65 ÷ 0,8); t_2 – число часов работы вентиля-

тора в течение года (при трехсменной работе $t_2 = 4000$ ч, при двухсменной $t_2 = 2400$ ч, при односменной $t_2 = 1700$ ч).

В прямых расходах на материалы $Э_м$ учитываются в основном затраты на строительные материалы для нужд эксплуатации и текущего ремонта градирен и реагенты $Э_R$ для стабилизационной обработки воды:

$$Э_м = \sum_{n=1}^{n} M_i Ц_i, \quad Э_R = \sum_{n=1}^{n} R_i Ц_i, \qquad (17.5)$$

где M_i и R_i – среднегодовой расход i-го вида материала (дерева, пластмассы, разбрызгивающих устройств и других), м³/год, т/год или шт/год, и реагента по товарному продукту, т/год; $Ц_i$ – их стоимость, руб. При этом $R_i = q_1 + 8760 q_2/a \cdot 10^6$, где $q_1 = O_c c_p$ – начальный расход реагента в расчете на объем воды в системе, г; $q_2 = G_{об}(P_2 + P_3) r_в$ – потери реагента с продувочной водой, капельным уносом на градирнях и неучтенными утечками воды из системы, г/ч; O_c – объем воды в заполненной системе (резервуары, водосборные бассейны градирен, трубопроводы) в статических условиях, м³; $G_{об}$ – усредненный расход оборотной воды, м³/ч; $r_в$ – концентрация реагента по основному веществу, мг/л (г/м³); P_2 – капельный унос на градирнях в % от $G_{об}$; P_3 – продувка системы в % от $G_{об}$; a – долевое содержание основного вещества в товарном продукте, %; c_p, г/м³.

Экономическую эффективность применения, например, ингибиторов коррозии в охлаждающих системах оборотного водоснабжения можно рассчитать по формуле (приложение 7):

$$Э_{инг} = \left(\frac{Ф}{t_o} - \frac{Ф}{t_{инг}} - З_{инг} \right) + У_{кор}, \qquad (17.6)$$

где $Э_{инг}$ – годовой экономический эффект, руб/год; $Ф$ – балансовая стоимость защищаемого оборудования, руб; t_o – фактический срок службы оборудования без обработки воды ингибиторами коррозии, лет; $t_{инг}$ – срок службы оборудования при обработке воды ингибиторами, лет; $З_{инг}$ – затраты на обработку воды ингибиторами коррозии, руб/год; $У_{кор}$ – ущерб от преждевременного выхода из строя оборудования (например, теплообменных аппаратов) или его простоя за счет коррозионных повреждений, включающий стоимость потерь продукции, снижение ее стоимости от ухудшения качества, затраты на ремонт, замену оборудования и др.

По статье расходов на заработную плату $Э_з$ планируется и учитывается основная и дополнительная заработная плата рабочих, непосредственно занятых обслуживанием, планово-производственным и текущим ремонтом градирен. Она рассчитывается исходя из численности обслуживающего персонала, ставок и окладов по категориям работающих с учетом коэффициентов в зависимости от поясного деления и отрасли промышленности.

Амортизационные отчисления $Э_а$ определяются по установленным нормам исходя из среднегодовой стоимости отдельных видов основных фондов:

$$Э_а = \sum_{n=1}^{n} K_i \frac{A_i}{100}, \qquad (17.7)$$

где K_i – балансовая стоимость основных фондов по отдельным видам зданий, сооружений и оборудования, тыс. руб; A_i – общая норма амортизационных отчислений i-го вида, %.

Нормы A_i установлены отдельно по каждому виду основных фондов на полное восстановление и капитальный ремонт (табл. 17.1). При составлении таблицы использовались данные Постановления Совмина СССР № 1072 от 22.10.1990 г. "О единых нормах амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР", ВСН 14-67 Минэнерго СССР (Л.: Энергия, 1971 г.) и "Нормы амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР" (М.: Экономика, 1974 г.).

Для оборудования градирен, не приведенного в табл. 17.1, можно принимать по опыту эксплуатации следующие ориентировочные нормы амортизационных отчислений на полное восстановление: обшивка из гофролистов полиэфирного стеклопластика 7,2%; опорный каркас оросителя деревянный антисептированный 8%; оросители и водоуловители из стабилизированного полиэтилена (ПНД) 5%, из поливинилхлорида пластифицированного 6%; вентиляторы – марки ВГ 11%, 06-300 общепромышленного назначения 14%; конфузор и диффузор из стали ($\delta = 4$ мм) при регулярном восстановлении антикоррозийного покрытия 5%; диффузор из полиэфирного стеклопластика 4%.

При проведении расчетов годового экономического эффекта (в том числе на стадии проектирования) допускается

Таблица 17.1. **Нормы амортизационных отчислений, % к балансовой стоимости основных фондов, A_i**

Группы и основные виды фондов	Общая норма амортизационных отчислений	В том числе	
		На полное восстановление	На капитальный ремонт
Брызгальные бассейны, железобетонные	4,1	2,5	1,6
Вентиляторные градирни:			
железобетонные	3,5	3,3	0,2
деревянные	15,1	14,3	0,8
металлические	11,3	10,0	1,3
бетонные	7,6	6,7	0,9
Башенные градирни:			
железобетонные	4,8	2,8	2
металлический каркас	5,6	3,3	2,3
обшивка деревянная антисептированная	10,7	7,7	3,0
обшивка алюминиевая или асбестоцементная с антикоррозионной защитой	9	4	5
Оросители:			
из асбестоцемента или антисептированной древесины	12	6	6
опорный каркас оросителя (железобетонный)	6	4	2
Водоуловители:			
деревянные антисептированные	10,7	7,7	3
асбестоцементные	9,4	6,7	2,7
Водораспределительные системы:			
из металлических труб	7,5	5	2,5
из асбестоцементных труб	9,4	6,7	2,7
Водоразбрызгивающие устройства	–	10	–
Электродвигатели мощностью, кВт:			
До 100	12,6	9,5	3,1
Более 100	8,1	5,3	2,8
Насосы центробежные водопроводные	19,3	12,5	6,8
Резервуары чистой воды:			
железобетонные подземные	2,7	2,5	0,2
металлические	8,6	3,3	5,3
Водопроводная сеть с арматурой (трубы стальные)	5,5	5,0	0,5
Емкости механизированные для извести	30,3	25	5,3
Аппараты для гашения извести	6,4	3,9	2,5

Продолжение табл. 17.1

Группы и основные виды фондов	Общая норма амортизационных отчислений	В том числе	
		На полное восстановление	На капитальный ремонт
Аппараты с мешалками и смесители стальные, аппаратура из полимерных материалов	12,3	7,9	4,4
Мерники, дозаторы, холодильники, емкости для растворов серной кислоты	25,8	9,8	16
Дозаторы, мерники воды, щелочи	9,9	6,6	3,8
Дозаторы реагентов	46,8	33,4	13,4
Генераторы высокочастотные и ультразвуковые	15,5	12,5	3
Испарители	12,9	10	2,9
Дистилляторы	24,3	20	4,3
Хлораторы (аммонизаторы)	50	50	–
Бактерицидные установки	12,7	10	2,7
Нестандартное специальное химическое оборудование (емкостная аппаратура, работающая под давлением с обогревом, баки-смесители с паровой рубашкой, дозирующее оборудование, мерники) при двухсменной работе	11	7	4

использование усредненных процентов амортизационных отчислений: для сооружений водопровода 6% и для оборудования 12%.

Затраты по статье "текущий ремонт" $Э_р$ включают основную и дополнительную заработанную плату ремонтных рабочих с начислениями на социальное страхование, затраты на материалы, расходуемые при ремонте, запчасти, а также услуги ремонтных мастерских.

При расчете фактического экономического эффекта затраты на текущий ремонт определяются по данным (нормам) предприятия, эксплуатирующего градирни. При расчете ожидаемого экономического эффекта затраты принимаются в размере 1% сметной стоимости строительства объекта.

Статья "прочие расходы" $Э_{пр}$ учитывает следующие виды затрат: износ и ремонт малоценных и быстроизнашивающихся инструментов, приспособлений и хозяйственного инвентаря;

расходы по технике безопасности и охране труда; услуги сторонних организаций и цехов предприятий; другие расходы.

При расчетах фактического экономического эффекта эти затраты определяются по накладным расходам конкретного предприятия (общецеховые, общезаводские расходы).

При ориентировочных расчетах $Э_{пр}$ принимаются в размере 20% суммы амортизационных отчислений и заработной платы обслуживающего персонала или в размере 5 – 6% общей суммы эксплуатационных расходов без учета амортизационных отчислений.

Отчисления в фонд социального страхования $Э_с$ устанавливаются в процентах от годового фонда основной и дополнительной заработной платы.

В эксплуатационных затратах следует учитывать себестоимость дополнительно выработанной или невыработанной продукции или же изменения ее себестоимости, обусловленные различием температуры охлаждающей воды в сравниваемых вариантах градирен. Этот показатель определяется по фактическим данным конкретного предприятия или по данным прибыли (потерь) предприятия аналогичного профиля.

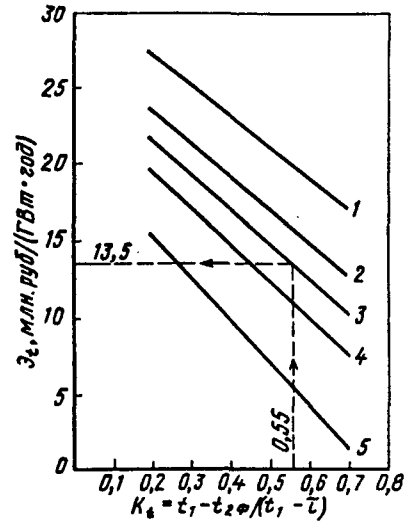
Изменение же эксплуатационных затрат, вызванное режимом работы охладителей ТЭС, можно определить на стадии ТЭО, предшествующей проектированию и детальной разработки сметы расходов, по эмпирической формуле, предложенной В. С. Пономаренко, графически представленной на рис. 17.1:

$$Э_t = 0{,}7t_к - \frac{13{,}5t_к}{t_{2тр}} \cdot \frac{t_1 - t_{2ф}}{t_1 - \tau}, \qquad (17.8)$$

где $Э_t$ – эксплуатационные затраты, отнесенные к 1 ГВт · год тепловой мощности турбоустановки, млн. руб/(ГВт · год); 0,7 – коэффициент единицы измерения, млн. руб/[(ГВт · год) × × °С]; $t_к = 30 \div 45$ – температура конденсации водяного пара в конденсаторах турбин, °С; $t_{2тр} = 14 \div 30$ – требуемая температура охлаждающей воды, °С; $t_1 - t_{2ф}/t_1 - \tau = K_t = 0{,}2 \div 0{,}7$ – температурный коэффициент эффективности охлаждения воды б/р (см. гл. 12.5); $t_1 = 20 \div 45$ – температура нагретой воды, поступающей на охладители, °С; $t_{2ф} = 16 \div 36$ – фактическая температура охлаждающей воды, возвращаемой в цикл с охладителей, °С; $\tau = 10 \div 25$ – температура атмосферного воздуха по смоченному термометру, °С; 13,5 – базовые эксплуатационные

Рис. 17.1. Зависимость эксплуатационных затрат Э от коэффициента эффективности охлаждения воды K_t:

температуры $t_к$ и $t_{2тр}$, °С, соответственно равны: *1* – 45 и 29,5; *2* – 40 и 24,5; *3* – 37,5 и 22; *4* – 35 и 19,5; *5* – 30 и 14,5



затраты, млн. руб/(ГВт · год), при температурах, °С: $t_1 = 32$, $t_{2ф} = 22$, $t_{2тр} = 22$, $\tau = 14$ и $t_к = 37{,}5$.

Формула (17.8) получена по результатам обработки данных института Теплоэлектропроект, приведенных в статье С.Л. Зисмана "Выбор систем технического водоснабжения паротурбинных электростанций с учетом их влияния на окружающую среду" (Электрические станции. 1990. № 8. С. 39–44).

В эксплуатационные затраты $Э_t$ входят амортизационные отчисления, ремонт, дополнительный расход топлива, стоимость электроэнергии на привод циркуляционных насосов и оплату добавочной воды.

В расчетах по (17.8) приняты цены, действовавшие до 01.01.91 г.: топлива 50 руб/тут, воды поверхностных водоисточников для прямотока 0,003 руб/м^3 и 0,01 руб/м^3 для безвозвратного водопотребления, электроэнергии 0,02 руб/(кВт · ч).

По формуле (17.8) можно также ориентировочно определить значение $Э_t$ (расчетные параметры должны находиться в диапазоне входящих в формулу), отнесенное к 1 ГВт · год тепловой мощности теплообменных аппаратов, конденсирующих или охлаждающих технологические продукты. При этом за $t_к$ в (17.8) принимается температура конденсации газообразных или температура охлажденных жидких продуктов.

Пример 17.1. От конденсаторов двух турбин К-300/240 общей мощностью 600 МВт тепло отводится оборотной водой с расхо-

дом 60 тыс. м³/ч, охлаждаемой на четырех башенных градирнях, площадь живого сечения каждой по 1600 м².

Определить эксплуатационные затраты $Э_t$ за 7 сут по среднегодовым температурным параметрам работы конденсаторов и градирен – $\tau = 14$ °С, $t_к = 39$ °С, $t_{2тр} = 27$ °С, $t_1 = 32$ °С, $t_{2ф} = 22$ °С (1-й вариант) и при кратковременном в течение 7 сут недоохлаждением оборотной воды с повышением температуры атмосферного воздуха до $\tau = 21$ °С, когда $t_к = 45$ °С, $t_{2тр} = 27$ °С, $t_1 = 43$ °С и $t_{2ф} = 36$ °С (2-й вариант).

Решение: В 1-м варианте $K_t = 32 - 22/32 - 14 = 0{,}555$ и по (17.8):

$$Э_t = 0{,}7 \cdot 39 - \frac{13{,}5 \cdot 39}{27} \cdot 0{,}555 = 16{,}48 \cdot 10^6, \text{ руб/(ГВт} \cdot \text{год)};$$

$$Э_{t7} = \frac{(16{,}48 \cdot 600 \cdot 7) \cdot 10^6}{1000 \cdot 365} = 0{,}189 \cdot 10^6 \text{ руб.}$$

Во 2-м варианте $K_t = 43 - 36/43 = 0{,}318$:

$$Э_t = 0{,}7 \cdot 45 - \frac{13{,}5 \cdot 45}{27} \cdot 0{,}318 = 24{,}34 \cdot 10^6, \text{ руб/(ГВт} \cdot \text{год)};$$

$$Э_{t7} = \frac{(24{,}34 \cdot 600 \cdot 7) \cdot 10^6}{1000 \cdot 365} = 0{,}280 \cdot 10^6 \text{ руб.}$$

При переходе на цены 1997 г. с цен, действовавших до 01.01.91 г., приняв коэффициент $K_{инф}$, например, 5581 в 1-м варианте $Э_{t7} = 0{,}189 \cdot 10^6 \cdot 5581 = 1054 \cdot 10^6$ руб, а во 2-м $Э_{t7} = 0{,}280 \cdot 10^6 \cdot 5581 = 1562 \cdot 10^6$ руб, т. е. в 1,48 раза больше.

Приведенные затраты. Показателем экономической эффективности при сравнении технически осуществимых вариантов градирен служит разность приведенных затрат $\Delta П$.

Приведенные затраты $П$ представляют собой сумму ежегодных эксплуатационных расходов $Э$ при одновременных капитальных вложениях K, приведенных к годовым единицам измерения с помощью нормативного коэффициента сравнительной экономической эффективности $E_н$:

$$П_i = Э_i + E_н K_i, \qquad (17.9)$$

где $Э_i$ и K_i – эксплуатационные затраты и капиталовложения, отвечающие i-му варианту.

Коэффициент $E_н$ имеет значение, обратное нормативному сроку окупаемости капиталовложений. При экономических

расчетах для европейской части страны $E_н = 0{,}125$, для систем водоснабжения в районах Севера $E_н = 0{,}08$. Если в сравниваемых вариантах используются технические решения по новой технике $E_н = 0{,}15$.

При строительстве градирен более года единовременные и текущие затраты приводятся к единому моменту времени (базисному году) с помощью коэффициента приведения B по формуле

$$П_i = (Э_i + E_н K_i)B, \qquad (17.10)$$

где

$$B = (1 + E_{н.п})^{T_0 - T}. \qquad (17.11)$$

Здесь $E_{н.п}$ – норматив приведения разновременных затрат ($E_{н.п} = 0{,}08$ при $E_н = 0{,}125$ и $E_{н.п} = 0{,}1$ при $E_н = 0{,}15$); T_0 – год приведения (базисный); T – год, затраты которого приводятся к базисному году.

Для определения наиболее экономичных размеров градирни (в плане, по высоте и др.) приведенные затраты должны определяться для 3–4 переменных размеров ее элементов при различных конструкциях технологического оборудования (оросителей, разбрызгивающих устройств, водоуловителей), нескольких вариантах систем распределения воды и противообледенительных устройств, а также вентиляторного оборудования. Каждый вариант градирни должен быть увязан с режимом работы производств с оценкой производительности (мощности).

Для определения наиболее экономичной системы охлаждения, требующей по расходу воды применения группы однотипных градирен, приведенные затраты следует рассчитывать при 3–4 вариантах, отличающихся типом градирен, их размерами и размещением.

Сравнение стоимости охлаждения (а также водоподготовки или очистки сточных вод) удобно производить по суммарным затратам, отнесенным к 1 м³ воды годовой производительности градирни (водоочистного сооружения), т. е. по удельным приведенным затратам $З_{уд}$. Значение $З_{уд}$ является обобщающим показателем экономической эффективности работы сооружения и выступает в качестве результативного признака. Обычно выявляют зависимость $З_{уд}$ от суточной производительности

сооружения $G_ж$ (факторный признак). Чаще всего эта зависимость описывается степенной функцией вида $y = ax^{-b}$:

$$З_{уд} = \frac{Э + E_н K}{365 \cdot G_ж} = aG_ж^{-b}, \qquad (17.12)$$

где $G_ж$ измеряется в тыс. м³/сут.

Другим удобным показателем для сравнения экономической эффективности работы сооружений систем водоснабжения и водоотведения является себестоимость охлаждения (водоподготовки, очистки) 1 м³ воды, представляющая собой отношение общих эксплуатационных издержек производства за год к годовой производительности сооружения.

По проектам градирен, разработанным в 1960–1988 гг. Союзводоканалпроектом, ЛОАТЭП и Гипрокаучуком, были обобщены данные капитальных вложений, эксплуатационных затрат и себестоимости охлаждения воды (рис. 17.2, приложение 8).

Были обобщены также данные различных литературных источников по затратам на охлаждение оборотной воды в сухих градирнях. В результате получено уравнение (17.13), которым можно пользоваться для приблизительных расчетов

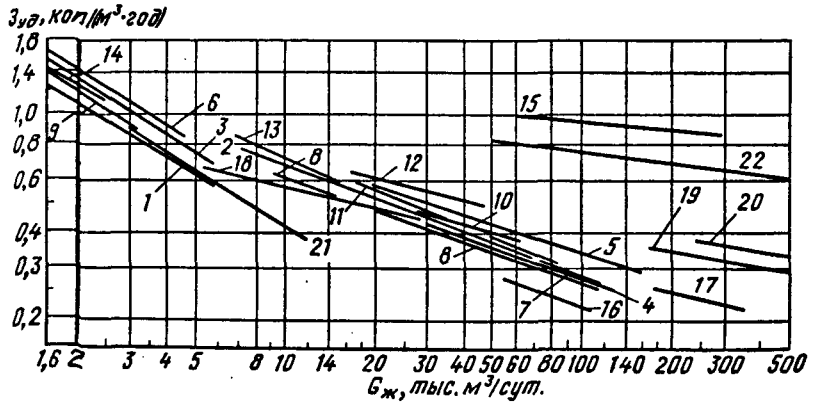


Рис. 17.2. Зависимость удельных приведенных затрат от расхода воды через градирни:

обозначение линий соответствует порядковому номеру градирен в табл. приложения 8; *22* – сухие градирни, формула (17.13); *15* – с учетом стоимости обработки оборотной воды реагентами, в отличие от всех остальных

удельных приведенных затрат $З_{уд}$, коп/(м³ · год), в ценах до 01.01.91 г. при сравнении сухих градирен с мокрыми:

$$З_{уд} = 1{,}45G_ж^{-0{,}15}, \qquad (17.13)$$

где $G_ж$ измеряется в тыс. м³/сут охлаждаемой воды ($G_ж$ = = 48 ÷ 500).

При расчетах по (17.13) цены на топливно-энергетические ресурсы приняты такими же, как в (17.8).

На основании обобщения данных типовых и индивидуальных проектов, разработанных в различные годы Союзводоканалпроектом, Харьковским Водоканалпроектом и ЦНИИЭП инженерного оборудования, были получены также зависимости $З_{уд}$ от производительности сооружений при очистке, обработке и подаче воды различных категорий качества (приложения 9 и 10).

Пример 17.2. Для строящейся системы оборотного водоснабжения ТЭС рассматриваются два варианта градирен из железобетона: 1-й вариант – башенные площадью живого сечения орошения 1600 м² и 2-й вариант – вентиляторные типа СК-400 площадью живого сечения орошения 380 м².

Параметры атмосферного воздуха при 5% обеспеченности: ϑ = 26,8 °С; τ = 18,4 °С и φ = 41% (г. Ростов-на-Дону).

Расход оборотной воды $Q_{об}$ = 34 500 м³/ч, температура нагретой воды t_1 = 38 °С, требуемая температура охлажденной воды t_2 = 28 °С.

Технологическим расчетом градирен определено, что данные условия охлаждения обеспечиваются тремя башенными градирнями при $q_ж$ = 7,2 м³/(м² · ч) или восемью вентиляторными при $q_ж$ = 12,25 м³/(м² · ч). Для этого градирни должны быть оборудованы двухпоточным оросителем ПР50Д по схеме 17 на рис. 8.4, предложенной В. С. Пономаренко.

Для сравнительной экономической оценки допускаем, что единовременные и текущие затраты на ороситель из ПР50Д близки к асбестоцементному для башенных градирен и деревянному для вентиляторных.

Рассчитать удельные приведенные затраты $З_{уд}$ по вариантам и себестоимость охлаждения воды C.

Решение. По (17.12) с использованием коэффициентов a и b, приведенных в приложении 8 (порядковый № 20 и 16), определяем $З_{уд}$

1-й вариант:

$$З_{уд}^{1гр} = 1{,}09\left(\frac{11\,500 \cdot 24}{1000}\right)^{-0{,}2} = 0{,}354 \text{ коп/(м}^3 \cdot \text{год)};$$

$$З_{уд}^{3гр} = \frac{30 \cdot 0{,}354 \cdot 365}{100} = 3{,}87 \text{ руб/(м}^3 \cdot \text{год)}.$$

2-й вариант:

$$З_{уд}^{1гр} = 1{,}38\left(\frac{4655 \cdot 24}{1000}\right)^{-0{,}4} = 0{,}209 \text{ коп/(м}^3 \cdot \text{год)};$$

$$З_{уд}^{8гр} = \frac{8 \cdot 0{,}209 \cdot 365}{100} = 6{,}1 \text{ руб/(м}^3 \cdot \text{год)}.$$

Себестоимость охлаждения воды C определяем по приложению 8 (порядковый № 20 и 16; меньшему расходу воды соответствует большее значение C).

1-й вариант:

$C = 0{,}14$ коп/м^3;

2-й вариант:

$C = 0{,}17$ коп/м^3.

Значения $З_{уд}$ и C в ценах 1997 г. при $K_{инф} = 5580$.

1-й вариант:

$$З_{уд}^{3гр} = 3{,}87 \cdot 5580 = 21\,595 \text{ руб/(м}^3 \cdot \text{год)};$$

$$C = \frac{0{,}14 \cdot 5580}{100} = 7{,}81 \text{ руб/м}^3.$$

2-й вариант:

$$З_{уд}^{8гр} = 6{,}1 \cdot 5580 = 34\,038 \text{ руб/(м}^3 \cdot \text{год)};$$

$$C = \frac{0{,}17 \cdot 5580}{100} = 9{,}48 \text{ руб/м}^3.$$

Принимаем 1-й вариант с башенными градирнями, поскольку он дешевле по значению $З_{уд}$ в 1,57 раза (34 038/21 595) и по себестоимости охлаждения воды C в 1,21 раза (9,48/7,81).

При расширении или модернизации систем оборотного водоснабжения используют и коэффициент общей (абсолютной) эффективности капитальных вложений в строительство или реконструкцию градирен $Э_к$

$$Э_к = \Delta ПР \frac{1}{K} \geqslant E_н, \qquad (17.14)$$

где $\Delta ПР$ – годовое увеличение объема чистой продукции, прибыли или разность в себестоимости продукции до и после осуществления капитальных вложений K, вызвавших этот прирост, руб/год.

Получающиеся результаты расчета $Э_к$ сравниваются с нормативными или аналогичными показателями за предшествующий период, а также с показателями общей экономической эффективности капитальных вложений на передовых предприятиях соответствующих отраслей и регионов.

Пример 17.3. Произведена реконструкция двух вентиляторных трехсекционных градирен с металлическим каркасом при площади живого сечения одной секции 64 м^2, охлаждающих оборотную воду установки пиролиза нефти. Общие капиталовложения в реконструкцию с заменой оросителя и водоуловителя из дерева на пластмассовые, ремонтом несущих конструкций, системы распределения воды и обшивки составили 3 млрд. руб. (цены 1997 г.). За счет этого достигнуто снижение среднегодовой температуры охлаждающей воды на 2,3 °С и получена годовая прибыль от увеличения выпуска топливно-энергетической продукции на сумму $2{,}5 \cdot 10^9$ руб. Кроме того, за счет снижения капельного уноса из градирен с 0,2 до 0,05% достигнута годовая экономия свежей воды на сумму $0{,}018 \times \times 10^9$ руб. Определить коэффициент общей экономической эффективности капиталовложений в реконструкцию градирен.

Решение. По (17.14)

$$Э_к = \frac{(2{,}5 + 0{,}018) \cdot 10^9}{3 \cdot 10^9} = 0{,}84 > E_н = 0{,}125.$$

При этом срок окупаемости капиталовложений в реконструкцию в данном случае значительно меньше нормативного для вентиляторных градирен и составляет (в годах)

$$\frac{1}{Э_к} = \frac{1}{0{,}84} = 1{,}19 \ll \frac{1}{E_н} = \frac{1}{0{,}125} = 8.$$

17.2. Эколого-экономическая оценка

Под эколого-экономической оценкой охладителей подразумевается определение в стоимостной форме количества используемых природных ресурсов для охлаждения оборотной воды (технологических продуктов), причиняемого при этом ущерба окружающей среде и эффективности затрат на природоохранные мероприятия.

Юридической основой взимания платы за использование природных ресурсов и загрязнение окружающей среды является Закон РФ об охране окружающей природной среды, действующий с декабря 1991 г.

Практически нет производственных объектов, которые совсем не влияют на природную среду. Охладители оборотной воды, в частности градирни, оказывают на нее в большей или меньшей мере следующие виды воздействий (ущербов):

использование земельных ресурсов $У_{з.р}$;

использование водных ресурсов $У_{в.р}$;

загрязнение водных источников $У_{в.и}$;

загрязнение атмосферы и почв $У_{з.п}$.

При оценке охлаждающей системы водоснабжения должен соблюдаться принцип достижения максимального полезного эффекта в производстве при непревышении допустимых норм по нагрузкам на природную среду $У_{пр}$ в районе размещения системы, при котором

$$У_{з.р} + У_{в.р} + У_{в.и} + У_{з.п} = У_{пр} \rightarrow \min. \qquad (17.15)$$

Различают понятия фактического и потенциального ущербов. Фактический ущерб – это фактические убытки общества или дополнительные затраты, произведенные им для ликвидации последствий загрязнения окружающей среды. Под потенциальным ущербом понимают ущерб, который может понести общество в будущем из-за нынешнего загрязнения окружающей среды.

Еще одним видом неблагоприятного воздействия на окружающую среду работающими градирнями является шум, создаваемый вентиляторами и падающим дождем воды. Однако на общем шумовом фоне промплощадки шум градирен не является превалирующим и не оказывает влияние на обслуживающий персонал.

В большинстве случаев повышенный шум градирни излучают при неправильном их расположении на рабочей площади и при дебалансе крыльчатки вентилятора, появляющегося, как правило, в результате его износа и нарушения норм эксплуатации.

В общем случае необходимо предусматривать мероприятия по снижению уровня шума на стадии проектирования, привязки градирен к местности и пусконаладочных работ, что обходится обычно в 2–3 раза дешевле, чем обеспечение защиты от шума во время эксплуатации.

Кроме того, из работающей испарительной градирни выбрасывается в атмосферу около 95% тепла, отводимого от производственного оборудования (остальная часть отводится в водоисточник с продувочной водой) в виде парового факела.

Паровой факел можно сделать невидимым, охлаждая оборотную воду на гибридных или сухих градирнях (см. гл. 12). При этом затраты на устранение видимости парового факела с поступлением в атмосферу прежнего количества тепла будут составлять разницу в приведенных затратах на мокрые и гибридные или сухие градирни. Для мокрых и сухих градирен затраты можно рассчитать по (17.8) и (17.13).

Низкопотенциальное тепло оборотных вод может быть утилизировано при помощи тепловых насосов. По предварительным оценкам удельные капитальные вложения в энергосберегающие мероприятия с такими тепловыми насосами могут оказаться в 2–3 раза ниже ожидаемых капитальных вложений в производство эквивалентного количества энергетических ресурсов. Основная проблема состоит в отсутствии достаточного количества потребителей этого низкопотенциального тепла, в связи с чем тепловые насосы в системах оборотного водоснабжения средней и большой производительности в ближайшем обозримом будущем вряд ли найдут применение.

Использование земельных ресурсов. В условиях дефицита свободных площадей и высокой стоимости требующийся меньший земельный участок под охладители выступает важным фактором его экономичности.

Оценку и сравнение охлаждающих систем водоснабжения, требующих различной площади живого сечения земельных участков под охладители, следует производить комплексно с учетом общих приведенных затрат $П$ и возможных потерь $У_t$ в производстве за счет различной температуры воды, обеспе-

Таблица 17.2. **Требующаяся площадь живого сечения под охладители**

Тип охладителя	S, га/ГВт
Вентиляторные градирни	3,5
Башенные градирни	5
[illegible]	[illegible]
Брызгальные бассейны	60
Водохранилища-охладители	570

чиваемой этими вариантами:

$$П + Ц_т S E_н + У_t \rightarrow \min, \qquad (17.16)$$

где $Ц_т$ – цена земельного участка в районе строительства охладителей, руб/га; S – площадь живого сечения участка под охладители по вариантам.

Можно руководствоваться данными Теплоэлектропроекта, приведенными в табл. 17.2 о требующейся площади живого сечения земельного участка S под охладители (площадь живого сечения отнесена к 1 ГВт тепловой мощности обслуживаемого технологического оборудования).

Нормативы стоимости освоения новых сельскохозяйственных угодий взамен изымаемых земель при строительстве сильно колеблются в зависимости от назначения угодий и типов почв. Например, для Красноярского края, Иркутской и Читинской областей – под пашню (в тыс. руб/га, цены до 01.01.91 г.) 12–29 и под сенокосы и пастбища 4–23; а для Московской области, соответственно, 60–100 и 6–80.

Использование водных ресурсов. На производство 1 т готовой продукции расход воды ориентировочно составляет, м³: чугун – 160–200; сталь – 150; прокат – 10–20; никель – 4000; медь – 500; синтетический каучук – 2000–3500; бумага – 400–800; пластмассы – 500–1000; нефть – 20. На 1 МВт · ч мощности тепловые электростанции расходуют 115–200 м³ оборотной воды в зависимости от вида топлива.

Эколого-экономическая оценка конкретного охладителя по фактору использования водных ресурсов может быть выражена обобщенным коэффициентом $K_{в.р}$:

$$K_{в.р} = \frac{ПР_t - У_{зt}}{C_в} \rightarrow \max, \qquad (17.17)$$

где

$$C_в = \frac{Q_{об} T}{100}(P_1 + P_2 + P_3) Ц_в; \qquad (17.18)$$

$ПР_t$ – полезный эффект от работы охладителя, оцениваемый производительностью обслуживаемого производства и зависящий от температуры воды, руб/год; $У_{зt}$ – отрицательное воздействие (ущерб) на окружающую среду работы охладителя, руб/год; $C_в$ – стоимость используемой свежей воды для работы охладителя, руб/год; T – продолжительность работы системы в году, ч; $Ц_в$ – цена 1 м³ свежей воды, руб.

При вычислении $K_{в.р}$ для прямоточных систем водоснабжения расход воды в них принимается за $Q_{об}$, а за $ПР_t$ и $У_{зt}$ соответственно прибыль производства от использования более холодной охлаждающей воды и наносимый при этом ущерб окружающей среде.

Плата за воду с предприятий в пределах выделенного лимита взимается по тарифам, установленным для каждой водохозяйственной системы, административной единицы или городского водопровода. Для некоторых из них тарифы приведены в табл. 17.3, 17.4, 17.6.

Таблица 17.3. **Тарифы на воду, забираемую промышленными предприятиями из подземных источников некоторых административных единиц (цены даны до 01.01.91 г.)**

Административная единица	Тариф, коп/м³
Архангельская область	8,50
Мурманская область	0,40
Карелия	0,85
Ленинградская, Костромская, Тверская, Калужская, Орловская, Московская, Владимирская, Рязанская области	2,10
Вологодская, Новгородская, Калининградская, Псковская области	0,70
Удмуртия, Татарстан, Нижегородская область	1,40
Смоленская, Брянская, Курская области	1,20
Ярославская, Ивановская, Саратовская, Волгоградская области	1,74
Тульская область	4,20
Башкирия, Пензенская, Самарская, Кемеровская, Тамбовская области	1,65
Ставропольский край, Астраханская область	1,35

Продолжение табл. 17.3

Административная единица	Тариф, коп/м³
Краснодарский край, Ростовская область	1,95
Карачаево-Черкессия	5,50
Алтайский край, Пермская, Челябинская, Читинская области	1,85
Оренбургская, Тюменская области	1,55
Омская область	3,60
Тюменская область	2,20
Новосибирская область	2,85
Красноярский край	0,80
Иркутская область	1,10
Якутия	13,30
Магаданская область	6,10
Бурятия	2,50
Хабаровский край, Амурская область	0,60
Приморский край	2,30
Сахалинская область	2,40

Таблица 17.4. **Тарифы за услуги водопровода для промышленности по некоторым городам РФ (цены даны до 01.01.91 г.)**

Город	Тариф, коп/м³	Город	Тариф, коп/м³
Алдан	100	Казань	10
Апрелевка	20	Москва	18
Барнаул	15	Н. Новгород	15
Бологое	25	Смоленск	20
Брянск	20	Тула	15
Волгоград	10	Хабаровск	35
Выборг	40	Чита	20
Гатчина	30	Ярославль	10

В 1997 г. тариф на забор воды из подземных источников в Московской области (г. Железнодорожный) был равен 2853 руб/м³; на москворецкую воду в г. Москве 160 руб/м³, а с учетом ее обработки при подаче в оборотную систему 1150 руб/м³; на водопроводную воду для промышленности 7300 руб/м³ и за сброс сточных вод (нагретой воды) в канализацию 6970 руб/м³.

Дополнительно предприятия вносят плату за безвозвратное водопотребление $Q_{б.в}$, м³/год, с коэффициентом 1,25 к тарифу

за взятую свежую воду

$$Q_{б.в} = (Q + Q_1 - Q_2) - (Q' + Q'_1 - Q'_2), \qquad (17.19)$$

где Q – количество свежей воды, взятой из водоисточника; Q_1 – то же, полученной от других предприятий (например с сырьем) и из водопроводной сети; Q_2 – то же, переданной другим предприятиям; Q' – количество сточных вод, сброшенных в водоисточник или городскую канализацию; Q'_1 – то же, полученных от других предприятий; Q'_2 – то же, переданных другим предприятиям.

Для ТЭС к расчетам безвозвратного водопотребления по (17.19) дополнительно учитываются потери конденсата. Для возмещения этих потерь производится обессоливание подпиточной воды, чем обуславливается высокая стоимость конденсата, во много раз превышающая стоимость речной воды.

Разница годовых затрат на свежую воду и сброс нагретой воды в водоисточник (канализацию) $З_{в.с}$ сравниваемых вариантов оборотных систем с различными охладителями или с прямоточным водоснабжением определяется по формуле

$$\Delta З_{в.с} = [T_в(q_1 - q_2) + T_с(P''_3 - P'_3)]W + \sum_{i=1}^{n} (З''_i - З'_i) -$$

$$- \Delta з \to \max, \qquad (17.20)$$

где $T_в$, $T_с$ – нормативы платежей соответственно за свежую воду и сброс сточных вод, руб/м³; q_1, q_3 – удельные расходы добавочной воды в системы, численно равные потерям на испарение P_1, капельный унос P_2 и продувку P_3 и отнесенные к 1 Гкал тепловой нагрузки охладителя (теплообменника), м³/Гкал; P''_3, P'_3 – удельные расходы воды на продувку систем, сбрасываемой в водоисточники, отнесенные к 1 Гкал тепловой нагрузки охладителя (теплообменника), м³/Гкал; $W = Q\Delta tc$ – тепловая нагрузка охладителя (теплообменника), Гкал/год; Q – расход воды, подаваемой на охлаждение, кг/год; Δt – средний за год перепад температур воды, °С; $З''_i$, $З'_i$ – дополнительные затраты по вариантам на перекачку свежей воды и нагретой продувочной воды, водоподготовку, очистку и др., руб/год (приложение 9, 10); $\Delta з$ – неучтенные затраты по вариантам на водопотребление и водоотведение, руб/год.

Для прямоточных систем водоснабжения в (17.20) за q принимается расход холодной воды, а за $P_з$ – нагретой.

Загрязнение водных источников. Суммарная плата предприятия за загрязнение водных источников $П^{в}_{общ}$ складывается из платы за сбросы загрязняющих веществ: в пределах допустимых нормативов сбросов $П_{ПДС}$, временно согласованных сбросов $П_{ВСС}$ и в пределах установленных лимитов $П_{сл}$:

$$П^{в}_{общ} = П_{ПДС} + П_{ВСС} + П_{сл} =$$

$$= K_{э.с}[T_{ПДС}M_{ПДС} + T_{ВСС}(M_{ВСС} - M_{ПДС}) +$$

$$+ 5T_{ВСС}(M_{ф} - M_{ВСС})], \qquad (17.21)$$

где $K_{э.с}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния водоисточника, в который сбрасываются загрязнения; $T_{ПДС}$, $T_{ВСС}$ – нормативы базовой платы за сбросы загрязняющих веществ, руб/т (табл. 17.5); $M_{ПДС} = (Q_{ст}r_{в}) \cdot 10^{6}$ – масса загрязняющих веществ, сбрасываемых со сточными водами с концентрацией, соответствующей предельно допустимому сбросу, т/ч; $M_{ВСС}$ – то же, соответствующей временно согласованному сбросу, т/ч; $M_{ф}$ – то же, при фактической концентрации загрязнений, т/ч; $Q_{ст}$ – расход сточных вод, м³/ч; $r_{в}$ – концентрация загрязняющих веществ в сточных водах, мг/л (г/м³).

Таблица 17.5. **Базовые нормативы платы за сброс некоторых загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водоисточники (с 01.03.95 г. базовые нормативы платы за сбросы увеличены в 17 раз), $T_{ПДС}$**

Загрязняющее вредное вещество	Норматив платы за сброс 1 т загрязняющих веществ, руб:	
	в пределах допустимых нормативов сбросов (ПДС)	в пределах временно согласованных сбросов (ВСС)
Аммиак	44 350	221 750
Ацетон	44 350	221 750
Масло соляровое	221 750	1 108 750
Нефть и нефтепродукты	44 350	221 750
ОП-7 флотореагент	7330	36 950
ОП-10 флотореагент	4435	22 175
Толуол	4435	22 175
Фенолы	2 217 500	11 087 500
Хром	443 500	2 217 500
Хлор	2955	14 775

Коэффициент $K_{э.с}$ зависит от водообеспеченности территории и рыбохозяйственной значимости водоисточника. Для рек РФ $K_{э.с} = 1 \div 2{,}9$, например р. Амур 1,0–1,53, р. Нева 1,11–1,91, р. Кубань (Краснодарский край) 1,49–2,9.

Норматив базовой платы за временно согласованные сбросы загрязняющих веществ

$$T_{ВСС} = З_t/\Delta M_t, \qquad (17.22)$$

где $З_t$ – затраты предприятия в t-м году, необходимые для снижения концентрации загрязняющих веществ в сточных водах до ПДС, руб; ΔM_t – уменьшение в t-м году массы загрязняющих веществ в результате затрат $З_t$, т.

Производятся также расчеты экономического ущерба от сброса загрязнений, в том числе тепла, в водоисточники по значению приведенного объема сточных вод $Q_{пр}$ и удельного показателя ущерба на единицу приведенного объема $У_{уд}$.

Приведенный объем по загрязнениям

$$Q_{пр.з} = Q_{ст}\sum_{i=1}^{n} A_i r_i, \qquad (17.23)$$

где $Q_{пр.з}$, млн. м³/год; $Q_{ст}$ – годовой объем сбрасываемых сточных вод, млн. м³; $A_i r_i$ – требуемая условная кратность разбавления загрязняющих веществ до норм ПДК; $A_i = 1/ПДК$ – коэффициент приведения, учитывающий относительную опасность i-го вещества (мг/л)$^{-1}$; ПДК – установленный норматив предельно допустимой концентрации i-го вещества в воде водоема, мг/л; r_i – концентрация i-го загрязняющего вещества в сбрасываемых сточных водах, мг/л.

Приведенный объем по температуре

$$Q_{пр\,t} = Q_{ст}\frac{t_{ст} - t_{в}}{\Delta t_{в}}, \qquad (17.24)$$

где $Q_{пр}$, млн. м³/год; $t_{ст}$, $t_{в}$ – температура сточных вод и воды водоема в месте сброса, °С; $\Delta t_{в}$ – допустимое повышение температуры воды водоема в результате сброса нагретых сточных вод, °С.

Экономический ущерб определяется по формуле

$$У_{зt} = У_{уд}(Q_{пр.з} + Q_{пр\,t}), \qquad (17.25)$$

где $У_{зt}$ – ущерб от сброса в водоисточник загрязненных и нагретых сточных вод, руб/год; $У_{уд}$ – удельный показатель ущерба для i-го водохозяйственного района или участка, руб/млн. м³ приведенного объема сточных вод или в руб/усл. т приведенной массы загрязняющих веществ (1 млн. м³ приведенного объема соответствует 1 условной тонне приведенной массы загрязнений), табл. 17.6.

Для водохозяйственных систем, не представленных в табл. 17.6, показатель $У_{уд}$ может быть рассчитан по уравнению (руб/млн. м³ $Q_{пр}$, в ценах до 01.01.91 г.)

$$У_{уд} = 1577(Q_р/Q_{ст})^{-0,2635}, \qquad (17.26)$$

где $Q_р$ – среднегодовой объем речного стока, млн. м³/год; $Q_{ст}$ – объем загрязненных и нагретых сточных вод, сбрасываемых в эту реку, млн. м³/год.

Таблица 17.6. **Тарифы на воду $C_в$ для предприятий и удельные показатели ущерба $У_{уд}$ для некоторых водохозяйственных систем (цены даны до 01.01.91 г.)**

Водохозяйственные системы, реки, озера	$C_в$, коп/м³	$У_{уд}$, руб/усл. т.
Бассейн Балтийского моря		
Нева	0,4	520
Нарва	0,44	400
Западная Двина	1,03	500
о. Ладожское	0,4	900
о. Чудское, Псковское	0,44	900
Бассейны Черного и Азовского морей		
Дунай	0,59	528
Днестр	0,90	730
Днепр (исток – г. Киев)	1,00	620
Днепр (г. Киев – Каховский г/у)		740
Днепр (Каховский г/у – устье)		760
Дон (исток – устье р. Воронеж)	0,87	690
Воронеж		820
Дон (Цимлянский г/у – устье)		765
Северный Донец	1,56	1070
Кубань (г. Армавир – устье)	1,03	945

Продолжение табл. 17.6

Водохозяйственные системы, реки, озера	$C_в$, коп/м³	$У_{уд}$, руб/усл. т.
Бассейн Каспийского моря		
Волга (до Иваньковского г/у)	1,32	420
Волга (исток – Н. Новгород)	0,98	420
Волга (Н. Новгород – Самара)		580
Волга (Самара – устье)		600
Москва		1260
Уфа, Белая	1,13	500
Урал (устье)	1,18	560
Кама		550
Терек, Кума (включая Терско-Кумский к-л)	1,03	570
Бассейн Аральского моря		
Сыр-Дарья (исток – Чардара)	1,08	750
Сыр-Дарья (Чардара – устье)	1,08	620
Аму-Дарья (исток – Тюя-Муюн)	1,08	395
о. Балхаш	0,98	600
о. Иссык-Куль	2,00	900
Бассейн Карского моря		
Иртыш (Павлодар – устье)	0,98	600
Обь	0,98	450
Тобол	1,18	720
Ангара	0,30	450
Енисей	0,30	330
о. Байкал	2,00	1200
Реки Дальнего Востока и Сибири		
Лена		160
Амур		310
Печора		280
Северная Двина		420
Онега, Кемь		300
Реки Кольского пол-ва		430

Пример 17.4. Для условий примера 17.3 определить ущерб $У_{зt}$, наносимый народному хозяйству в результате сброса в р. Волгу ниже г. Самара продувочной воды в смеси с продувочной водой других предприятий промзоны, и обобщенный коэффициент эколого-экономической эффективности использования водных ресурсов $K_{в.р}$.

Расход оборотной воды $Q_{об}$ = 4275 м³/ч (37,449 · 10⁶ м³/год); P_1 = 1,5% · $Q_{об}$ = 0,562 · 10⁶ м³/год; P_2 = 0,05% · $Q_{об}$ = 0,0187 × × 10⁶ м³/год и $P_з$ = 0,8% · $Q_{об}$ = 0,3 · 10⁶ м³/год. Общее количе-

ство сбрасываемой продувочной воды $P_з = 0{,}75 \cdot 10^6$ м^3/год. Температура продувочной воды $t_{ст} = 37\,°C$; расчетная летняя температура воды в р. Волга 22 °С; $У_{уд} = 600$ руб/млн. м^3 (усл. т) (см. табл. 17.6).

Решение. Концентрации загрязнений продувочных сточных вод с расчетом кратности разбавления приведены в табл. 17.7.

Используя (17.23) и (17.24), приведенный объем загрязнений $Q_{пр.з} + Q_{пр\,t} = 0{,}75 \cdot 10^6 \cdot 769{,}12 + 0{,}75 \cdot 10^6 \cdot 5 = 580{,}59 \cdot 10^6$ м^3/год, или 580,59 усл. т/год.

Экологический ущерб по (17.25):

в ценах до 01.01.91 г.

$$У_{з\,t} = 600 \cdot 580{,}59 = 348\,354 \text{ руб/год};$$

в ценах 1997 г. при коэффициенте пересчета, например, 7000

$$У_{з\,t} = 348\,354 \cdot 7000 = 2438 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Долевое участие предприятий в плате за экологический ущерб распределяется пропорционально сбрасываемым загрязнениям по приведенным объемам. В данном примере долевое участие рассматриваемого предприятия в наносимом ущербе ориентировочно можно принять

$$У'_{з\,t} = \frac{2438 \cdot 10^6}{0{,}75 \cdot 10^6} \cdot 0{,}3 \cdot 10^6 = 975{,}2 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

Определение обобщающего коэффициента $K_{вр}$. Из (17.18)

$$C_в = (0{,}562 + 0{,}0187 + 0{,}3) \cdot 10^6 \cdot 0{,}98 \cdot 10^{-2} = 8631 \text{ руб/год},$$

где 0,98 (коп) – тариф за 1 м^3 воды (см. табл. 17.6).

В ценах 1997 г. при коэффициенте пересчета 7000

$$C_в = 8631 \cdot 7000 = 60{,}4 \cdot 10^6 \text{ руб/год}.$$

По (17.17)

$$K_{вр} = 2500 \cdot 10^6 - 975{,}2 \cdot 10^6 / 60{,}4 \cdot 10^6 = 25{,}2,$$

где $2500 \cdot 10^6 = ПР_t$ из примера 17.3.

Таблица 17.7. **Показатели вредности загрязняющих веществ продувочной воды**

Загрязняющее вещество	Концентрация r_i (мг/л) и температура $t_{ст}$ (°С)	ПДК$_i^1$ в воде водоема (мг/л) и $\Delta t_в$ (°С)	Кратность разбавления
Солесодержание	3000	1000	3
Взвешенные вещества	60	20	3
ХПК	60	4	15
$БПК_{20}$	15	3	5
Ацетон	3	2,2	1,36
Нефтепродукты	25	0,05	500
Фосфаты	3	0,5	6
Фтор	2	1,5[2]	1,33
Фенол	0,1	0,001	100
Азот аммонийный	17	1,0	17
Нитриты (по NO_2)	5	3,3	1,5
Нитраты (по NO_3)	50	45	1,1
Хром (VI)	3	0,05	60
Цинк	10	1,0	10
Медь	1,2	1,0	1,2
Свинец	0,1	0,03	3,33
Алюминий	6	0,5	12
Железо	7	0,3	23,3
$\sum_1^{18} A_i r_i$			769,12
Температура	37	3	5[3]

[1] Для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

[2] $ПДК_{р.х} = 0{,}05$ мг/л.

[3] $\frac{t_{ст} - t_в}{\Delta t_в} = \frac{37 - 22}{3} = 5.$

Загрязнение атмосферы и почв. Капельная влага, уносимая воздухом из градирен, содержит минеральные, органические и химические примеси оборотной воды. Видовой состав загрязнений капельной влаги, как правило, соответствует типу производства и применяемым реагентам для стабилизационной обработки оборотной воды. В ней содержатся минеральные

соли, а также могут обнаруживаться нитраты, сероводород, фосфатные и азотокалийные ингредиенты, ароматические углеводороды (бензол, стирол и т. п.), хром, цинк и другие.

По агрегатному состоянию вещества, поступающие в атмосферу из градирен могут быть в виде аэрозолей или смеси паров и аэрозолей. Приземная концентрация веществ в атмосфере измеряется на высоте 1,5–2,5 м от поверхности земли.

Масса загрязняющих веществ, m_i, т/ч, поступивших в атмосферу из одиночной градирни

$$m_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{r_i F \omega 3600}{10^9}, \qquad (17.27)$$

где r_i – концентрация i-го вещества в потоке воздуха, выходящего из градирни, мг/м³; F – площадь выходного сечения градирни, м²; ω – скорость воздушного потока в выходном сечении градирни, м/с

$$r_i = \frac{r_{об} Q_{об} q_{ун} \cdot 10}{G_в}, \qquad (17.28)$$

где $r_{об}$ – концентрация вещества в оборотной воде, мг/л (г/м³); 10 – коэффициент запаса.

При одновременном совместном присутствии в атмосфере n загрязняющих веществ, что, как правило, имеет место в выбросах градирни, рассчитываются суммарная и приведенная концентрации

$$r_\Sigma = r_1 + r_2 \frac{ПДК_2}{ПДК_1} + \ldots + r_n \frac{ПДК_n}{ПДК_1}, \qquad (17.29)$$

где r_1 – концентрация вещества, к которому осуществляется приведение концентраций r_2, ..., r_n веществ, мг/м³ воздуха; ПДК – предельно-допустимые концентрации этих загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов или рабочей зоны (табл. 17.8).

При этом должно выполняться условие

$$\frac{r_1}{ПДК_1} + \frac{r_2}{ПДК_2} + \ldots + \frac{r_n}{ПДК_n} \leqslant 1. \qquad (17.30)$$

Таблица 17.8. **Предельно-допустимые концентрации некоторых загрязняющих веществ в атмосферном воздухе**

Вещество	ПДК, мг/м³		
	населенных пунктов		рабочей зоны
	Максимальная разовая	Средняя суточная	
Газы			
Аммиак	0,2	0,04	20
Хлор	0,1	0,03	1,0
Сероводород	0,008	0,008	10
Озон	0,16	0,03	0,1
Пары			
Ацетон	0,35	0,35	200
Бензин (в пересчете на углерод)	5	1,5	300
Бензол	2,4	0,8	20
Оксид фосфора (V)	0,15	0,05	1,0
Серная кислота	0,3	0,01	1,0
Сероуглерод	0,03	0,01	10
Стирол	0,003	0,003	5
Фториды (в пересчете на HF)	0,03	0,01	1
Фенол	0,01	0,01	5
Фенол сланцевый	0,007	–	–
Формальдегид	0,035	0,012	5
Аэрозоли			
Оксид хрома (VI), хроматы, дихроматы по Cr_2O_3	0,0015	0,0015	0,01
Оксид цинка (в пересчете на цинк)	–	0,05	5
Никель, оксиды никеля	–	0,001	0,5
Оксид железа (II)	–	0,04	4
Щелочи (в пересчете на NaOH)	–	–	0,5
Пыль нетоксичная	0,5	0,15	5
Пыль асбестовая	–	–	2

Для курортных зон

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{ПДК_i} \leqslant 0{,}8. \qquad (17.31)$$

Капельная влага, выносимая воздухом из градирен частично, испаряется в атмосфере полностью, мельчайшие ее фракции уносятся паровым факелом на расстояние до 10 км (в за-

висимости от скорости ветра), но преобладающая часть капель осаждается в районе расположения градирни.

Для одиночной башенной градирни, например, максимальная интенсивность выпадения капельной влаги, равная около 40 г/(м² · ч), а в пересчете на минеральные соли – (до 100 мг/(м² × × ч), приходится на площадь земельного участка размерами от одной до двух высот башни. Интенсивность выпадения влаги снижается примерно в 10 раз на расстоянии 5–6 высот башни.

В результате происходит непрерывное увлажнение, отравление почвенных организмов, изменение кислотности и состава почв, нередко используемых под сельскохозяйственные угодья. Это приводит к уменьшению плодородия почвы, снижению урожайности сельскохозяйственных культур и ухудшению их качества.

Степень загрязнения территории оценивается путем сравнения концентрации отдельных ингредиентов загрязняющих веществ в почве с ПДК (для некоторых ингредиентов, например, значение ПДК, мг/кг: цинк 23; хром (VI) 0,5; нитраты 130; бензол 0,3; суперфосфат 200; азотно-калийные 120).

Предприятия несут правовую ответственность за состояние земель и случаи нарушения порядка пользования ею.

Экономический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха и почвы определяется дополнительными затратами как в сфере материального производства (потери от снижения качества промышленной и сельскохозяйственной продукции в зоне распространения аэрозолей), так и в сфере обслуживания (здравоохранение и др.).

Ориентировочно значение этих потерь в ценах до 1.01.1991 г. может быть определено в соответствии с рекомендациями "Временной типовой методики ..." по формуле

$$У_а = \gamma G f M_а, \qquad (17.32)$$

где $У_а$ – ущерб от загрязнения атмосферы, руб/год; γ – показатель, численное значение которого рекомендуется принимать равным 2,4 руб/усл. т; G – показатель относительной "цены" загрязнения атмосферного воздуха над территориями различных типов б/з. Для промплощадок и территорий, прилегающих к промышленным предприятиям, значение G рекомендуется принимать равным 4 (если предприятие расположено в курортной зоне или на территории заповедника, G = 10, если в центральной части городов с населением более 300 тыс. чел. G = 8);

f – поправка, учитывающая характер рассеивания загрязнений в атмосфере, безразмерная. Для градирен высотой до 100 м f = 3 ÷ 15 (большей высоте градирни соответствует меньшее значение f). Для центральной части крупных городов и заповедных территорий поправка f принимается равной 10. $M_а$ – приведенная масса годового выброса загрязнений из источника, усл. т/год,

$$M_а = \sum_{i=1}^{n} A_i m_i, \qquad (17.33)$$

где m_i – масса годового выброса примеси i-го вида в атмосферу, т/год; A_i – показатель относительной агрессивности примеси i-го вида

$$A_i = a_i \alpha_i \delta_i, \qquad (17.34)$$

где a_i – показатель относительной опасности примесей в воздухе, вдыхаемом человеком, б/р; α_i – поправка, учитывающая вероятность накопления примеси в компонентах окружающей среды, б/р; δ_i – поправка, учитывающая действие примеси на различные хозяйственные объекты в зоне капельного уноса влаги из градирен, б/р; n – общее число ингредиентов, выбрасываемых в атмосферу

$$a_i = \left(\frac{60}{ПДК_{сут_i} ПДК_{р.з_i}} \right)^{0,5}, \qquad (17.35)$$

где $ПДК_{сут_i}$ – "среднесуточная" предельно допустимая концентрация i-го вещества в атмосферном воздухе, мг/м³ (см. табл. 17.8); $ПДК_{р.з_i}$ – предельно допустимое значение концентрации i-го вещества в воздухе рабочей зоны, мг/м³; 60 – коэффициент единицы измерения, мг²/м⁶.

Для определения поправок α_i и δ_i необходимо проведение специальных исследований. Ориентировочно значения их могут быть приняты равными соответственно 5 и 2 для загрязняющих веществ 1-го и 2-го классов опасности; 3 и 1,5 – для загрязняющих веществ 3-го и 4-го классов опасности (класс 1 – чрезвычайно опасные, класс 2 – высоко опасные, класс 3 – умеренно опасные, класс 4 – малоопасные).

Пример 17.5. Определить концентрацию ингибитора коррозии – бихромата натрия $Na_2Cr_2O_7$ в расчете на Cr_2O_3 в воздухе,

выходящем из градирни, при следующих исходных данных: градирня СК – 1200, $r_{об}$ = 2 мг/л по C_rO_3; $Q_{об}$ = 10 000 м³/ч, $q_{ун}$ = 0,05%, $G_в$ = 10 000 000 м³/ч.

Решение. По (17.28)

$$r_i = \frac{2 \cdot 10\,000 \cdot 0{,}05 \cdot 10}{10\,000\,000} = 0{,}001 \text{ мг/м}^3.$$

$ПДК_{р.з.}$ C_rO_3 составляет 0,01 мг/м³ (табл. 17.8).

Следовательно, добавка бихромата натрия дозой 2 мг/л по C_rO_3 допустима.

Приложение 1. **Соотношение между единицами физических величин**

Величины	Единица измерения в СИ	Соотношение между единицами измерения СИ и наиболее часто встречающимися единицами других систем и внесистемными
Длина	м	1 мкм = 10^{-6} м
		1 Å = 10^{-10} м
		1 *ft* = 0,3048 м
Масса	кг	1 т = 1000 кг
		1 ц = 100 кг
Температура	К	t °C = (t + 273,15) К
		t °F = $\left[\frac{5}{9} - (t - 32) + 273{,}15\right]$ К
Угол плоский	рад	$1° = \frac{\pi}{180}$ рад
		$1' = \frac{\pi}{10\,800}$ рад
		1 оборот = 2π рад = 6,28 рад
Вес (сила тяжести)	Н	1 кгс = 9,81 Н
		1 дин = 10^{-5} Н
		1 стен = 10^{-3} Н
Вязкость динамическая	Па · с	1 П = 1 дин · с/м² = 0,1 Па · с
		$1 \text{ сП} = \frac{1}{9180} \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} =$
		= 10^{-3} Па · с = 1 МПа · с
Вязкость кинематическая	м²/с	1 Ст = 1 см²/с = 10^{-4} м²/с
		1 ft²/s = 0,093 м²/с

Величины	Единица измерения в СИ	Соотношение между единицами измерения СИ и наиболее часто встречающимися единицами других систем и внесистемными
Давление	Па	1 бар = 10^5 Па
		1 мбар = 100 Па
		1 дин/см² = 1 мбар = 0,1 Па
		1 кгс/см² = 1 ат = 9,81 · 10^4 Па =
		= 735 мм рт. ст.
		1 кгс/м² = 9,81 Па
		1 мм вод. ст. = 9,81 Па
		1 мм рт. ст. = 133,3 Па
Мощность	Вт	1 кгс · м/с = 9,81 Вт
		1 эрг/с = 10^{-7} Вт
		1 ккал/ч = 1,163 Вт
Натяжение поверхностное	Н/м	1 кгс/м = 9,81 Дж/м²
		1 эрг/см² = 1 дин/см = 10^{-3}
		Дж/м² = 10^{-3} Н/м
Объем	м³	1 л = 10^{-3} м³ = 1 дм²
		1 ft³ = 28,3 дм³ = 2,83 · 10^{-3} м³
Плотность	кг/м³	1 т/м³ = 1 кг/дм³ = 1 г/см³ =
		= 10^3 кг/м³
		1 кгс · с²/м⁴ = 9,81 кг/м³
Плотность теплового потока (теплонапряжение, удельная тепловая нагрузка)	Вт/м²	1 ккал/(м² · ч) = 1,163 Вт/м²
Площадь	м²	1 ft² = 0,0929 м²
Работа, энергия, количество теплоты	Дж	1 кгс · м = 9,81 Дж
		1 эрг = 10^{-7} Дж
		1 кВт · ч = 3,6 · 10^6 Дж
		1 ккал = 4,1868 · 10^3 Дж = 4,19 кДж
		1 BTU = 1055,1 Дж
Расход объемный	м³/с	1 л/мин = 16,67 · 10^{-6} м³/с
		1 ft³/s = 28,3 · 10^{-3} м³/с
Скорость линейная	м/с	1 ft/c = 0,3048 м/с
Скорость угловая	рад/с	1 об/мин = π/30 рад/с
Теплоемкость удельная массовая	Дж/(кг · К)	1 ккал/(кг · °С) = 4,19 кДж/(кг · К)
		1 эрг/(г · К) = 10^{-4} Дж/(кг · К)
Теплопередачи (теплоотдачи) коэффициент	Вт/(м² · К)	1 ккал/(м² · ч · °С) = 1,163 Вт/(м² · К)

Продолжение прилож. 1

Величины	Единица измерения в СИ	Соотношение между единицами измерения СИ и наиболее часто встречающимися единицами других систем и внесистемными
Теплопроводность	Вт/(м · К)	1 ккал/(м · ч · °С) = 1,163 Вт/(м · К)
Теплота удельная (фазового превращения)	Дж/кг	1 ккал/кг = 1 кал/г = 4,19 кДж/кг
Частота	Гц	1 Гц = 1 $с^{-1}$ 1 об/с = 1 Гц 1 об/мин = 1/60 Гц
Энтальпия удельиая	Дж/кг	1 ккал/кг = 1 кал/г = 4,19 кДж/кг

Приложение 2. **Физические свойства воды**

Температура ϑ, °С	Плотность γ, кг/$м^3$	Теплопроводность λ, ккал/(м · ч · °С)	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^6$, кг/(с · $м^2$)	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$, $м^2$/с	Теплота парообразоваиия r, ккал/кг
0	999,8	0,474	182,0	1,790	597,3
5	1000,0	0,484	154,3	1,515	594,5
10	999,7	0,494	133,0	1,300	591,7
15	999,1	0,505	116,5	1,140	588,9
20	998,2	0,515	102,0	1,000	586,0
25	997,1	0,523	90,6	0,891	583,2
30	995,7	0,531	81,7	0,806	580,4
35	994,1	0,538	73,6	0,727	577,6
40	992,2	0,545	66,6	0,659	574,7
45	990,2	0,551	61,1	0,606	571,8
55	985,7	0,562	51,8	0,515	566,1
60	983,2	0,567	47,9	0,478	563,2
65	980,6	0,571	44,5	0,445	560,2
70	977,8	0,574	41,4	0,415	557,3
75	974,9	0,577	38,7	0,389	554,3
80	971,8	0,580	36,2	0,365	551,3
85	968,7	0,583	34,0	0,344	548,3
90	965,3	0,585	32,1	0,326	545,2
95	961,9	0,587	30,3	0,309	542,1
100	958,4	0,587	28,8	0,295	539,0

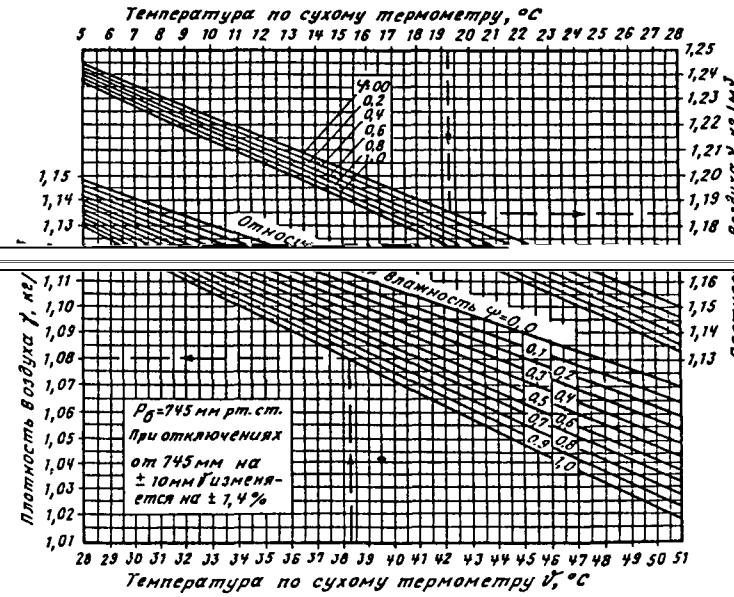
Примечание. Все константы для воды (т. е. исключая r) при 1 ата.

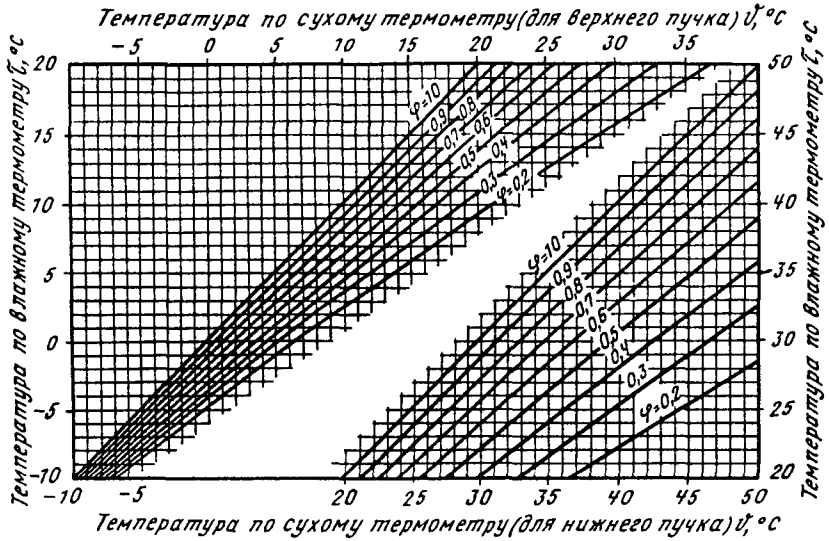
Приложение 3. **Физические свойства сухого воздуха при давлении 1 ата***

Температура ϑ, °С	Плотность γ, кг/$м^3$	Теплопроводность λ, ккал/(м · ч · °С)	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$, $м^2$/с
–20	1,351	0,0198	12,0
–10	1,300	0,0204	12,8
0	1,252	0,0210	13,7
10	1,206	0,0217	14,7
20	1,164	0,0223	15,7
30	1,127	0,0229	16,6
40	1,092	0,0235	17,6
50	1,057	0,0241	18,6
60	1,025	0,0248	19,6
70	0,996	0,0254	20,6
80	0,968	0,0260	21,7
90	0,942	0,0266	22,7
100	0,916	0,0272	23,8

* При давлениях, близких к 1 ата, можно считать, что λ не зависит от давления, а ν обратно пропорционален давлению.

Приложение 4. **Плотность влажного воздуха**





Приложение 6. **Показатели надежности оборудования сооружений, обеспечивающих подачу и распределение воды**

Тип оборудования, диаметр трубопроводов, мм	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^4$ 1/ч [1/(ч · км)] при δ = 0,95			Интенсивность ремонтов, $\mu \cdot 10^2$ 1/ч
	λ_{min}	$\lambda_{ср}$	λ_{max}	
Водозаборные сооружения				
Водоприемники:				
раструбные	0,2	0,02	0,01	0,5
ряжевые	0,1	0,02	0,01	0,5
железобетонные	0,05	0,01	0,005	0,5
Самотечные линии из труб:				
стальных	0,1	0,25	0,4	0,5
железобетонных	0,2	0,4	0,6	0,5
Водозаборные скважины:				
обсадные трубы:				
стальные	0,1	0,12	0,16	0,5
асбестоцементные	0,3	0,8	0,9	0,5

Тип оборудования, диаметр трубопроводов, мм	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^4$ 1/ч [1/(ч · км)] при δ = 0,95			Интенсивность ремонтов, $\mu \cdot 10^2$ 1/ч
	λ_{min}	$\lambda_{ср}$	λ_{max}	
фильтры:				
проволочные	0,5	1,25	2	0,5
каркасно-стержневые	0,2	0,3	0,5	0,5
гравийные	0,1	0,2	0,3	0,5
скважинные насосы:				
ЭЦВ4-2,5-63	1	1,25	1,6	2
ЭЦВ4-4-45, ЭЦВ4-4-70	1	1,25	1,6	2
ЭЦВ4-4-130, ЭЦВ4-4190	1,2	1,4	1,6	2
ЭЦВ6-6, 3-60, ЭЦВ6-6, 3-85	0,8	1,3	2,6	2
ЭЦВ6-6, 3-125, ЭЦВ6-6, 3-175	0,9	1,5	3,6	2
ЭЦВ-10-50, ЭЦВ6-10-80	0,8	1,25	1,8	2
ЭЦВ6-10-110, ЭЦВ6-10-185	0,9	1,5	3,6	2
ЭЦВ8-16-50, ЭЦВ8-16-75	1	1,6	4	2
ЭЦВ10-63-65, ЭЦВ10-63-110	1,25	2	4	2
ЭЦВ10-120-60	2	2,5	4	2
Насосные станции				
Насосы типа К:				
1,5К-8/19а, 1,5К-8/19б	1	1,25	4	10
1,5КМ-8/19а, 1,5КМ-8/19б	1	1,25	3	10
2К-20/30а, 2К-20/30б	0,6	1	3,2	10
2КМ-20/30а, 2КМ-20/30б	0,6	1	3	10
2К-20/18а, 2К-20/18б	0,6	1,2	4	10
2КМ-20/18а, 2КМ-20/18б	0,5	1,2	4	10
3К-45/90, 3К-45/55	0,9	2	3	4
3К-45/90а, 3К-45/55а	0,9	2	3	4
3К-45/30, 3К-45/30а	0,9	1,5	3	4
4К-90/85, 4К-90/55	1,4	2,5	4	4
4К-90/35, 4К-90/20	1,4	2,5	4	4
4К-90/35а, 4К-90/20а	1,4	2,5	4	4
6К-160/60, 6К-160/20	0,9	2	3,5	4
6К-160/60а, 6К-160/20а	0,9	2	3,5	4
8К-290/30, 8К-290/18	1,4	2,5	4	4
Насосы типа Д:				
Д200-95, Д200-36, Д320-70	1	2,5	3	4
Д500-65, Д630-90, Д500-65	1,2	2,5	3,2	4
Д800-28, Д1000-40, Д1250-65	1	2,5	4	4
Д1600-90, Д2000-21, Д2000-34	1,2	2,7	3,2	4

Продолжение прилож. 6

Тип оборудования, диаметр трубопроводов, мм	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^4$ 1/ч [1/(ч · км)] при $\delta = 0{,}95$			Интенсивность ремонтов, $\mu \cdot 10^2$ 1/ч
	λ_{min}	$\lambda_{ср}$	λ_{max}	
Д2500-17, Д2500-45, Д2500-62	1,2	2,5	3	4
Д3200-20, Д3200-33, Д3200-55	1,5	3	4	4
Д4000-95, Д5000-32, Д5000-50	1,5	3	4	4
Насосы типа ФГ:				
ФГ 14,5/10, ФГ 16/27	0,6	1,6	3	8
ФГ 29/40, ФГ 51/58, ФГ 81/31	0,6	1,6	3	8
ФГ 81/18, ФГ 144/46	0,8	2	3	8
ФГ 216/24, ФГ 144/10,5	0,9	2,5	3	8
ФГ 450/22,5, ФГ 540/95	0,9	2,5	3	8
Трубопроводы стальные внутри станции	0,01	0,04	0,15	6
Блоки управления	–	0,95	–	4
Водоприемные камеры, резервуары	0,01	0,03	0,1	4
Задвижки с электроприводом	0,01	0,6	1	4
Обратные клапаны	0,04	0,08	1	4
Водоводы и водопроводные сети				
Трубы чугунные (нормальные условия) диаметром, мм:				
100	0,9	1,02	1,14	1–4
150	0,75	0,92	1,09	1–4
200	0,7	0,87	1,05	1–4
250	0,6	0,8	1	1–4
300	0,55	0,7	0,85	1–4
400	0,5	0,62	0,74	1–4
500	0,47	0,52	0,57	1–4
600	0,44	0,48	0,53	1–4
700	0,4	0,44	0,48	1–4
800	0,36	0,39	0,42	1–4
900	0,36	0,37	0,4	1–4
Трубы стальные (нормальные условия) диаметром, мм				
100	0,18	0,29	0,4	2–4
150	0,16	0,25	0,35	2–4

Продолжение прилож. 6

Тип оборудования, диаметр трубопроводов, мм	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^4$ 1/ч [1/(ч · км)] при $\delta = 0{,}95$			Интенсивность ремонтов, $\mu \cdot 10^2$ 1/ч
	λ_{min}	$\lambda_{ср}$	λ_{max}	
200	0,15	0,22	0,3	2–4
250	0,13	0,19	0,25	2–4
300	0,12	0,18	0,20	2–4
400	0,11	0,15	0,18	2–4
500	0,1	0,13	0,15	2–4
600	0,1	0,12	0,14	2–4
700	0,1	0,12	0,13	2–4
800	0,1	0,11	0,12	2–4
900	0,1	0,105	0,11	2–4
Сетевые задвижки	0,1	0,15	0,8	1–4
Очистные сооружения				
Корпус безнапорных осветительных фильтров, контактных осветителей, отстойников	0,02	0,05	0,15	0,5–1
Дренаж:				
трубчатый	0,1	0,25	0,4	0,5–1
колпачковый	0,15	0,2	0,5	0,5–1
пористобетонный	0,05	0,15	0,3	0,5–1
Напорные фильтры	0,05	0,1	0,2	1–2
Барабанные сетки	0,8	1,6	2	2
Обеззараживающие установки (замена ламп):				
ОВ-АКХ-1	2	2,5	4	10
ОВ-1П	2	2,5	4	10
ОВ-1П-РКС	2	2	4	10
Хлораторы ЛОНИИ-100	0,2	0,8	1,25	10
Контрольно-измерительные приборы	–	1,25	–	10
Трубопроводы стальные внутри станции	0,01	0,04	0,15	6
Задвижки с электроприводом	0,1	0,3	0,8	2

Примечание. μ характеризует степень ремонтноспособности оборудования в каждый момент периода ликвидации его отказа.

Приложение 7. **Наиболее применяемые ингибиторы коррозии в открытых системах оборотного водоснабжения (цены до 01.01.91 г.)**

№ композиции	Состав композиции ингибитора	Стоимость реагента, руб/т	Ориентировочная доза ингибитора в оборотной воде, мг/л
1	Бихромат калия	325	До 5 по CrO_4^{2-}
	или натрия	312	До 5 по CrO_4^{2-}
	Сульфат цинка	500	До 2 по Zn^{2+}
2	Бихромат калия	325	До 4 по CrO_4^{2-}
	или натрия	312	До 4 по CrO_4^{2-}
	Сульфат цинка	500	До 3 по Zn^{2+}
	Полифосфаты	630	До 5 по PO_4^{3-}
3	Полифосфаты	630	15–30 по P_2O_5
	Сульфат цинка	500	До 2 по Zn^{2+}
4	Сульфат цинка	500	5–30
	Кислота оксиэтилендифосфоновая (ОЭДФ)	4000	При соотношении доз компонентов 1 : 1
5	Полифосфаты	630	Разовая 100 мг/л, затем до 15 мг/л по $P_2O_5^*$
6	Силикат натрия (30%)	40,5	10–40 по SiO_2

* Для создания защитной фосфатной пленки концентрация ингибитора в оборотной воде в течение 2 – 3 сут принимается 100 мг/л, затем для поддержания фосфатной пленки ингибитор подается в добавочную воду дозой до 15 мг/л.

Приложение 8. **Стоимость охлаждения воды на градирнях (цены даны до 01.01.91 г.), см. рис. 17.2**

№ п/п.	Тип и материал оросителя	Материал каркаса	$F_{ор}$, м^2	$G_ж$, тыс. м^3/сут	C, коп/м^3	$Э_{уд} = aG_ж^{-в}$, коп/(м^3 · год)	
						a	$в$
	Вентиляторные секционные						
1	Пленочный, дерево (сосна)	Сталь	4 – 24	1 – 5,8	1,63 – 0,43	1,66	0,61
2		Железобетон	32 – 532	7,7 – 127,7	0,59 – 0,14	1,65	0,39
3		Дерево	4 – 24	1 – 5,8	1,83 – 0,47	2,12	0,64
4	То же мягколиственные породы дерева	Железобетон	128 – 532	30,7 – 127,7	0,26 – 0,14	1,45	0,36
5	То же, пластмасса	Сталь	32 – 648	7,7 – 155,5	0,64 – 0,22	1,6	0,34
6	Капельный, дерево (сосна)	Сталь	4 – 24	0,8 – 4,6	2,26 – 0,53	2,25	0,65
7	То же	Сталь	384 – 576	73,7 – 110,6	0,21 – 0,19	2,05	0,43
8	– ” –	Железобетон	48 – 576	9,2 – 110,6	0,5 – 0,15	1,38	0,36
9	– ” –	Дерево	4 – 24	0,8 – 4,6	2,29 – 0,55	2,05	0,71
10	То же, мягколиственные породы дерева	Железобетон	128 – 320	24,6 – 61,4	0,32 – 0,22	1,19	0,28
	Брызгальный с воздухонаправляющими щитами из:						
11	дерева (сосна)	Железобетон	128 – 576	18,4 – 82,9	0,42 – 0,20	2,11	0,43
12	мягколиственных пород дерева	Железобетон	128 – 320	18,4 – 46,1	0,43 – 0,29	1,47	0,29
13	пластмассы	Железобетон	48 – 120	6,9 – 17,3	0,65 – 0,37	2,19	0,49
	расположенные на зданиях с плоской кровлей						
14	Пленочный, пластмасса	Алюминий	4 – 12	1 – 2,9	1,78 – 1,0	1,82	0,46
	вертикальный блок ”градирня – насосная станция”						

№ п/п.	Тип и материал оросителя	Материал каркаса	$F_{ор}$, м^2	$G_ж$, тыс. м^3/сут	C, коп/м^3	$З_{уд} = aG_ж^{-в}$, коп/(м^3 · год)	
						a	$в$
15	Пленочный, пластмасса	Сталь	288 – 1008	60 – 288	0,73 – 0,87**	1,49	0,10
	То же	Сталь	576	96	1,12***	1,96	0,10
		отдельно стоящие типа СК-400 и СК-1200					
16	Капельно-пленочный, дерево (сосна)	Железобетон	400	55 – 120	0,19 – 0,17	1,38	0,4
17	То же	Железобетон	1200	173 – 350	0,17 – 0,14	0,90	0,25
		Башенные					
18	Пленочный, дерево (сосна)	Сталь	16 – 256	3,6 – 43,2	0,57 – 0,30	1,02	0,25
19	То же, асбестоцемент	Сталь	1200 – 4000	168 – 768	0,15 – 0,13	0,86	0,18
20	То же	Железобетон	1600 – 4000	240 – 768	0,14 – 0,11	1,09	0,2
		Открытые					
21	Капельный, дерево и брызгальный	Дерево	4 – 80	0,72 – 12	2,47 – 0,34	1,91	0,66

* В расчетах экономико-математических моделей приложений 8, 9 и 10 принимал участие канд. техн. наук А. Н. Шаммасов.

** Для одной группы циркуляционных насосов с учетом обработки оборотной воды фосфатами, медным купоросом и хлорирования.

*** Для двух групп насосов с учетом подкисления оборотной воды, обработки фосфатами, медным купоросом и хлорирования.

Приложение 9. **Зависимости удельных приведенных затрат $З_{уд}$, коп/(м^3 · год), от производительности сооружений $G_ж$, тыс. м^3/сут, при подготовке подпиточной, обработке оборотной и очистке продувочной воды (цены даны до 01.01.91 г.)**

Вид технологического процесса (основные сооружения и оборудование)	$G_ж$, тыс. м^3/сут	$З_{уд} = aG_ж^{-в}$	
		a	$в$
Отстаивание на первичных отстойниках (время отстаивания 1,5 ч):			
радиальных	34 – 665	0,43	0,11
горизонтальных	26 – 123	0,51	0,11
вертикальных	5 – 29	1,37	0,44
Отстаивание с реагентной обработкой ПАА и сернокислым алюминием (песколовка, нефтеловушка, смеситель, камера хлопьеобразования, радиальный отстойник, реагентное хозяйство)	2 – 72	21,1	0,34
флокулянтом (полочная нефтеловушка, смеситель, камера хлопьеобразования, полочный отстойник, реагентное хозяйство)	2 – 72	11,2	0,22
Фильтрование:			
на каркасно-засыпных фильтрах	0,1 – 200	11,5	0,46
на песчаных фильтрах	0,1 – 25	15,35	0,72
на фильтрах с загрузкой из синтетических материалов (полиуретан)	7,2 – 12	2,55	0,62
Микрофильтрование при содержании взвешенных веществ без учета стоимости реагентов:			
до 150 мг/л	5 – 200	3,79	0,48
до 2500 мг/л	5 – 32	5,87	0,67
Очистка воды на скорых фильтрах при содержании взвешенных веществ до 50 мг/л (скорые фильтры, микрофильтры, реагентное хозяйство, насосное оборудование)	3 – 50	33	0,53
Очистка воды на контактных осветлителях (контактные осветлители, баражные сетки, реагентное хозяйство, насосное оборудование) без учета стоимости реагентов	3 – 200	45,8	0,62
Очистка воды на установке "Струя" с коагуляцией	0,1 – 0,8	15,7	0,79

Вид технологического процесса (основные сооружения и оборудование)	$G_ж$, тыс. м³/сут	$З_{уд} = aG_ж^{-в}$	
		а	*в*
Опреснение воды:			
электродиализом	0,025 – 100	0,83*	0,34
дистилляцией	1 – 100	1,66*	0,25
Двухступенчатая очистка воды на осветлителях со взвешенным осадком (реагентное хозяйство, насосы) с доочисткой на скорых фильтрах	5 – 32	35,68	0,47
Подготовка городских сточных вод для повторного использования, включая полную биологическую очистку в аэротенках–смесителях и доочистку на:			
каркасно-засыпных фильтрах с хлорированием	25 – 500	40,9	0,40
то же с озонированием	25 – 500	35,2	0,26
то же с контактной коагуляцией и хлорированием	25 – 500	42,8	0,38
Очистка городских сточных вод на высоконагружаемых биофильтрах (аэрофильтрах); высота загрузки 4 м	4 – 29	8,39	0,49
Флотационная рециркуляционная очистка сточных вод с обработкой:			
ПАА и сернокислым алюминием (флотатор, сатуратор, насосно-компрессорное оборудование, реагентное хозяйство)	2 – 72	16,7	0,4
флокулянтом (то же)	2 – 72	14,11	0,37
Хлорирование природной оборотной воды газообразным хлором дозой:			
3 мг/л	16 – 400	1,61	0,48
5 мг/л	16 – 240	1,83	0,43
Озонирование природных вод	1 – 12	9,23	0,54
Обеззараживание сточных вод перед повторным использованием:			
газообразным хлором	1 – 12	6,62	0,98
озоном	1 – 12	29,55	0,54
Подкисление подпиточной воды при дозе серной кислоты (по товарному продукту):			
3 мг/л	16 – 84	9,37	0,54
12 мг/л	16 – 84	0,82	0,27
100 мг/л	16 – 84	2,48	0,06
Фосфатирование подпиточной воды при дозе триполифосфата натрия (по товарному продукту):			
3 мг/л	16 – 84	0,65	0,25
5 мг/л	16 – 84	0,89	0,29
10 мг/л	16 – 84	0,67	0,13
Обработка оборотной воды медным купоросом при дозе (по товарному продукту):			
5 мг/л	16 – 84	0,018	0,41
8 мг/л	16 – 84	0,002	0,37

* $З_{уд}$ по (17.12) выражено в руб/(м³ · год).

Приложение 10. **Зависимости удельных приведенных затрат $З_{уд}$, коп/(м³ · год), от производительности сооружений $G_ж$, тыс. м³/сут, на подачу подпиточной, оборотной и продувочной воды (цены даны до 01.01.91 г.)**

Наименование сооружений	$G_ж$, тыс. м³/сут	$З_{уд} = aG_ж^{-в}$	
		а	*в*
Подпиточная вода			
Насосные станции первого подъема с заглубленным машинным залом:			
из сборно-монолитного ж/б	14 – 130	2,74	0,34
из монолитного ж/б	15 – 67	2,68	0,34
из сборного ж/б	15 – 87	2,68	0,34
Насосные станции II подъема	1,2 – 24	2,06	0,15
Оборотная вода			
Насосные станции (без стоимости здания):			
с одной группой насосов	4,8 – 48	1,49	0,19
с двумя группами насосов и установкой по реагентной обработке воды	48	2,76	0,25
то же, расположенных в отдельно стоящих зданиях	96 – 288	6,89	0,39

Наименование сооружений	$G_ж$, тыс. м^3/сут	$З_{уд} = aG_ж^{-в}$	
		a	$в$
Подача подпиточной (продувочной) воды по трубопроводам длиной L, км		$З_{уд} = aL^в$	
	12	4,6	0,19
	19,2	2,87	0,19
	28,8	1,91	0,19
	48,0	2,06	0,13
	60,0	1,71	0,11

Приложение 11. **Основные организации в Российской Федерации, занимающиеся градирнями по состоянию на IV кв. 1997 г.**

Организация	Вид выполняемых работ
ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО, г. Москва	Теоретические и экспериментальные исследования градирен, тепловые и аэродинамические расчеты, натурные обследования и испытания, разработка новых конструкций градирен и их технологических элементов, составление нормативных документов и заключений
ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, г. С.-Петербург	
СОЮЗВОДОКАНАЛПРОЕКТ, г. Москва	Разработка проектов новых и реконструируемых градирен, составление нормативных документов
АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ, г. С.-Петербург	Разработка проектов новых и реконструируемых градирен башенных, вентиляторных, сухих и гибридных, составление нормативных документов
ТЕПЛОЭЛЕКТРОПРОЕКТ, г. Москва	Разработка проектов новых и реконструируемых градирен башенных и вентиляторных
ГИПРОКАУЧУК, г. Москва	Разработка проектов реконструируемых градирен, преимущественно отдельностоящих вентиляторных типа СК-400 и СК-1200
ОРГРЭС, г. Москва	Натурные обследования и испытания, эксплуатация, ремонт, разработка проектов реконструируемых градирен и разработка нормативно-методических документов

Организация	Вид выполняемых работ
Производственные фирмы ТЕХЭКОПРОМ, г. Москва	Изготовление и поставка Блоков оросителей и водоуловителей из призм решетчатых ПР50, малогабаритных градирен "Росинка" полной заводской готовности и полимерной загрузки для сооружений биологической очистки сточных вод
ЭКО-СЕРВИС К, г. Москва	Водоуловителей ВВОЖ-1, пленочных оросителей БОВ-1 ПВХ, капельных оросителей ОП ПНД 500 х 500, БОС ПНД-1-1, БОС ПНД-1-2, БОС ПНД-1-3 и БОС ПНД-1-4
АЛОРИС, г. Москва	Водоразбрызгивающих сопл тангенциального типа диаметром 20 х 12, 32 х 16 и 32 х х 22 мм, малогабаритных градирен ГМВ полной заводской готовности, разработка проектов реконструируемых градирен и водооборотных систем
АНД ГАЗТРУБПЛАСТ, г. Москва	Оросителей типа "Бальке-Дюрр", водоуловителей с профилем пластин в виде трапеции типа ВПД-40/205 и чашечных водоразбрызгивающих сопл
ЭНЕРГО-КОМПОЗИТ, г. Москва	Водоуловителей с профилем пластин в виде полуволны и сферозубчатых водоразбрызгивающих сопл
ЦЕНТУРИОН и ХИМТЕХКОМ, г. Москва	Многотарельчатых водоразбрызгивающих сопл и реконструкция вентиляторных градирен с использованием полимерного технологического оборудования
ВОДЭХ, г. Москва	Оросителей ФР30 из фасонных решеток, водоуловителей с профилем пластин в виде полуволны и реконструкция градирен
ПОЛИФЕР, г. Москва	Оросителей ЯПВ-60
ИРВИК, г. Москва	Технологического оборудования из полимерных материалов
РЕЦИКЛ, г. Москва	Эжекционных градирен и оптимизация режимов водооборотных систем
ТЭП-ПОЛИС, п. Тучково Московской обл.	Оросителей ТПВВ и водоуловителей с профилем пластин в виде полуволны
ИЦ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, г. С.-Петербург	Оросителей ОП-2Г1М, водоуловителей с пластинами уголкового профиля и водоразбрызгивающих сопл
ТЕПЛОМАШ, г. С.-Петербург	Малогабаритных градирен ГРД полной заводской готовности

Продолжение прилож. 11

Организация	Вид выполняемых работ
ЭКОТЭП, г. С.-Петербург	Водоуловителей с пластинами уголкового профиля
ПОЛИМЕРХОЛОДТЕХНИКА, г. Нижнекамск	Оросителей из гофротруб ф 44 мм и водоуловителей из профилированных пластин
ВАЙГАЧ, г. Новгород	Градирен "ВАЙГАЧ" и струйно-винтовых сопл
ВОТУМ, г. Казань	Оросителей ТР60 и реконструкция градирен
ГИДРОТЕХ, г. Казань	Оросителей из гофротруб ф 63 мм и водоразбрызгивающих сопл СКРС-24, БРИКС-24
ПОЛИПЛАСТ, г. Владикавказ	Оросителей Р500 в виде сетчатых рулонов
ВОЛГОХИМРЕМОНТ, г. Волгоград	Оросителей из гофротруб ф 63 мм
АКСАНД, г. Ессентуки Ставропольского края	Малогабаритных градирен "АКСАНД" полной заводской готовности
МОВЕН, г. Москва	Осевых вентиляторов №№ 4; 5; 6,3; 8; 10 и 12,5 в традиционном металлическом исполнении
КОМВЕН, г. Москва	То же из композитных материалов
ПИТОН, г. Москва	Вентиляторов ВГ25, рабочих колес ВГ70-ЛС и редукторных приводов для вентиляторов ВГ50 и ВГ70
НАДЕЖДА-93, г. Москва	Рабочих колес вентиляторов ВГ70
ЭКОВИНТ, г. Москва	Рабочих колес с вертолетными лопастями вентиляторов ВГ70 и ВГ104
ГИДРОАЭРОЦЕНТР, г. Жуковский Московской обл.	Рабочих колес вентиляторов ВГ50 с лопастями из стеклопластика
САФОНОВСКИЙ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД, г. Сафоново Смоленской обл.	Вентиляторов ВГ50 и ВГ70, электродвигателей к ним 2АСВ0710S32, 2АСВ0710L 34
КАЗАНСКИЙ ВЕРТОЛЕТНЫЙ ЗАВОД, г. Казань	Рабочих колес вентиляторов ВГ104 с вертолетными лопастями
АГРОСТРОЙСЕРВИС, г. Дзержинск Нижегородской обл.	Реконструкция вентиляторных и башенных градирен с использованием технологических элементов из полимерных материалов
ЭТЕРНА, г. Челябинск	Малогарабитных градирен, сетчатых полимерных оросителей и водоразбрызгивающих сопл
НЕМА ВЕРМЕТАУШЕР ГМБХ, Представительство в России, г. Москва	Поставки градирен, вентиляторов и технологического оборудования немецкой фирмы "Бальке-Дюрр"

НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

1. **СНиП 2.04.02-84.** Водоснабжение. Наружные сети и сооружения/ Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1985.

2. **Пособие** по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения)/ ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.

3. **СНиП 2.01.01-82.** Строительная климатология и геофизика/ Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1983.

4. **О единых** нормах амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР. Постановление Совета Министров СССР № 1072 от 22.10.1990.

5. **Санитарные** правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения. СаНПиН 4630-88/ М.: Минздрав СССР, 1988.

6. **Санитарные** правила и нормы охраны прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения СаНПиН 4631-88. М.: Минздрав СССР, 1988.

7. **Предельно-допустимые** концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М.: Минздрав СССР, 1984.

8. **ГОСТ 27.002-89.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Госкомстандарт СССР, 1990.

9. **Указания** по расчету капельных вентиляторных градирен с поперечным током воздуха. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1958.

10. **Указания** по гидравлическому расчету напорных трубчатых систем для распределения воды в водопроводных очистных сооружениях. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1988.

11. **Указания** по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН 369-74/ Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1975.

12. **Указания** по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике// Южтехэнерго. М.: СПО Союзтехэнерго, 1981.

13. **Методические** указания по водно-химическому режиму бесточных систем охлаждения. МУ 34-70-095-85. М.: СПО Союзтехэнерго, 1985.

14. **Типовая** инструкция по приемке и эксплуатации башенных градирен (РД 34.22.402–94)// АО ОРГРЭС. М.: СПО ОРГРЭС, 1997.

15. **Технические** указания по расчету и проектированию башенных противоточных градирен для тепловых электростанций и промышленных предприятий. ВСН 14–67/ ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Л.: Энергия, 1971.

16. **Временная** типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. М.: Экономика, 1986.

17. **Инструкция** по натурным испытаниям и исследованиям башенных градирен большой производительности. ВСН 25–80/ Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1982.

18. **Инструкция** по нормированию выбросов (сбросов) загрязняющих веществ в атмосферу и в водные объекты. М.: Госкомитет СССР по охране природы. 1989.

19. **Руководство** по проектированию градирен. М.: ЦИТП, 1980.

20. **Руководство** по оптимизации оборотной системы водоснабжения электростанций с градирнями. М.: Минэнерго СССР, 1981.

21. **Рекомендации** по расчету показателей точности измерений, обработке данных и планированию эксперимента. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1985.

22. **Рекомендации** по модернизации элементов градирен. М.: СПО Союзтехэнерго, 1989.

23. **Методические** рекомендации по расчету технико-экономических показателей и эколого-экономической оценке эффективности охлаждающих систем оборотного водоснабжения промпредприятий/ М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1990.

24. **Методика** расчета выбросов капель и содержащихся в них загрязняющих веществ из градирен. Спб.: НТЦ Промохладители, 1992.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов Н. Н.** Надежность систем водоснабжения. М.: Стройиздат, 1984.

2. **Качественный** состав бноценоза биологической пленки и очистка оборотной воды на градирнях/ В. А. Антонов и др.// Химия и технология воды. 1986. Т. 8. № 3.

3. **Алферова Л. А., Нечаев А. П.** Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, районов и комплексов. М.: Стройиздат, 1984.

4. **Арефьев Ю. И., Гладков В. А.** Проверка соответствия работы градирен расчетным условиям// Проектирование водоснабжения и канализации. 1969. № 3 (56).

5. **Арефьев Ю. И., Лобачев П. В.** Обработка результатов измерений при определении расхода в трубопроводах методом площадь – скорость// Водоснабжение и санитарная техника. 1980. № 10.

6. **Арефьев Ю. И., Горин И. И., Спиридонова Н. В.** Автоматизация лабораторных исследований градирен// Численное моделирование и автоматизация эксперимента в гидравлических исследованиях. Тр. ВНИИ ВОДГЕО. М.: 1989.

7. **Применение** ЭВМ для обработки экспериментальных данных при исследованиях оросителей градирен/ Ю. И. Арефьев, Н. В. Медведева, Г. Г. Пронина, Н. В. Спиридонова// Численное моделирование и автоматизация эксперимента в гидравлических исследованиях. Тр. ВНИИ ВОДГЕО. М.: 1989.

8. **Арефьев Ю. И.** Аэродинамический расчет производительности вентиляторных градирен// Системы водяного охлаждения/ М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО. 1991.

9. **Арефьев Ю. И.** Исследования охлаждающей способности брызгальных градирен// Очистка природных вод в системе водного хозяйства промпредприятий. М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО, 1980.

10. **Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Основные направления исследований и концепции по совершенствованию конструкций вентиляторных градирен// VII симпозиум МАГИ по градирням и брызгальным бассейнам/ Л.: ВНИИГ, 1990.

11. **Арефьев Ю. И., Спиридонова Н. В.** Влияиие высоты оросителя на его охлаждающую способность// Проектирование водоснабжения и канализации. Сер. 20. Вып. 3 (125). М.: 1979.

12. **Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** К вопросу эффективности брызгальных градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1992. № 2.

13. **Арефьев Ю. И., Балашов Е. В., Костиков Н. В.** Разработка и внедрение пластмассовых элементов градирен на предприятиях отрасли// Энерготехноло-

гические процессы и аппараты химических производств. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1989.

14. **Арефьев Ю. И., Гладков В. А.** Исследование уноса воды из вентиляторных градирен. Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 115 Л.: Энергия, 1977.

15. **Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Капельные оросители градирен// Системы водяного охлаждения технологического оборудования. М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО. 1991.

16. **Вентиляторы** градирен/ Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко, В. Е. Вайсман, В. А. Трубников// Водоснабжение и санитарная техника. 1996. № 4.

17. **Малогабаритная** вентиляторная градирня "Паюс–ВОДГЕО"/ Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко, Я. З. Стоник// Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 8.

18. **Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Пластмассовые водоуловители градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 10.

19. **Арефьев Ю. И., Терехов А. Л.** Исследование шума градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1981. № 2.

20. **Арефьев Ю. И., Котляр Р. Г.** Расчет шума градирен, размещаемых на селитебных территориях// Проектирование и инженерные изыскания. 1986. № 3.

21. **Арефьев Ю. И.** Технико-экономические аспекты применения в градирнях пластмассовых оросителей и водоуловителей в сравнении с традиционными конструкциями// Энергохозяйство за рубежом. 1984. № 1.

22. **Арефьев Ю. И., Андрюшин В. Г.** Влияние неплотностей в обшивке на работу вентиляторной градирни// Инженерное обеспечение объектов строительства. Сер. 9. Вып. 10. М.: 1984.

23. **Арефьев Ю. И., Спиридонова Н. В.** Лабораторные и натурные исследования оросителей из поливинилхлорида// Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Гидроаэродинамические исследования и проектирование охладителей тепловых и атомных электростанций. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

24. **Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Водораспределительные устройства градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1996. № 2.

25. **Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Параметры воздуха при расчете вентиляторных градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1996. № 7.

26. **Арефьев Ю. И., Андрюшин В. Г., Спиридонова Н. В.** Натурные исследования вентиляторной градирни с пластмассовым оросителем в системе оборотного водоснабжения// Усовершенствование методов водоподготовки для систем производственного и хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО, 1984.

27. **Берман Л. Д.** Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М.: Госэнергоиздат, 1957.

28. **Берман Л. Д.** Технико-экономические показатели "сухих" систем охлаждения конденсаторов паровых турбин ТЭЦ и АЭС// Энергохозяйство за рубежом. 1974. № 6.

29. **Брусиловский И. В.** Аэродинамика осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1984.

30. **Галустов В. С.** Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1989.

31. **Гладков В. А., Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Вентиляторные градирни. М.: Стройиздат, 1976.

32. **Гладков В. А., Арефьев Ю. И.** Интенсификация охлаждения воды в пленочных вентиляторных градирнях// Водоснабжение и санитарная техника. 1975. № 2.

33. **Гладков В. А., Арефьев Ю. И.** Исследование полей скоростей перед вентиляторами градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1965. № 6.

34. **Гладков В. А., Пономаренко В. С.** Экономия электроэнергии в оборотном цикле водоснабжения// Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 11.

35. **Гладков В. А., Пономаренко В. С.** Технологический расчет градирен по графикам охлаждения// Водоснабжение и санитарная техника. 1991. № 12.

36. **Гладков В. А., Арефьев Ю. И.** Исследование водоуловителей вентиляторных градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1969. № 8.

37. **Параметры** воздуха для расчета охладителей воды/ В. А. Гладков, В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев, В. А. Трубников// Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 8.

38. **Гладков В. А., Пономаренко В. С.** Влияние неравномерного распределения воды на эффективность работы градирен// Тр. ВНИИ ВОДГЕО. Вып. 29. М.: 1971.

39. **Гончаров В. В.** Брызгальные водоохладители ТЭЦ и АЭС. Л.: Энергоатомиздат, 1989.

40. **Гордин И. В.** Резервы экономии электроэнергии в системах оборотного водоснабжения// Промышленная энергетика. 1983. № 4.

41. **Отведение** и очистка поверхностных сточных вод/ В. С. Дикаревский, А. М. Курганов, А. П. Нечаев, М. И. Алексеев: Учебн. пособие для вузов. Л.: Стройиздат, 1990.

42. **Эксплуатация** систем водоснабжения и газоснабжения/ В. Д. Дмитриев, Д. А. Коровин, А. И. Кораблев и др.: Справочник/ Под ред. В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. 3-е изд. перераб. и доп. Л.: Стройиздат. 1988.

43. **Джуринский М. Б.** Применение полимерных материалов при строительстве градирен. Информэнерго. Сер. Тепловые электростанции. Вып. 4. М.: 1981.

44. **Жабо В. В.** Охрана окружающей среды на ТЭЦ и АЭС: Учебник для техникумов. М.: Энергоатомиздат, 1992.

45. **Зисман С. Л.** Выбор систем технического водоснабжения паротурбинных элекростанций с учетом их влияния на окружающую среду// Электрические станции. 1990. № 8.

46. **Ильин Ю. А.** Расчет надежности подачи воды. М.: Стройиздат, 1987.

47. **Калинин Е. В.** Энергетические балансы и планирование энергоресурсов на промышленных предприятиях. М.: Знание. МДНТП, 1980.

48. **Королев И. И., Бенклян С. Э.** Гибридные градирни для системы техводоснабжения электростанций// Энергетическое строительство. 1994. № 7.

49. **Королев И. И., Генова Е. В., Бенклян С. Э.** О комбинированных системах охлаждения ТЭЦ// Теплоэнергетика. 1996. № 11.

50. **Клячко В. А., Апельцин И. Э.** Очистка природных вод. М.: Изд-во лит. по строительству, 1971.

51. **Курганов А. М., Федоров Н. Ф.** Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник/ Л.: Стройиздат, 1986.

52. **Кучеренко Д. И., Гладков В. А.** Оборотное водоснабжение: (Системы водяного охлаждения). М.: Стройиздат, 1980.

53. **Лобачев П. В., Шевелев Ф. А.** Расходомеры для системы водоснабжения и канализации. М.: Стройиздат, 1976.

54. **Энергетика** и природа (экологические проблемы развития электроэнергетики)/ Г. Н. Лялик, С. Г. Костина, Л. Н. Шапиро и др./ Под ред. Г. Н. Лялика, А. Ш. Резниковского. М.: Энергоатомиздат, 1995.

55. **Рациональное** использование и очистка воды на машиностроительных предприятиях/ В. М. Макаров и др. М.: Машиностроение, 1988.

56. **Маслов Н. Н., Коробов Ю. И.** Охрана окружающей среды на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов. М.: Транспорт, 1996.

57. **Осипов П. Е.** Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод. М.: Лесная промышленность, 1981.

58. **Пажи Д. Г., Галустов В. С.** Основы техники распыления жидкостей. М.: Химия. 1984.

59. **Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И., Казилин Е. Н.** Опыт модернизации вентиляторной градирни// ВСТ. Водоснабжение и санитарная техника. – Haustechnik. 1996. № 5.

60. **Пономаренко В. С., Гладков В. А.** Исследование капельных потоков при разбрызгивании воды соплами. Тр. ВНИИ ВОДГЕО. Вып. 17, 1967.

61. **Пономаренко В. С., Гладков В. А.** Использование полимерных материалов в конструкциях вентиляторных градирен большой производительности// Доклады СЭВ, ЧССР, 1986.

62. **Пономаренко В. С., Давыдова Т. А.** Технико-экономическая оценка секционных вентиляторных градирен// Экономика рационального использования водных ресурсов в промышленности. М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО, 1990.

63. **Пономаренко В. С., Шаммасов А. Н.** Экономическая и экологическая оценка применения тепловых насосов// Экономика рационального использования водных ресурсов в промышленности. М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО, 1990.

64. **Пономаренко В. С.** Расчет допустимой температуры охлажденной воды на градирнях в зимних условиях// Системы водяного охлаждения технологического оборудования. М.: Тр. ВНИИ ВОДГЕО. 1991.

65. **Пономаренко В. С.** Оросители, водоуловители и водоразбрызгивающие сопла из полимеров в конструкциях градирен// Обзорная информация. М.: ВНИИНТПИ, 1991.

66. **Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И.** Оросители и водоуловители градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 2.

67. **Пономаренко В. С.** Технологическое оборудование градирен// Электрические станции. 1996. № 11.

68. **Пономаренко В. С.** О реконструкции вентиляторных градирен// Химическая промышленность. 1996. № 7.

69. **Пономаренко В. С.** Повышение эффективности систем оборотного водоснабжения на базе градирен типа "Росинка"// Мясная индустрия. 1996. № 6.

70. **Пономаренко В. С.** О реконструкции башенных градирен// Энергетик. 1997. № 4.

71. **Пономаренко В. С.** Технические и экологические аспекты применения градирен типа "Росинка" в системах холодильных установок// Холодильная техника. 1997. № 2.

72. **Пономаренко В. С.** Оценка надежности градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1997. № 6.

73. **Преображенский В. П.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978.

74. **Прохоров Е. И., Барменкова И. П.** Применение малогабаритных градирен// Водоснабжение и санитарная техника. 1996. № 5.

75. **Психрометрические** таблицы. Л.: Гидрометеоиздат, 1957.

76. **Стерман Л. С., Лавыгин В. М., Тишин С. Г.** Тепловые и атомные электрические станции: Учебник для вузов/ М.: Энергоатомиздат, 1995.

77. **Фарфоровский Б. С., Пятов Я. Н.** Проектирование охладителей для системы производственного водоснабжения. Л.: Госстройиздат, 1960.

78. **Фарфоровский Б. С., Фарфоровский В. Б.** Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций. Л.: Энергия, 1972.

79. **Шабалин А. Ф.** Эксплуатация промышленных водопроводов. – 3-е изд. М.: Металлургия, 1972.

80. **Шевелев Ф. А.** Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных асбестоцементных и пластмассовых водопроводных труб. М.: Стройиздат, 1970.

81. **Оптимизация** режимов водооборотных систем/ В. П. Щукин и др.// Семинары МДНТП им. Дзержинского. М.: 1987.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ... 3
Основные условные обозначения ... 6
Глава 1. **Градирни в системах промышленного водоснабжения** ... 8
1.1. Охлаждение воды в промышленности ... 8
1.2. Технико-экономические и экологические аспекты применения градирен в системах промышленного водоснабжения ... 11
1.3. Схемы промышленного водоснабжения с градирнями ... 16
Глава 2. **Виды и выбор градирен для систем водоснабжения с различными производственными циклами** ... 30
2.1. Виды градирен ... 30
2.2. Выбор градирен ... 55
Глава 3. **Особенности процесса охлаждения воды в градирнях** ... 63
Глава 4. **Расчет градирен** ... 68
4.1. Расчетные зависимости ... 68
4.2. Исходные данные ... 82
4.3. Способы расчета ... 83
Глава 5. **Параметры воздуха при расчете градирен** ... 98
Глава 6. **Определение расхода воздуха в вентиляторных градирнях** ... 108
6.1. Аэродинамический расчет подачи вентиляторов градирен ... 108
6.2. Вентиляторные установки ... 119
Глава 7. **Определение расхода воздуха и температуры охлажденной воды при естественной тяге** ... 128
7.1. Башенные градирни ... 128
7.2. Открытые градирни ... 146
Глава 8. **Технологические элементы градирен** ... 151
8.1. Оросители ... 151
8.2. Водоуловители ... 176
8.3. Водораспределительные устройства ... 187
Глава 9. **Потери воды в охлаждающих системах оборотного водоснабжения** ... 214
Глава 10. **Определение основных размеров градирен** ... 220
Глава 11. Размещение градирен ... 225
11.1. Размещение градирен на промплощадке ... 225

11.2. Взаимодействие вентиляторных градирен, расположенных группами ... 227
11.3. Корректировка расчетных параметров наружного воздуха при расположении градирен группами ... 231
Глава 12. **Специфические градирни** ... 234
12.1. Поперечноточные градирни ... 234
12.2. Сухие градирни ... 237
12.3. Гибридные градирни ... 240
12.4. Градирни с тонкослойным отстойником в водосборном бассейне 242
12.5. Малогабаритные градирни типа "Росинка" ... 244
12.7. Применение градирен в процессах очистки воды ... 248
Глава 13. **Требования к материалам для градирен** ... 250
13.1. Общая часть ... 250
13.2. Ограждающие конструкции ... 254
13.3. Технологическое оборудование ... 259
Глава 14. **Эксплуатация градирен** ... 264
14.1. Приемка градирен в эксплуатацию ... 264
14.2. Испытания градирен ... 266
14.3. Эксплуатация градирен в зимнее время ... 276
14.4. Допустимая температура охлажденной воды ... 280
14.5. Оценка работы градирен с выключенными вентиляторами ... 283
14.6. Ремонт градирен ... 287
Глава 15. **Оценка надежности градирен при проектировании и эксплуатации** ... 289
Глава 16. **Охрана окружающей среды** ... 301
16.1. Общие положения ... 301
16.2. Шумовые характеристики градирен ... 302
16.3. Допустимые уровни шума ... 305
16.4. Расчет требуемого снижения шума, создаваемого градирнями 305
16.5. Основные мероприятия по снижению шума градирен ... 310
16.6. Взаимодействие выбрасываемых из градирен аэрозолей на окружающую среду ... 311
Глава 17. **Технико-экономические показатели и эколого-экономическая оценка градирен** ... 314
17.1. Технико-экономические показатели ... 315
17.2. Эколого-экономическая оценка ... 330
Приложение 1. Соотношение между единицами физических величин 346
Приложение 2. Физические свойства воды ... 348
Приложение 3. Физические свойства сухого воздуха ... 349
Приложение 4. Плотность влажного воздуха ... 349
Приложение 5. Психометрическая диаграмма ... 350
Приложение 6. Показатели надежности оборудования систем водоснабжения ... 350
Приложение 7. Наиболее применяемые ингибиторы коррозии в открытых системах оборотного водоснабжения ... 354

Приложение 8. Стоимость охлаждения воды на градирнях 355
Приложение 9. Зависимости удельных приведенных затрат от производительности сооружений при подготовке подпиточной, обработке оборотной и очистке продувочной воды 357
Приложение 10. Зависимости удельных приведенных затрат от производительности сооружений на подачу подпиточной, оборотной и продувочной воды 359
Приложение 11. Основные организации в России, занимающиеся градирнями по состоянию на IV кв. 1997 г. 360
Нормативно-методические документы 363
Список литературы 365

Справочное издание

Пономаренко Виктор Семенович
Арефьев Юрий Иванович

ГРАДИРНИ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Справочное пособие

Заведующий редакцией *Т. И. Мушинска*
Редактор *Н. Н. Сошникова*
Художественный редактор *Б. Н. Тумин*
Технический редактор *Н. М. Брудная*
Корректоры: *Е. В. Кудряшова, С. Ю. Торокина*

ЛР № 010256 от 07.07.97.

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинал-макета 15.10.98.
Формат 60 × 88 1/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,03.
Усл. кр.-отт. 23.03. Уч.-изд. л. 24,79. Тираж 1000 экз. Заказ 633 1

Энергоатомиздат. 113114, Москва М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в типографии НИИ "Геодезия"
г. Красноармейск Московской обл.