



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Е.Б. Агапитов
М.С. Соколова

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРАДИРЕН ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2018

УДК 658.265(075)
ББК 38.761я7

Рецензенты:

кандидат технических наук,
заместитель начальника ЦЭСТ
ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
В.Н. Михайловский

кандидат технических наук,
доцент кафедры физики,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»
М.В. Вечеркин

Агапитов Е.Б., Соколова М.С.

Проектирование градирен для систем водоснабжения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Евгений Борисович Агапитов, Маргарита Сергеевна Соколова ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,57 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.
ISBN 978-5-9967-1138-3

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами дисциплин «Технологические энергоносители предприятий», «Энергосбережение при транспорте и распределении теплоты», «Генерация энергии и интенсивное энергосбережение». Содержит методику и примеры теплового и аэродинамического расчета градирни. В пособии рассмотрены основные охлаждающие системы водоснабжения промышленных и энергетических предприятий. Приведены основные критерии оценки эффективности работы градирни.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров направлений 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

УДК 658.265(075)
ББК 38.761я7

ISBN 978-5-9967-1138-3

© Агапитов Е.Б., Соколова М.С., 2018

© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРИМЕР РАСЧЕТНОГО ЗАДАНИЯ ПО ОБОРОТНОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ	4
1.1. Расчет сети промышленного водоснабжения	5
2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ.....	15
2.1. Вентиляторные установки	15
3. ПРИНЦИП ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ	17
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГРАДИРЕН	18
4.1. Оросители	18
4.2. Водораспределительная система	21
4.3. Каплеуловители.....	22
5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ	24
5.1. Выбор расчетных параметров	24
5.2. Основные уравнения теплового расчета градирни.....	26
5.3. Пример расчета вентиляторной градирни	28
5.4. Тепловой расчет вентиляторной градирни.....	29
6. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ	30
7. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ.....	33
8. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В ГРАДИРНЕ	34
8.1. Расчет диаметров трубопроводов.....	35
9. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ.....	36
9.1. Аэродинамический расчет четырехсекционной вентиляторной градирни.....	39
10. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ВОДЫ	43
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	45
Приложение 1	46
Приложение 2	51
Приложение 3	52
Приложение 4	53
Приложение 5	54
Приложение 6	55
Приложение 7	56
Приложение 8	57
Приложение 9	58
Приложение 10	59
Приложение 11	60

ВВЕДЕНИЕ

Вода в промышленности и энергетике широко используется для охлаждения самых разнообразных веществ и узлов установок (например, цилиндров компрессоров, кладки производственных печей и т.д.). Существуют две основные схемы производственного водоснабжения:

- **прямоточное** (с однократным использованием воды, например, из рек и сливом теплой воды обратно в реку);
- **оборотное**.

Оборотное водоснабжение – это система водоснабжения, которая обеспечивает многократный оборот одной и той же охлаждающей воды в технологическом процессе.

Применение оборотного водоснабжения вместо прямоточного позволяет существенно уменьшить расход природной воды и тепловое загрязнение окружающей среды. Этот вид водоснабжения наиболее часто применяется в системах охлаждения промышленных предприятий и тепловых станций, которые являются крупнейшими потребителями охлаждающей воды для технологических целей.

Так как в процессе охлаждения оборудования вода, отбирая теплоту, сама нагревается, для последующего использования ее, в свою очередь, необходимо охладить. Для снижения температуры охлаждающей воды при оборотной схеме водоснабжения применяются пруды-охладители, брызгальные бассейны, градирни. В условиях растущей концентрации промышленных производств применение градирен практически единственный перспективный метод рассеивания низкопотенциальной тепловой энергии в атмосферу.

1. ПРИМЕР РАСЧЕТНОГО ЗАДАНИЯ ПО ОБОРОТНОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Рассчитать кольцевую сеть для водоснабжения промышленного предприятия. Сеть (рис.1) состоит из двух смежных колец I и II. Направления путевых расходов q_{i-j} линий указаны предположительно.

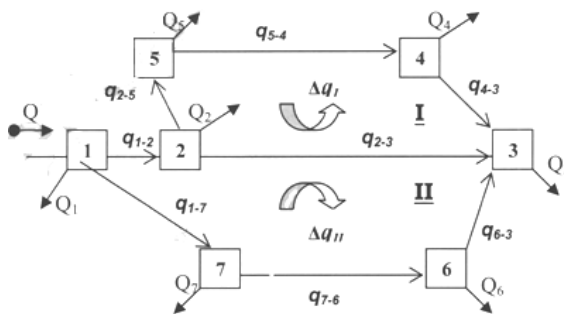


Рис. 1. Схема сети водоснабжения

В период наибольшего расчетного водопотребления из сети забирается вода в количестве $Q = \sum Q_i$.

В ходе расчетов необходимо найти:

- диаметры всех водопроводных линий D_{i-j} ;
- скорости течения воды на всех участках сети;
- величины потерь напора h_{i-j} на всех участках сети;
- уточнить направления течения воды на всех участках сети;
- исправленные (за счет перебрасываемых) значения расчетных расходов Q'_i (или Q'_i и т. д.) в каждой точке отбора;
- минимальный необходимый напор сети $h_{\min}$;
- требуемый напор $h_{\text{сети}}$ и суммарный расход воды Q сети (основные характеристики насоса и (или) водонапорной башни).

1.1. Расчет сети промышленного водоснабжения

В период наибольшего расчетного водопотребления из сети вода забирается в количестве:

$$Q = \sum Q_i,$$

где Q – отбор в отдельных n точках сети, л/с;

l_{i-j} – длины участков от точки i до точки j , м.

ε_{i-j} – экономический фактор, учитывающий влияние стоимости укладки труб, величины амортизационных отчислений по участкам и т.д.

Чем выше ε_{i-j} , тем выгоднее прокладывать трубы большого диаметра. Этот коэффициент, как правило, рассчитывается экономическими службами предприятия.

Таблица 1

Расход воды на участках

Расход на участках, л/с	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
	20	25	50	23	24	20	22

Таблица 2

Длины участков и экономический фактор

Участок	2-5	5-4	4-3	1-2	2-3	1-7	7-6	6-3
Длины участков, м	300	650	350	200	550	300	450	200
Экономический фактор	0,5	1	1,5	2	1	1	0,9	0,9

Величина потерь напора $h_{\text{изб}} = 7$ м.

1. Находим общий расчетный водозабор из сети всеми объектами водопотребления Q :

$$Q_{\text{л/с}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 =$$

$$= 20 + 25 + 50 + 23 + 24 + 20 + 22 = 184 \text{ л/с};$$

$$Q = Q_{\text{л/с}} / 1000 = 184 / 1000 = 0,184 \text{ м}^3/\text{с}$$

2. Для определения путевых расходов всех участков сети находим эквивалентные экономические длины каждого из участков:

$$l_{i-j}^{\text{э}} = \frac{l_{i-j}}{\text{Э}_{i-j}} \text{ м}$$

Таблица 3

Эквивалентные экономические длины

$l_{1-2}^{\text{э}}$	$l_{5-4}^{\text{э}}$	$l_{4-3}^{\text{э}}$	$l_{2-5}^{\text{э}}$	$l_{2-3}^{\text{э}}$	$l_{1-7}^{\text{э}}$	$l_{7-6}^{\text{э}}$	$l_{6-3}^{\text{э}}$
100	650	233,3	600	550	300	500	222,2

3. Находим суммарные эквивалентные экономические длины всех возможных путей от водозабора из внешней сети до углового потребителя, имеющего возможность потребления из нескольких различных ветвей сети:

Ветвь 1:

$$L_1^{\text{э}} = l_{1-2}^{\text{э}} + l_{2-5}^{\text{э}} + l_{5-4}^{\text{э}} + l_{4-3}^{\text{э}} = 100 + 600 + 650 + 233,3 = 1583,3 \text{ м}$$

Ветвь 2:

$$L_2^{\text{э}} = l_{1-2}^{\text{э}} + l_{2-3}^{\text{э}} = 100 + 550 = 650 \text{ м}$$

Ветвь 3:

$$L_3^{\text{э}} = l_{1-7}^{\text{э}} + l_{7-6}^{\text{э}} + l_{6-3}^{\text{э}} = 300 + 500 + 222,2 = 1022,2 \text{ м}$$

4. Находим доли водоподачи узловому потребителю, поступающие по разным ветвям сети:

$$K_i = \frac{\sum_{i=1}^n L_i^{\text{э}} - L_i^{\text{э}}}{\sum_{i=1}^n L_i^{\text{э}}} \cdot \frac{1}{(n-1)}$$

где i – номер ветви;

$n = 3$ – количество ветвей.

$$K_1 = \frac{3255,5 - 1583,3}{3255,5} \cdot \frac{1}{3-1} = 0,25;$$

$$K_2 = \frac{3255,5 - 650}{3255,5} \cdot \frac{1}{3-1} = 0,41;$$

$$K_3 = \frac{3255,5 - 1022,2}{3255,5} \cdot \frac{1}{3-1} = 0,34;$$

При проверке получаем $\sum K_i = 1$.

5. Находим подачу воды узловому потребителю, поступающую по разным ветвям сети:

$$q_{4-3} = Q_3 \cdot K_1 = 0,05 \cdot 0,25 = 0,012 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{2-3} = Q_3 \cdot K_2 = 0,05 \cdot 0,41 = 0,02 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{6-3} = Q_3 \cdot K_3 = 0,05 \cdot 0,37 = 0,017 \text{ м}^3/\text{с}$$

6. Находим путевые расходы на каждом участке пути:

$$q_{1-2} = Q_2 + Q_5 + Q_4 + Q_3 \cdot K_1 = 0,025 + 0,024 + 0,023 + 0,012 = 0,084 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{2-5} = Q_5 + Q_4 + Q_3 \cdot K_1 = 0,024 + 0,023 + 0,012 = 0,059 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{5-4} = Q_4 + Q_3 \cdot K_1 = 0,023 + 0,012 = 0,035 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{1-7} = Q_7 + Q_6 + Q_3 \cdot K_3 = 0,022 + 0,02 + 0,017 = 0,059 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{7-6} = Q_6 + Q_3 \cdot K_3 = 0,025 + 0,02 = 0,045 \text{ м}^3/\text{с};$$

7. Находим экономические диаметры отдельных водопроводных линий:

$$D_{i-j} = \varepsilon_{i-j}^x \cdot q_{i-j}^{3x}$$

где $x = 0,14$ – теоретическое значение для труб среднего диаметра (для расходов до 200 л/с); $x = 0,15$ – для расходов от 200 до 500 л/с; $x = 0,16$ – для расходов свыше 500 л/с.

8. Подбираем ближайшие по значению диаметры стандартных труб из следующего ряда: 50; 75; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500 и далее через 100.

Таблица 4

Подбор диаметров стандартных труб

Участок	D_{2-5}	D_{5-4}	D_{4-3}	D_{1-2}	D_{2-3}	D_{1-7}	D_{7-6}	D_{6-3}
Экономический диаметр, мм	276	244,6	165,1	389	193,4	304	246	177,9
Нормализованный диаметр, мм	273	244,5	168	377	193,7	325	244,5	177,8

9. Проверяем соответствие выбранных диаметров рекомендуемому диапазону экономических скоростей. Среднее значение экономических скоростей рекомендовано выбирать в пределах:

- для труб малых и средних диаметров (до 500 мм) 0,6-0,9 м/с;
- для труб больших диаметров (свыше 500 мм) 0,9-1,2 м/с.

В зависимости от назначенной и технологических требований возможны более широкие пределы скоростей 0-3 м/с.

Большие скорости способствует возникновению гидравлических ударов, снижение скорости менее рекомендуемой приводит к повышенным капитальным вложениям.

$$v_{i-j} = \frac{4 \cdot q_{i-j}}{\pi \cdot D_{i-j}^2} \text{ м/с}$$

Таблица 5

Скорость движения воды

v_{2-5}	v_{5-4}	v_{4-3}	v_{1-2}	v_{2-3}	v_{1-7}	v_{7-6}	v_{6-3}
1	0,74	0,54	0,75	0,68	0,71	0,78	0,68

Все рассчитанные участки соответствуют рекомендуемым скоростям, кроме участка 6-3. Это значение превышает рекомендованные, однако при увеличении диаметра скорости снизятся ниже рекомендованных, поэтому в дальнейших расчетах принимаем рассчитанные скорости.

Результаты расчетов сводим в таблицу 6.

Таблица 6

Сводная таблица результатов расчета

Участок сети	l , м	l_3 , м	q , м /с	D , мм	v , м/с
5-4	650	650,00	0,035	244,5	0,75
4-3	350	233,33	0,012	168	0,54
1-2	200	100,00	0,084	377	0,75
2-3	550	550,00	0,02	193,7	0,68
7-6	450	500,00	0,037	244,5	0,79
6-3	200	222,22	0,017	177,8	0,69
1-7	300	300,00	0,059	325	0,71
2-5	300	600,00	0,059	273	1,01

10. Потери напора в стальных и чугунных трубах на единицу длины трубы:

$$i = S_0 \cdot Q^2,$$

где S_0 – удельное сопротивление линий (сопротивление трения, приходящееся на 1 м линии), зависящее от диаметра трубы и шероховатости внутренней поверхности стенок.

Существует ряд эмпирических зависимостей, в том числе таблиц и диаграмм, для определения i и S_0 , например, проф. Ф.А. Шевелева и таблиц, созданных на их основе. Для стальных и чугунных труб:

- в области квадратичного сопротивления (при скорости $v > 1,2$ м/с):

$$i = 0,00107 \cdot \frac{v^2}{D^{1,3}}$$

- переходной области (при скорости $v < 1,2$ м/с):

$$i = 0,000912 \cdot \frac{v^2}{D^{1,3}} \cdot \left(1 + \frac{0,867}{V}\right)^{0,3}$$

Так как скорости во всех линиях нашего водопровода меньше 1,2 м/с, то используем формулу для переходной области.

Таблица 7

Потери напора на участках

i_{2-5}	i_{5-4}	i_{4-3}	i_{1-2}	i_{2-3}	i_{1-7}	i_{7-6}	i_{6-3}
0,006	0,004	0,0036	0,0023	0,0045	0,0025	0,0044	0,0127

10. Удельное сопротивление линий:

$$S_0 = \frac{i_{i-j}}{q_{i-j}^2} \text{ Па/м}$$

Таблица 8

Удельное сопротивление линий

S_{2-5}	S_{5-4}	S_{4-3}	S_{1-2}	S_{2-3}	S_{1-7}	S_{7-6}	S_{6-3}
1,74	3,26	25,16	0,33	11,37	0,73	3,23	17,87

11. Сопротивление всех линий сети по заданным длинам линий:

$$S_{i-j} = S_0^{i-j} \cdot l_{i-j} \text{ Па}$$

Сопротивление всех линий сети приведено в таблице 9.

Таблица 9

Сопротивление всех линий сети

S_{2-5}	S_{5-4}	S_{4-3}	S_{1-2}	S_{2-3}	S_{1-7}	S_{7-6}	S_{6-3}
520,65	2117,27	8804,7	65,54	6252,13	217,88	1452,89	3574,4

12. Для упрощения дальнейших расчетов находим произведения:

$$S_{i-j} \cdot q_{i-j}$$

2-5	5-4	4-3	1-2	2-3	1-7	7-6	6-3
30,72	74,10	105,66	5,51	125,04	12,85	53,76	60,76

13. Найдем величины потерь напора на отдельных участках (таблица 10). При этом величинам потерь напора придаются знаки «+» или «-», в зависимости от того, идет ли расход по данной линии по часовой стрелке или против нее:

$$h_{i-j} = S_{i-j} \cdot q_{i-j}^2$$

Таблица 10

Потери напора на отдельных участках

Участок сети	I кольцо				II кольцо				
	2-5	5-4	4-3	3-2	1-2	2-3	3-6	6-7	7-1
Знак	+	+	+	-	+	+	-	-	-
h_{i-j}	1,81	2,59	1,27	2,50	0,46	2,50	1,03	1,99	0,76

Из теории гидравлики известно, что истинное распределение воды по линиям кольцевой сети характеризуется равенством нулю суммы потерь напора в каждом замкнутом контуре сети или кольце, т.е. идеальным случаем распределения потерь напора по каждому кольцу сети является $\sum h = 0$.

В общем случае потери напора по кольцу I не равны II и, следовательно, $\sum h \neq 0$, а $\sum h = \Delta h$, которое называется невязкой кольца.

Определим невязки колец:

I кольцо:

$$\Delta h_1 = h_{2-5} + h_{5-4} + h_{4-3} + h_{3-2} = 1,81 + 2,59 + 1,27 - 2,5 = 3,17 \text{ м}$$

II кольцо:

$$\Delta h_{11} = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-6} + h_{6-7} + h_{7-1} = 0,46 + 2,5 - 1,03 - 1,99 - 0,76 = -0,82 \text{ м}$$

Допустимый предел невязок не должен превышать потери давления смежных линий у конечного потребителя в данном кольце:

$$h_{4-3} = 1,27 \text{ м и } h_{2-3} = 2,5 \text{ м}$$

Выбираем наименьшие значения:

$$\Delta h_1^{\lim} = h_{3-2} = 2,5 \text{ м и } \Delta h_{11}^{\lim} = h_{3-6} = -1,03 \text{ м}$$

Сравниваем значения невязок по кольцу с максимально допустимыми:

$$\Delta h_1 > \Delta h_1^{\lim} \text{ и } \Delta h_{11} > \Delta h_{11}^{\lim}$$

Невязки превышают допустимые пределы, знаки («+» для кольца I и «-» для кольца II) показывают, что перегруженными являются периферийные линии сети, а центральная недогружена, поэтому необходима переброска некоторого количества воды с периферийных линий на центральную.

14. Величины перебрасываемых (поправочных) расходов ΔQ определяются для каждого кольца:

$$\Delta Q_1 = \frac{|\Delta h_1|}{2 \cdot \sum (S_{i-j} \cdot q_{i-j})} = \frac{2,5}{2 \cdot (30,72 + 74,10 + 105,66 + 125,04)} = 0,0037 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$\Delta Q_{11} = \frac{|\Delta h_{11}|}{2 \cdot \sum (S_{i-j} \cdot q_{i-j})} = \frac{|-1,03|}{2 \cdot (93,41 + 13,23 + 38,69 + 109,13)} = 0,0019 \text{ м}^3 / \text{с}$$

15. В результате пропуска по сети перебрасываемых расходов в указанном направлении расходы на участках периферийных линий должны уменьшаться, а на участке центральной магистрали (2-3) возрасти:

I кольцо:

$$\Delta Q_{2-5} = -0,0037 \text{ м}^3/\text{с}; \Delta Q_{5-4} = -0,0037 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Delta Q_{4-3} = -0,0037 \text{ м}^3/\text{с}; \Delta Q_{3-2} = 0,0056 \text{ м}^3/\text{с}$$

II кольцо:

$$\Delta Q_{3-6} = -0,0019 \text{ м}^3/\text{с}; \Delta Q_{6-7} = -0,0019 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Delta Q_{7-1} = -0,0019 \text{ м}^3/\text{с}; \Delta Q_{1-2} = -0,0019 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Delta Q_{2-3} = 0,0056 \text{ м}^3/\text{с}$$

16. Определим исправленные значения расчетных расходов за счет перебрасываемых расходов:

Таблица 11

Исправленные значения расчетных расходов

q_{2-5}	q_{5-4}	q_{4-3}	q_{1-2}	q_{2-3}	q_{1-7}	q_{7-6}	q_{6-3}
0,055	0,031	0,0083	0,082	0,031	0,57	0,035	0,015

17. Далее проводим расчет потерь напора при новых значениях расходов, пока значения невязок не будут удовлетворять необходимым условиям. Все полученные значения сводим в таблицу 12.

Таблица 12

Потери напора на участках после увязки

Участок сети	Диаметр, мм	Средняя экономическая скорость, м/с	Потери напора в трубах, м ³ /с ²	Удельное сопротивление линий, Па/м	Сопротивление линий, Па	Потери напора, м	Исправленные путевые расходы, м ³ /с
5-4	273	0,67	0,0018	1,92	1250,33	1,22	0,031
4-3	140	0,54	0,0046	66,17	23157,77	1,60	0,008
1-2	377	0,74	0,0022	0,33	65,78	0,44	0,082
2-3	219	0,66	0,0055	5,74	3159	3,07	0,031
7-6	244,5	0,75	0,0040	3,26	1465,13	1,81	0,035
6-3	168	0,68	0,0055	24,16	4831,43	1,10	0,015
1-7	325	0,69	0,0024	0,73	219,06	0,71	0,057
2-5	273	0,95	0,0054	1,75	525,43	1,61	0,055

Таблица 13

Потери напора в кольцах после увязки

Кольцо	Потери в смежных линиях, м	Минимальное значение потерь, м	Невязка Δh , м	Переброска ΔQ , м ³ /с
I кольцо	1,6	1,6	1,35	0,0018
	3,08			
II кольцо	3,08	1,10	-0,10	0,0002
	1,10			

20. Сеть увязывается – находим необходимый напор для определения высоты напорной башни и/или напорного насоса. Минимально необходимый напор от входа в сеть и до наиболее удаленного потребителя:

$$h_1 = h_{1-2} + h_{2-5} + h_{5-4} + h_{4-3} = 0,44 + 1,61 + 1,22 + 1,6 = 4,87 \text{ м};$$

$$h_{11} = h_{1-2} + h_{2-3} = 0,44 + 3,08 = 3,52 \text{ м};$$

$$h_{111} = h_{1-7} + h_{7-6} + h_{6-3} = 0,71 + 1,81 + 1,1 = 3,62 \text{ м}$$

Если после расчета на каком-либо участке поменялся знак, это означает, что поменялось и направление движения воды (на чертеже это необходимо отобразить изменением направления стрелок).

Выбираем наибольший из минимально необходимых напоров от входа в сеть и до наиболее удалённого потребителя – это и будет минимально необходимый напор сети.

Однако для нормальной работы наиболее удаленного потребителя необходимо некое избыточное давление, следовательно, напор, который должен быть в начале сети:

$$h_{\text{под}} = h_{\text{max}} + h_{\text{изб}} = 4,87 + 7 = 11,87 \text{ м}$$

По полученным значениям подачи $Q = 0,184 \text{ м}^3/\text{с}$ ($662 \text{ м}^3/\text{ч}$) и необходимого напора $h_{\text{под}} = 11,87 \text{ м}$ выбираем напорный насос.

Под полученные расход и напор подходит насос Calpeda GMN6 140-300D, рабочие параметры которого представлены в таблице 14.

Таблица 14

Рабочие параметры насоса Calpeda GMN6 140-300D

Расход Q , м ³ /ч	200	600	1000	1400
Напор H , м	14,2	12,3	8,3	4,2

На следующем этапе выполнения расчета проводится расчет вентиляторной градирни.

Градирня – это контактный теплообменный аппарат для охлаждения большого количества воды направленным потоком атмосферного воздуха.

Основной принцип функционирования градирен состоит в испарении определенного количества воды при ее контакте с воздухом (испарительное

охлаждение). Чем больше поверхность контакта воды с воздухом, тем более благоприятны условия теплоотдачи. При испарении температура воды снижается.

Из всех существующих типов градирен, классифицируемых по способу подвода воздуха к воде (башенные, атмосферные, эжекционные, вентиляторные), вентиляторные градирни находят самое широкое применение благодаря своей компактности (по сравнению с башенными градирнями), более глубокому охлаждению воды, чем у других типов градирен, меньшей зависимости степени охлаждения от параметров наружного воздуха, возможности регулировки охлаждающей способности.

Вентиляторные градирни применяются на промышленных предприятиях с относительно небольшими расходами воды систем оборотного водоснабжения в случаях, когда площадь для размещения охлаждающих установок недостаточна или возникает необходимость более глубокого охлаждения воды.

Вентиляторные градирни также принято классифицировать по расположению вентиляторов и по способу образования поверхности контакта воды и воздуха.

По расположению вентиляторов различают градирни с нагнетанием (рис. 2а) и с созданием разряжения, т.е. вытяжные (рис. 2б). В градирнях с нагнетанием вентиляторы располагаются снизу, а в градирнях с разряжением – сверху. Вентиляторные градирни строят одно- и многосекционными, размещая в каждой секции свой вентилятор. Многосекционные градирни могут состоять из нескольких (до 10 и более) секций. Количество секций многосекционной градирни должно быть не менее двух, чтобы обеспечить охлаждение воды в летнее время при аварийной ситуации в одной из секций.

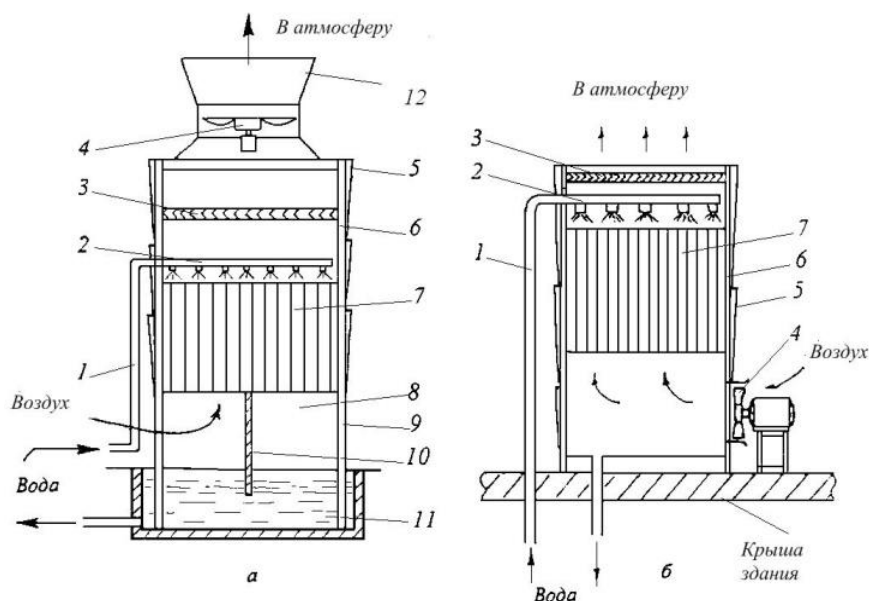


Рис. 2. Вентиляторные градирни:

а – градирня с вентилятором, создающим разрежение;

б – градирня с нагнетательным вентилятором

- 1 – подводящий трубопровод; 2 – водораспределительная система;
 3 – каплеуловитель, 4 – вентилятор; 5 – обшивка; 6 – корпус градирни;
 7 – ороситель; 8 – воздухораспределительное пространство;
 9 – воздухоподъемные окна; 10 – ветровая перегородка; 11 – бассейн;
 12 – диффузор

По способу образования поверхности контакта воздуха и воды вентиляторные градирни подразделяются на пленочные, капельные и комбинированные. В пленочных градирнях вода стекает в виде тонкой пленки по специальным пластинам. В капельных градирнях поток воды, подаваясь сверху, разбивается на капли с помощью специальных розеток или полок. Устройство для организации пленок и капель в градирнях называется оросителем. Соответственно, он может быть пленочным, капельным или комбинированным.

Вентиляторные градирни характеризуются следующими основными величинами: объемным или массовым расходом охлаждаемой воды $V_{ж}$, м³/ч или $G_{ж}$, кг/ч (гидравлическая нагрузка); тепловой нагрузкой Q , кВт; плотностью орошения (объемным или массовым расходом воды, приходящимся на 1 м² площади оросителя в плане) $g_{ж}$, м³/(м²·ч) или кг/(м²·с); степенью охлаждения воды или зоной охлаждения t , К.

В зависимости от типа оросителя рекомендуются такие плотности орошения: для пленочного $g_{ж} = 8-12$ м³/(м²·ч); для капельного $g_{ж} = 6-8$ м³/(м²·ч) [1].

Удельная тепловая нагрузка, приходящаяся на 1 м² площади оросителя в плане для вентиляторных градирен рекомендуется в пределах $q = 90-120$ Вт/м².

Техническая вода, поступающая для охлаждения на вентиляторную градирню, должна иметь температуру на входе не выше 55 °С и содержать не более 100 мг/л механических примесей [7].

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ

Рассмотрим принцип действия вентиляторной градирни с вытяжным вентилятором (рис. 2б). Нагретая в технологическом процессе вода по магистральным трубопроводам поступает к градирне. Далее она по подводящей трубе 1 поднимается к водораспределительной системе 2, состоящей из коллектора и распределительных труб, на которых закреплены форсунки. Через форсунки вода распыляется на ороситель 7 и стекает по его поверхности. Через входные окна 9 вентилятор 4 всасывает атмосферный воздух, который поднимается вверх по каналам в оросителе и охлаждает воду, стекающую по поверхности оросителя. Охлажденная вода стекает в бассейн 11, а теплый воздух через диффузор вентилятором выводится в атмосферу со скоростью 5-7 м/с. Поток поднимается до 25 м в высоту, таким образом, исключается рециркуляция (вторичное попадание) теплого влажного воздуха во входные окна градирни. Диффузор предназначен для улучшения аэродинамических характеристик воздушного потока на выходе из градирни и защиты лопастей вентилятора градирни от внешних физических воздействий. Поднимающийся воздух уносит с собой мелкие капли влаги. Для того чтобы снизить потери оборотной воды, в верхней части градирни устанавливается каплеуловитель.

В градирне с нагнетательным вентилятором скорость выхода воздуха из градирни 1-2 м/с, поэтому для снижения вероятности рециркуляции такие градирни устанавливаются на крышах зданий.

2.1. Вентиляторные установки

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

Для градирен обычно используются осевые вентиляторы. При применении вентиляторов, создающих разрежение, обеспечивается более равномерное распределение воздуха по поперечному сечению в основании градирни, чем при использовании нагнетательных вентиляторов, так как при входе воздуха с большой скоростью и повороте его под прямым углом для движения вверх создается неравномерное поле скоростей.

Вентиляторы, создающие разрежение, выбрасывают воздух вверх со скоростью 6-10 м/с, и вертикальное направление потока влажного воздуха после вентиляторов сохраняется на участке высотой 10-25 м, что практически исключает возможность рециркуляции воздуха. При использовании нагнетательных вентиляторов воздух выходит из градирни со скоростью около 1,0-2,5 м/с, и уже сравнительно слабый ветер может приводить к рециркуляции, т.е. задуванию уходящего теплого влажного воздуха вниз и вторичному всасыванию его вентилятором, что ведет к резкому ухудшению испарительного охлаждения воды.

Нагнетательные вентиляторы применяются для градирен с площадью орошения не более 16 м^2 . В холодную погоду лопасти нагнетательного вентилятора могут обмерзнуть, так как на них попадают вместе с холодным воздухом частицы воды, выносимые из градирни. В вентиляторах, создающих разрежение, возможность обмерзания во время работы 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 или на крыше здания. 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 возможность его вибрации во время работы вентилятора.

Лопастные вентиляторы могут изготавливаться из алюминиевых сплавов, пластмасс, нержавеющей стали или обыкновенной стали со специальным антикоррозионным покрытием.

Параметры наружного воздуха оказывают существенное влияние на степень охлаждения воды в градирне. Так как эти параметры в течение года значительно отличаются от расчетных, желательно количество подаваемого вентилятором воздуха регулировать соответственно этим изменениям. Такая регулировка подачи вентиляторов может осуществляться поворотом лопастей, а также изменением частоты вращения вала вентилятора.

Осевые вентиляторы марки ВГ (вентиляторы градирен) представлены на рис. 3.

Технические характеристики осевых вентиляторов марки ВГ (вентиляторы градирен) (рис. 3) и осевых вентиляторов общепромышленного назначения марки 06-300 (рис. 4) приведены в Приложении 4, а геометрические характеристики вентиляторов в Приложении 5.

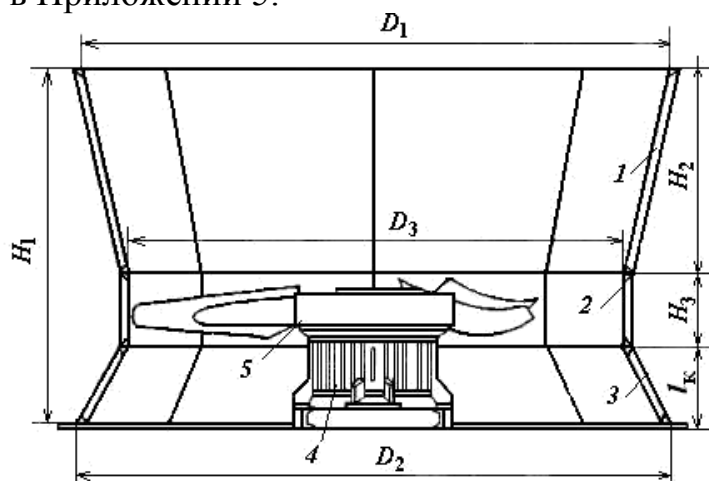


Рис. 3. Вентиляторная установка марки ВГ

1 – диффузор; 2 – корпус; 3 – коллектор; 4 – привод; 5 – рабочее колесо

Осевые вентиляторы общепромышленного назначения марки 06-300 представлены на рис. 4.

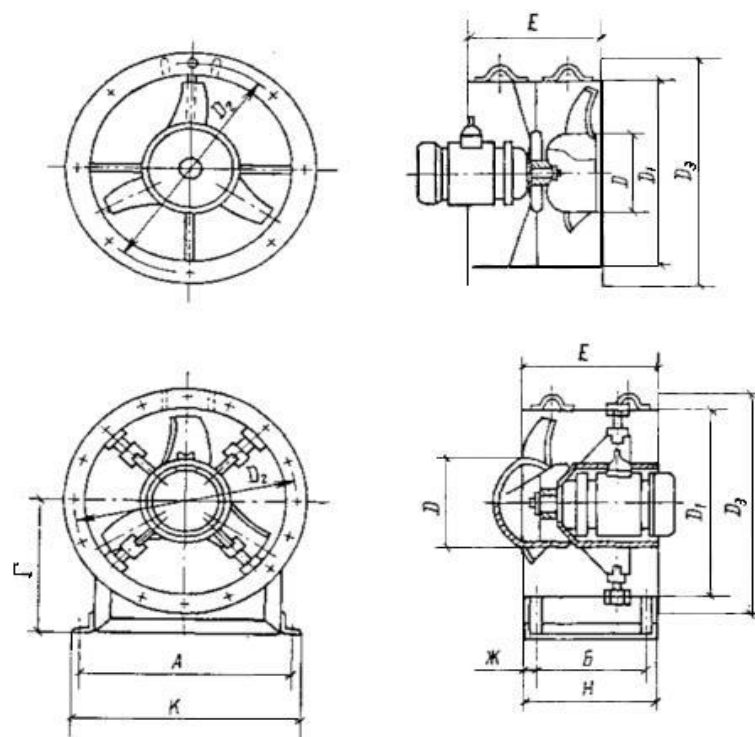


Рис. 4. Осевые вентиляторы марки 06-300
общепромышленного назначения № 4, 5, 6, 3, 8, 10 и 12,5

3. ПРИНЦИП ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ

При охлаждении воды в градирнях часть теплоты передается атмосферному воздуху за счет поверхностного испарения воды (превращения части воды в пар с переносом его молекул посредством диффузии и конвекции в воздух), другая часть – конвективным теплообменом, т.е. за счет разницы значений температур воды и воздуха.

Сущность испарительного охлаждения состоит в следующем. Согласно кинетической теории, молекулы воды находятся в беспорядочном тепловом движении, при этом скорости их колеблются в широких пределах. Те молекулы, которые обладают наибольшей скоростью (наибольшей кинетической энергией), вырываются в пространство над поверхностью воды (испарение). При этом могут оторваться от воды только молекулы, расположенные вблизи ее поверхности, у которых составляющая скорости, нормальная к этой поверхности, достаточно велика и способна преодолеть силы молекулярного притяжения. Молекулы воды, оторвавшиеся от поверхности, при столкновении с молекулами воздуха, могут быть отброшены обратно к поверхности воды и вновь поглощаться водой (конденсация). Часть же оторвавшихся от поверхности воды молекул водяного пара проникает между молекулами воздуха, увеличивая влагосодержание и относительную влажность воздуха. Эта потеря водой части молекул с высокой кинетической энергией и составляет сущность процесса испарения. Оставшиеся молекулы обладают более низким уровнем кинетической энергии, а, следовательно, и температуры (так как температура есть мера средней кинетической энергии молекул). В результате вода остывает, а у ее поверх-

ности образуется слой воздуха, полностью насыщенный водяными парами. Основная же масса воздушного потока,двигающаяся над поверхностью воды в градирнях, не насыщена водяными парами. Таким образом, «движущей силой» процесса испарения воды является разность парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воздушного потока.

Поток теплоты, возникающий в результате теплоотдачи соприкосновением, зависит от разности температур воды и воздуха и может быть направлен как от воды к воздуху, так от воздуха к воде в зависимости от того, какая из этих сред имеет более высокую температуру. При температуре воды больше температуры воздуха потоки теплоты за счет испарения Q_u и конвективного теплообмена Q_k направлены от воды к воздуху.

При снижении температуры воды до температуры воздуха по сухому термометру поток теплоты за счет конвективного теплообмена становится равным нулю ($Q_k = 0$), а при последующем снижении температуры воды Q_k становится отрицательными, т.е. поток теплоты направлен от воздуха к воде. При снижении температуры воды до температуры воздуха по влажному термометру поток теплоты за счет конвективного теплообмена от воздуха к воде становится равным потерям теплоты при испарении, и наступает равновесное динамическое состояние, при котором результирующая составляющая теплоотдачи равна нулю ($Q_k = Q_u$), и вода далее не снижает свою температуру. Таким образом, температура воздуха по влажному термометру является теоретическим пределом охлаждения воды в градирне.

В реальности температура охлаждающей воды на выходе из градирни несколько больше температуры воздуха по влажному термометру. Степень недоохлаждения воды в вентиляторных градирнях составляет примерно 4-6 °С и даже больше, если распределение воды, подаваемой на ороситель, осуществляется недостаточно равномерно, и есть зоны, где воздух проходит, не контактируя с пленкой воды.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГРАДИРЕН

4.1. Оросители

Ороситель является основным технологическим элементом градирни, определяющим ее охлаждающую способность и аэродинамическое сопротивление. Для получения достаточной охлаждающей способности необходимо создать соответствующую площадь поверхности контакта пленки воды с воздухом.

Однако эта поверхность не должна слишком загромождать площадь сечения градирни, иначе это вызовет избыточное аэродинамическое сопротивление этого участка, следовательно, дополнительную нагрузку на вентилятор.

Оросители проектируются капельными, пленочными или комбинированными.

Ороситель также может быть поперечноточным, если воздух проходит через него горизонтально – поперек стекающих вниз пленок или падающих ка-

пель воды, и противоточным, если воздух движется в нем вверх – навстречу стекающей воде.

Капельный ороситель состоит из большого числа реек треугольного или прямоугольного сечения, расположенных горизонтальными ярусами. При падении капель воды с верхних реек на нижние образуются мелкие брызги, создающие поверхность соприкосновения с воздухом.

Пленочный ороситель состоит из щитов, устанавливаемых вертикально или под небольшим углом к вертикали. По поверхности щитов стекает вода, образуя пленку толщиной 0,3-0,5 мм.

Также оросители проектируют комбинированными капельно-пленочными.

Пленочный ороситель предпочтительнее капельного, так как он оказывает меньшее сопротивление движению воздуха, однако для его изготовления требуется больший расход материалов.

Материал пленочных оросителей должен быть хорошо смачиваемым. Ранее в качестве материала для оросителей широко использовалось дерево, пропитанное специальным антисептиком. Однако постоянный контакт с текущей теплой хлорированной водой и влажным воздухом приводит к быстрому износу деревянных конструкций оросителей, поэтому срок их службы невелик и требуются частые ремонты.

Асбоцементные оросители (рис. 5) изготавливаются из стандартных плоских или волнистых листов. Асбоцемент, 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 улучшает охлаждающий эффект оросителя. Однако асбоцементные оросители имеют сравнительно большую массу на единицу площади.

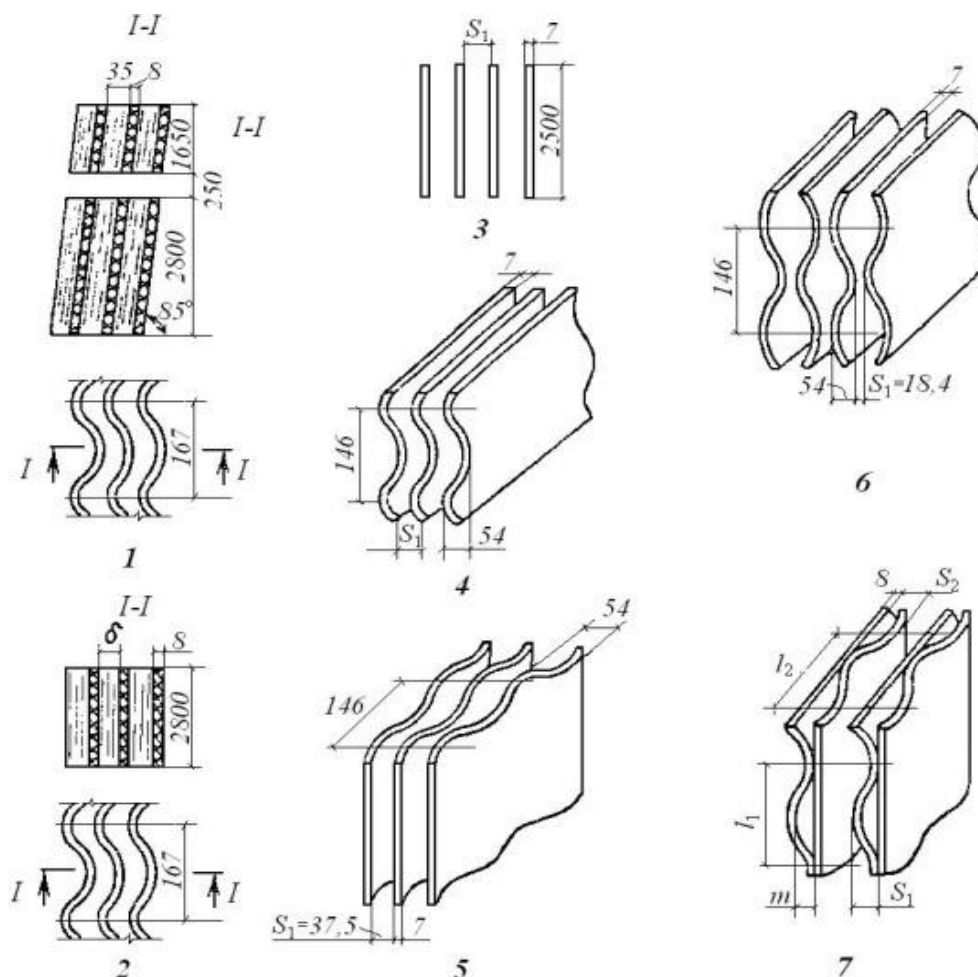


Рис. 5. Оросители из асбоцементных листов

В настоящее время наиболее распространены оросители из пластмасс (рис. 6). Пластмасса противостоит химическому воздействию многих растворов, кислот, щелочей и солей, что выгодно отличает ее от древесины. Для изготовления пластмассовых оросителей используют поливинилхлорид, полиэтилен низкого давления, ударопрочный полистирол и другие материалы, для которых в целом характерна гладкая гидрофобная поверхность, поэтому новые, они имеют плохую смачиваемость.

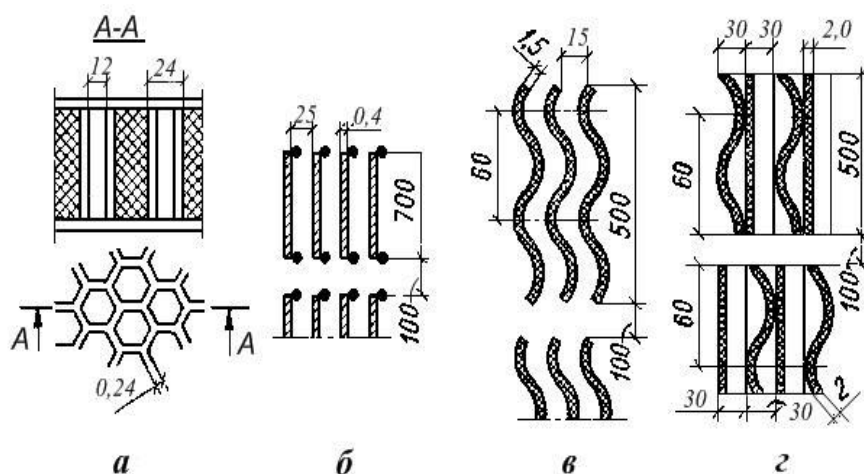


Рис. 6. Оросители из пластмассы

Для улучшения характеристик пластмассовых оросителей их поверхность выполняется шероховатой, пористой или волнистой. Подбирается оптимальное число и форма волн, листы перфорируются или заменяются сетками, а также устраиваются разрывы по ходу движения воды и воздуха, обеспечивающие чередование капельных и пленочных режимов движения воды и за счет этого – перераспределение и дополнительную турбулизацию взаимодействующих потоков и повышение интенсивности тепломассообмена.

Аналогичные характеристики других оросителей приведены в [2].

4.2. Водораспределительная система

Водораспределительная система предназначена для равномерного распределения охлаждаемой воды по поверхности орошения градирни, в результате которого создается необходимая поверхность водного потока, определяющая его охлаждающую способность. При этом система не должна создавать ощутимых препятствий прохождению и распределению потока воздуха.

Современные вентиляторные градирни строятся, как правило, с напорными трубчатыми системами распределения воды. В этом случае напор воды в системе создается насосом, а в градирне разбрызгивание воды производится форсунками. Большое распространение получили гидравлические центробежные форсунки с тангенциальным подводом воды в камеру закручивания (рис. 7).

Центробежная форсунка состоит из трех основных элементов: входного тангенциального канала 1, камеры закручивания 2 и выходного отверстия 3. Принцип действия ее заключается в том, что поток жидкости сначала закручивается, а затем выходит через сопло. В процессе сужения потока значительно возрастает окружная составляющая скорости, возникают центробежные силы, образующие в выходном отверстии тонкую пленку кольцевого сечения, которая по выходе из форсунки распадается на капли, образуя факел в виде полого конуса.

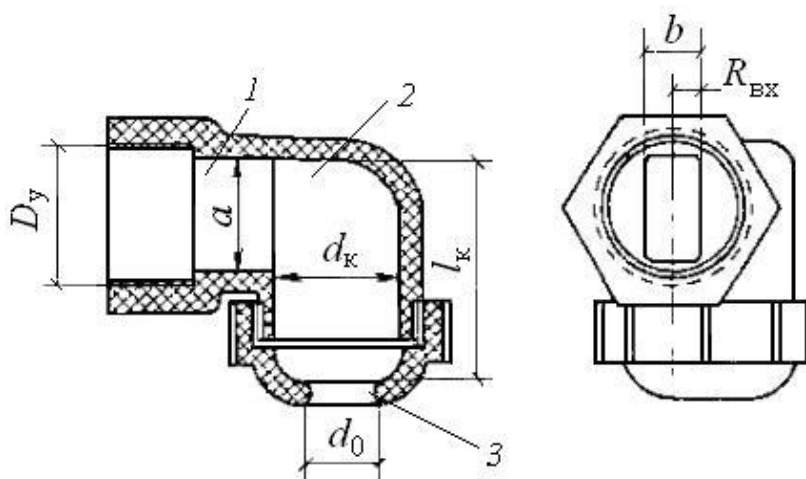


Рис. 7. Центробежная форсунка с тангенциальным подводом в камеру закручивания

Вдоль оси форсунки при этом образуется воздушный вихрь. Выходное отверстие таким образом заполнено кольцевым потоком или пленкой только по периферии. Центральная часть занята воздушным вихрем. На орошаемую поверхность капли выпадают в виде кольца.

Самым распространенным материалом для изготовления форсунок в настоящее время является пластмасса. Форсунки из пластмассы не подвергаются коррозии в условиях работы градирен, они дешевле, проще в изготовлении и имеют меньшую шероховатость внутренней поверхности. Они обладают также более устойчивыми гидравлическими характеристиками в процессе эксплуатации, так как при выделении из воды взвешенных частиц и минеральных солей отложения в этих форсунках не образуются.

Центробежные форсунки в вентиляторных градириях рекомендуется устанавливать выходными отверстиями вниз, так как при направлении вверх они будут создавать довольно высокие факелы, что может привести к увеличению уноса капель воды из градири. При направлении форсунок вниз, исходя из условия обеспечения более равномерного распределения воды, они устанавливаются над оросителями на расстоянии 0,2-1,0 м.

Для оценки эффективности распределения воды по оросителю необходимо знать следующие гидравлические характеристики форсунок: коэффициент расхода форсунки, угол раскрытия факела разбрызгивания (габариты факела), распределение воды в зоне факела единичной форсунки и по орошаемой площади при групповой работе форсунок. Эти характеристики определяются экспериментально на специальных стендах.

В случае необходимости можно форсировать работу градири, увеличив напор воды и расход через форсунки одной секции. Такая ситуация может возникнуть, например, при аварийной остановке одной из секций.

Важной характеристикой работы форсунок при групповой их работе является равномерность распределения воды по поверхности оросителя. Для более равномерного распределения воды целесообразно размещение форсунок в шахматном порядке с одинаковыми или близкими значениями шагов в продольном и поперечном направлениях.

4.3. Каплеуловители

Схемы каплеуловителей основных типов показаны на рис. 8, а их технологические характеристики приведены в таблице 15.

К каплеуловителям (водоуловителям, сепараторам) предъявляются требования максимально возможного снижения выноса капель из градири с потоком воздуха при минимальном аэродинамическом сопротивлении.

Все известные конструкции каплеуловителей работают по одному принципу – осаждение летящих вверх капель воды на препятствии за счет сил инерции при отклонении воздушного потока, огибающего это препятствие. В качестве препятствия используются доски, планки, соты (каналы) различной конфигурации, волокна сеток, располагаемые в 1-3 ряда. Также часто в качестве каплеуловителя используется часть оросителя меньшей высоты.

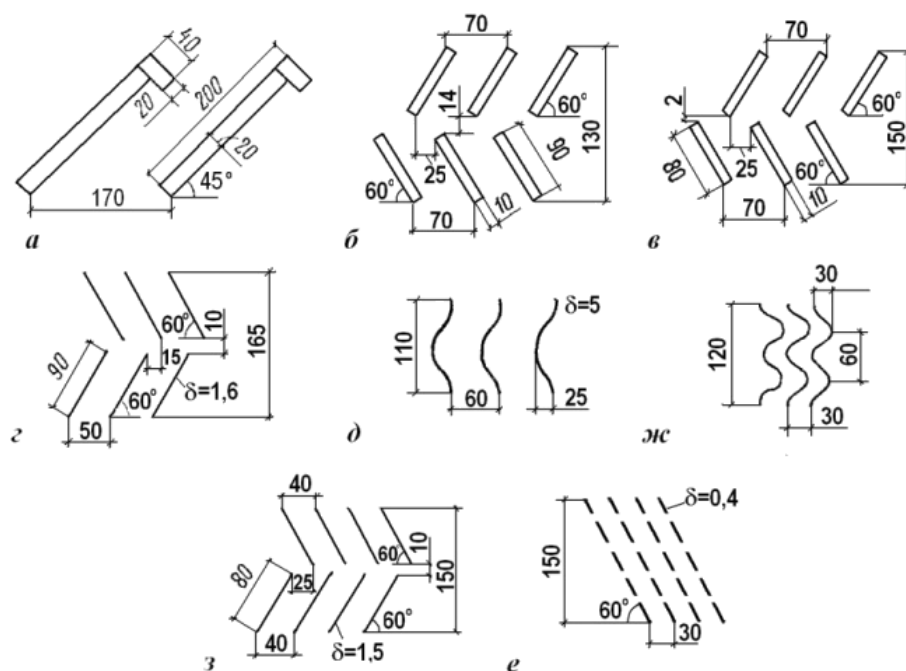


Рис. 8. Схемы каплеуловителей

Таблица 15

Параметры каплеуловителей

Номер позиции на рис. 8	Каплеуловитель	Вынос капель		Отношение выноса к общему расходу воды, %	Коэффици- ент сопро- тивления, ξ_8
		кг/(ч·м ²)	г/м ³ воздуха		
А	Деревянный однорядный с каплеотбойниками	3,6	0,4	0,058	16
Б	Деревянный двухрядный Союзводоканалпроекта по типовому проекту 901-6-29, ДВР-1 и ДВР-2	1,5	0,17	0,024	4,2
В	Деревянный двухрядный Союзводоканалпроекта по типовому проекту 901-6-27, ДВР-3	4	0,4	0,06	7,3
Г	Металлический двухрядный	2	0,25	0,02	2,7
Д	Из волнистого асбоцемента	5,4	0,75	0,07	4,5
Е	Из сетчатого винилпласта	3	0,45	0,04	6
Ж	Из волнистого полиэтилена	2,2	0,3	0,03	16,2
З	Пластмассовый двухрядный	0,25	0,026	0,004	2,4

Водоулавливающая способность каплеуловителей существенно зависит от их конструкции.

5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ

При тепловом расчете градирни используются следующие параметры, часть из которых может быть задана, а остальные определяются в процессе расчета:

- объемный расход воды $V_{жс}$, м³/ч;
- значения начальной $t_{жс1}$ и конечной $t_{жс2}$ температуры воды, °С;
- тепловая нагрузка на градирню Q , кВт;
- расчетные параметры наружного воздуха, которые соответствуют климатической зоне или задаются для особых условий эксплуатации;
- технические характеристики градирни;
- характеристики вентилятора, т.е. подача V' , тыс.м³/ч и напор H , мм.вод.ст. (или Па);
- геометрические и гидравлические характеристики форсунок, используемых для подачи воды на ороситель.

В зависимости от практической задачи возможны разные цели расчета градирни:

1. Расчет вновь проектируемой градирни для заданного расхода воды, тепловой нагрузки и атмосферных условий.
2. Расчет градирни для обслуживания отдельного объекта, если по условиям эксплуатации вода из центральной системы оборотного водоснабжения предприятия недостаточно охлажденная. При этом градирня может работать или на доохлаждение воды, взятой из центральной системы водоснабжения, или автономно.
3. При необходимости проведения реконструкции существующей градирни с целью увеличения ее тепловой и гидравлической нагрузок.

5.1. Выбор расчетных параметров

Расчетные параметры входящего в градирню воздуха задаются в соответствии со следующими требованиями.

Градирни рассчитываются обычно на неблагоприятные для их работы атмосферные условия в летние месяцы года. Чем выше расчетные значения температуры и влажности атмосферного воздуха, тем больше размеры градирни или больше число ее секций и, соответственно, выше затраты на ее сооружение. В то же время выбор слишком низких значений расчетных температуры и влажности воздуха может привести к тому, что фактические температуры воды на выходе из градирни будут в жаркое время года превышать расчетную температуру $t_{жс2}$. Это повлечет за собой недоохлаждение производственного продукта в теплообменной аппаратуре, или снижение мощности и КПД паротурбинной установки, а также повышенный расход электроэнергии в компрессорной стан-

ции и при работе холодильных установок и т.д. Следовательно, при выборе расчетных параметров наружного воздуха необходимо выбрать оптимальные параметры, которые допускают повышение температуры воды $t_{ж2}$ сверх расчетной для условий технологического процесса производства, но ограничивают период этого повышения.

При расчете градири рекомендуется исходить из среднесуточных значений температур и влажностей атмосферного воздуха в летние месяцы по многолетним наблюдениям. Среднесуточные температуры и влажности вычисляются по данным нескольких значений этих величин, измеренных в течение дня. Для обозначения допустимых отклонений параметров наружного воздуха от расчетных в течение летнего периода (который принимается равным 100 дням) вводится понятие обеспеченности метеорологических параметров (90, 95 и 99 %). В качестве расчетных обычно принимаются такие значения ϑ_1 и τ , которые превосходят среднесуточные при жестких требованиях – в течение не более 1 дня в году (обеспеченность 99 %), при обычных требованиях – в течение не более 5 дней в году (обеспеченность 95 %), а при менее жестких требованиях – в течение не более 10 дней в году (обеспеченность 90 %).

При выборе обеспеченности метеорологических параметров для расчетов градири следует учитывать влияние на работу технологического оборудования превышения температуры охлажденной воды над расчетной. Потребителей воды подразделяют на три категории по уровню требований к температурам охлажденной воды (таблица 16) [7].

Среднесуточные метеорологические условия для различных городов России представлены в Приложении 1.

Таблица 16

Обеспеченность метеорологических параметров при расчете градири
в зависимости от категории потребителей воды

Категория потребителя воды	Вызываемые нарушения в превышении температуры воды над расчетной	Обеспеченность при расчете градири, %
I	Нарушение технологического процесса в целом и как следствие значительные убытки	99
II	Временное нарушение технологического процесса отдельных установок	95
III	Временное снижение экономичности технологического процесса в целом и отдельных установок	90

При расчете градири используются следующие параметры ее работы.

Расход воды (гидравлическая нагрузка) обычно задается технологами производства, исходя из теплотехнологических расчетов охлаждаемого водой оборудования – конденсаторов, холодильников, компрессоров, различных технологических аппаратов, металлургических агрегатов и др.

Расход воздуха (расчетная подача воздуха вентилятором) определяется аэродинамическим расчетом градирни, а на предварительном этапе расход воздуха определяется его табличным значением, т.е. нормативной подачей выбранного вентилятора при его максимальном КПД.

Температуры входящей $t_{ж1}$ и выходящей $t_{ж2}$ воды устанавливаются технологиями производства на основании теплотехнических расчетов с учетом характеристик охлаждаемого оборудования. Следует иметь в виду, что температуры оборотной воды, особенно $t_{ж2}$, 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 $t_{ж2}$, а также расход охлаждающей воды путем технико-экономических расчетов совместной работы всех сооружений водооборотного цикла – технологического оборудования, градирен, циркуляционной насосной станции и установок для очистки и подготовки воды.

Как уже отмечалось, теоретическим пределом охлаждения воды воздухом является температура воздуха по влажному термометру. Она достигается путем увлажнения воздуха без дополнительного отвода или подвода теплоты до состояния насыщения ($\phi = 100 \%$), т.е. при изоэнтальпном испарении жидкости в воздух. Достижение водой температуры воздуха по влажному термометру возможно лишь при идеальных условиях охлаждения, создание которых в реальных условиях экономически не оправдано (большая высота оросителя, малая плотность орошения при большом расходе воздуха и т.д.). В этом случае при проектировании рекомендуется принимать расчетное значение температуры $t_{ж2}$, исходя из условия, чтобы разность температур ($t_{ж2} - \tau$) была не менее 4°C .

Технологические характеристики оросителя принимаются по данным испытаний фирм-производителей.

Площадь оросителя в плане (градирни, секции) определяется расчетом, но может быть и задана (в зависимости от назначения расчета).

5.2. Основные уравнения теплового расчета градирни

Баланс теплоты, отдаваемой в градирне водой и воспринимаемой воздухом, представляется в следующем виде:

$$Q = c_{рж} \cdot [G_{ж} \cdot (t_{ж1} - t_{ж2})] = G_{с.в} \cdot (I_2 - I_1),$$

где $c_{рж}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;

$G_{ж}$ – массовый расход воды, $\text{кг}/\text{с}$;

$G_{с.в}$ – массовый расход сухого воздуха, $\text{кг сух. воздуха}/\text{с}$;

$t_{ж1}$, $t_{ж2}$ – начальное и конечное значение температуры воды, $^\circ\text{C}$;

I_2 , I_1 – начальное и конечное значение энтальпии воздуха, проходящего через градирню, $\text{кДж}/\text{кг}$.

При тепловом расчете градирен обычно задаются величины расходов и начальные параметры воды и воздуха, а конечные параметры $t_{ж2}$, I_2 , d_2 остаются

неизвестными. Поэтому уравнение теплового баланса дополняется зависимостями, описывающими процесс тепломассообмена между водой и воздухом в оросителе градирни.

Уравнение передачи теплоты от воды к воздуху в оросителе имеет вид:

$$Q = \beta_{xv} \cdot V_{op} \cdot k \cdot \Delta I_{cp},$$

где β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи средний по объему оросителя, относящийся к разности влагосодержаний, кг/(м³·с·кг/кг сух.воздуха);

V_{op} – объем оросителя, м³;

k – поправочный коэффициент, учитывающий уменьшение расхода воды за счет ее испарения;

ΔI_{cp} – средняя разность значений удельных энтальпий влажного воздуха, т.е. разность значений энтальпии насыщенного воздуха в пограничном слое у поверхности плёнки воды, стекающей по оросителю, и энтальпии воздуха в ядре потока между пластинами оросителя, кДж/кг сух. воздуха.

На сегодняшний день не существует теоретических методов для определения объемного коэффициента массоотдачи β_{xv} из-за неизвестной площади поверхности контакта воды с воздухом в объеме оросителя. Поэтому значение β_{xv} находится экспериментально для каждого типа оросителя, является действительным только для заданного способа организации контактной поверхности, т.е. для заданной конструкции оросителя, работающего в тех условиях, при которых производились измерения параметров, и не может быть перенесено на другие типы оросителей. Величина β_{xv} находится в прямой зависимости от количества воздуха и воды, проходящих через градирню, и от типа и конструкции оросителя градирни. Эта зависимость в общем виде описывается эмпирической формулой:

$$\beta_{xv} = A \cdot \lambda^m \cdot g_{ж}$$

где $g_{ж}$ – плотность орошения, (кг/с·м²);

$\lambda^m = G_v/G_{ж}$ – отношение массового расхода воздуха к массовому расходу воды.

Коэффициенты A и m являются постоянными для определенной конструкции оросителя. Данные для асбоцементных оросителей, а так же более полные сведения о параметрах различных оросителей можно найти в [2].

Коэффициент k может быть найден как [1]:

$$k = 1 - \frac{c_{pж} \cdot t_{ж2}}{r}$$

где r – теплота парообразования при температуре $t = 0,5 \cdot (t_{ж2} + t_{ж1})$, кДж/кг.

Средняя разность удельных энтальпий влажного воздуха в оросителе градирни определяется следующим образом. Если отношение разностей энтальпий

$$\frac{\Delta I_6}{\Delta I_m} = \frac{I_1'' - I_2}{I_2'' - I_1} > 1,8,$$

то средняя разность находится по формуле:

$$\Delta I_{\text{ср}} = \frac{\Delta I_6 - \Delta I_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta I_6}{\Delta I_{\text{м}}}} = \frac{(I_1'' - I_2) - (I_2'' - I_1)}{\ln \frac{(I_1'' - I_2)}{(I_2'' - I_1)}}$$

Если же $\frac{\Delta I_6}{\Delta I_{\text{м}}} = \frac{I_1'' - I_2}{I_2'' - I_1} \leq 1,8$, то средняя разность может быть найдена как среднее арифметическое:

$$\Delta I_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (\Delta I_6 + \Delta I_{\text{м}}) = 0,5 \cdot [(I_1'' - I_2) - (I_2'' - I_1)],$$

где I_1, I_2 – удельные энтальпии воздуха в ядре потока между пластинами при входе в ороситель и на выходе из него, кДж/кг сухого воздуха;

I_1'', I_2'' – удельные энтальпии насыщенного воздуха у поверхности плёнки воды, стекающей по оросителю, т.е. при температуре воздуха, равной температуре воды, и относительной влажности $\phi = 100 \%$.

Соответственно I_1'' – вверху оросителя и I_2'' – внизу оросителя.

5.3. Пример расчета вентиляторной градирни

Необходимо спроектировать вентиляторную градирню для охлаждения оборотной воды, потребляемой компрессорной станцией завода. Исходные данные: расход воды $V_{\text{ж}} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$; тепловая нагрузка $Q = 3900 \text{ кВт}$; климатическая зона г. Москва.

Основные условные обозначения, при меняемые при расчете градирни:

- $C_{p\text{ж}}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);
- $F_{\text{ор}}$ – площадь орошения градирни, м^2 ;
- $G_{\text{в}}$ – подача воздуха вентилятором, кг/ч (кг/с);
- $G_{\text{с.в.}}$ – расход сухого воздуха, кг сух. воздуха /с;
- $G_{\text{и}}$ – количество испарившейся воды, кг/ч (кг/с);
- $h_{\text{ор}}$ – высота оросителя, м;
- I – удельная энтальпия (теплосодержание) воздуха, кДж/(кг сух. воздуха)
- I_1, I_2 – удельные энтальпии воздуха в ядре потока при входе в ороситель градирни и выходе из него, кДж/(кг сух. воздуха);
- I_1'', I_2'' – удельные энтальпии насыщенного воздуха у поверхности воды на входе в ороситель градирни и выходе из него, кДж/(кг сух. воздуха)
- $I_{\text{ср}}$ – средняя логарифмическая разность удельных энтальпий воздуха, кДж/кг сух. воздуха;
- P_6 – барометрическое давление, мм рт. ст.;
- $g_{\text{ж}}$ – плотность орошения градирни, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
- r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;
- $t_{\text{ж1}}, t_{\text{ж2}}$ – температуры воды на входе в ороситель градирни и выходе из него, °С;

- d_1, d_2 – влагосодержание влажного воздуха на входе в ороситель градирни и выходе из него, г/кг сух. воздуха;
- β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м³·с·кг/кг сух. воздуха);
- A – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние конструктивных особенностей оросителя на его охлаждающую способность, м⁻¹;
- m – показатель степени, характеризующий зависимость объемного коэффициента массоотдачи от изменения массовой скорости воздуха в оросителе;
- $\lambda = G_v/G_{ж}$ – отношение массового расхода воздуха к расходу воды, кг/кг;
- Θ, τ – температуры атмосферного воздуха по сухому и смоченному термометрам, °С;
- φ – относительная влажность воздуха, %;
- $V_{ор}$ – объем оросителя градирни, м³;
- $h_{ор}$ – высота оросителя градирни, м;
- $K_{ор}$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние плотности орошения на аэродинамическое сопротивление оросителя.

5.4. Тепловой расчет вентиляторной градирни

В данном случае задачей теплового расчета градирни является выбор типоразмера градирни и числа секций, и далее в ходе поверочного расчета необходимо определить объем оросителя $V_{ор}$ и его высоту $h_{ор}$, а так же показать, что выбранная градирня соответствует заданным техническим условиям на ее проектирование.

Чтобы исключить возможность рециркуляции теплого воздуха целесообразно остановиться на конструкции градирни с вентилятором, создающим разрежение. Так как гидравлическая нагрузка сравнительно велика, подбираем многосекционную градирню.

Выбираем размеры секции в плане 4×4 м, т.е. площадь оросителя секции в плане $F_{ор}' = 16 \text{ м}^2$ (Приложение 2).

Каждая секция оборудована вентилятором типа 1ВГ25.

Ороситель выбираем пленочный из волнистых асбоцементных листов с горизонтальным расположением гофр. Ороситель такого типа не требует специального производства, а может быть смонтирован из асбоцементных листов [1].

Расчет производится методом последовательных приближений.

Вначале, в первом приближении, определяем суммарную площадь оросителя в плане $F_{ор}$, исходя из рекомендуемых значений удельной тепловой нагрузки для вентиляторных градирен ($q = 90\text{-}120 \text{ кВт/м}^2$) и плотности орошения для пленочного оросителя $g_{ж} = 8\text{-}10 \text{ м}^3/(\text{м}^2/\text{ч})$ [7].

Принимаем $q = 90 \text{ кВт/м}^2$ и $g_{ж} = 8 \text{ м}^3/(\text{м}^2/\text{ч})$, тогда $F_{ор} = Q/q = 3900/90 = 43,33 \text{ м}^2$ или $F_{ор} = V_{ж}/g_{ж} = 400/8 = 50,0 \text{ м}^2$.

Для дальнейших расчетов принимаем большее значение площади оросителя $F_{ор}$.

Число секций многосекционной градирни находим как

$$N = F_{\text{ор}} / F_{\text{ор}}' = 50,0 / 16 = 3,125$$

Принимаем $N = 4$.

Таким образом, в первом приближении выбрана многосекционная градирня из 4-х секций, с площадью каждой секции в плане 16 м^2 (типовой проект 921-6-28) [1]. В результате теплового расчёта при последующих приближениях число секций или конструкция оросителя могут быть уточнены.

6. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ

В результате выполнения поверочного расчета необходимо определить обеспечивает ли выбранная градирня при расходе воды $V_{\text{ж}}$ тепловую нагрузку Q для климатических условий г. Москва.

Определяем расчетные параметры наружного воздуха.

Для условий работы компрессорной станции принимаем обеспеченность метеорологических параметров при расчёте градирни 90 %. Затем для условий г. Москва и обеспеченности метеорологических параметров 95 % выбираем расчетные параметры наружного воздуха: температура сухого термометра $26,5^\circ\text{C}$, температура влажного термометра $\tau_1 = 20,6^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха 57 % (Приложение 1).

Принимаем недоохлаждение воды на выходе из градирни до температуры воздуха по влажного термометру $\delta t = 4,4^\circ\text{C}$ (рекомендованное недоохлаждение воды до температуры мокрого термометра $4\text{--}6^\circ\text{C}$). Тогда:

$$t_{\text{ж}2} = \tau_1 + \delta t = 20,6 + 4,4 = 25^\circ\text{C}$$

Степень охлаждения воды $\Delta t_{\text{ж}}$ зависит от тепловой нагрузки и расхода воды на градирню:

$$\Delta t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}1} - t_{\text{ж}2} = Q / (G_{\text{ж}} \cdot c_{\text{рж}}) = 3900 / (110,89 \cdot 4,18) = 8,41^\circ\text{C}$$

где $c_{\text{рж}} = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – удельная теплоемкость воды при температуре $t_{\text{ж}2} = 25^\circ\text{C}$ [5];

$\rho_{\text{ж}} = 998 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воды при температуре $t_{\text{ж}2} = 25^\circ\text{C}$ (корректнее было бы рассчитывать эти параметры по средней температуре воды в градирне, однако температура воды на входе пока не известна, кроме того погрешность достаточно мала из-за небольшой величины степени охлаждения) [5];

$G_{\text{ж}}$ – массовый расход воды $G_{\text{ж}} = (V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}) / 3600 = (400 \cdot 998) / 3600 = 110,89 \text{ кг}/\text{с}$.

Температура воды на входе в градирню обычно определяется из условий работы технологического оборудования, в котором применяется водяное охлаждение. Поэтому, если температура воды не задана в исходных данных, в данном расчете, возможно, говорить лишь об определении максимально допустимой температуры воды на входе в градирню, при которой возможно ее достаточное охлаждение при заданной тепловой нагрузке на градирню и климатических условиях места эксплуатации.

Максимально допустимая температура воды на входе в градирню:

$$t_{\text{ж}1} = t_{\text{ж}2} + \Delta t_{\text{ж}} = 25 + 8,41 = 33,41^\circ\text{C}$$

Выбираем тип оросителя и определяем его геометрические характеристики: шаг установки листов $S_1 = 50,1$ мм, толщина листов $\delta = 7$ мм; высота листов 1,22 м, коэффициенты $A = 0,59 \text{ м}^{-1}$, $m = 0,68$ [1].

Ороситель может быть одноярусным высотой 1,22 м или двухярусным. Для данного типа градирен используем двухярусный ороситель высотой $h_{\text{ор}} = 2 \cdot 1,22 = 2,44$ м.

Выбираем ороситель с вертикальным расположением гофр.

Для используемого вентилятора типа 1ВГ25 для оптимальных условий его работы, т.е. при максимальном КПД вентилятора, определяем подачу воздуха $G_{\text{в}} = 40$ кг/с или $V_{\text{в}} = 33,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (плотность воздуха принята $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$) (Приложение 4).

Расход воды на одну секцию $G_{\text{ж}}' = G_{\text{ж}}/N = 124,8/4 = 31,1$ кг/с.

Тогда отношение массового расхода воздуха к расходу воды:

$$\lambda = G_{\text{в}}/G_{\text{ж}} = 40/31,1 = 1,3$$

Расчетное значение плотности орошения:

$$g_{\text{ж}} = G_{\text{ж}}/(F_{\text{ор}} \cdot N) = 110,89/(16 \cdot 4) = 1,73 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

Величина объемного коэффициента массоотдачи:

$$\beta_{\text{хв}} = A \cdot \lambda^m \cdot g_{\text{ж}} = 0,59 \cdot (1,3)^{0,68} \cdot 1,73 = 1,22 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$$

Определяем значение поправочного коэффициента k , учитывающего уменьшение расхода воды в результате испарения [1]:

$$k = 1 - (c_{\text{рж}} \cdot t_{\text{ж2}})/r = 1 - (4,18 \cdot 25/2440) = 0,95,$$

где r – теплота парообразования, $r = 2440$ кДж/кг при температуре $t_{\text{ж2}} = 25$ °С [6].

Значения энтальпии воздуха определяем по I – d диаграмме (рис. 8).

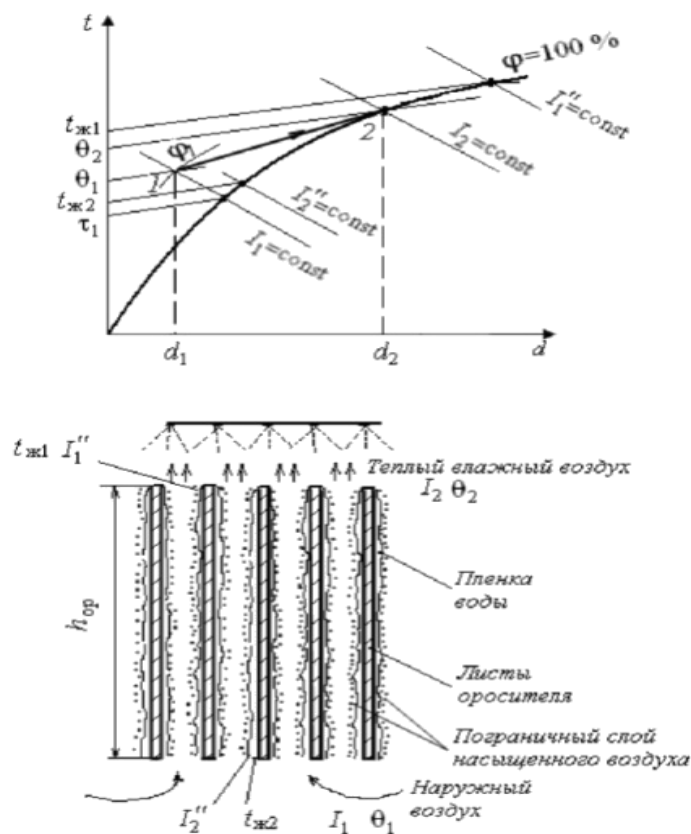


Рис. 8. Определение энтальпий влажного воздуха

Насыщенный воздух вблизи пленки воды в верхней части оросителя имеет температуру $\theta = t_{ж1} = 33,4^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi_1'' = 100\%$.

На пересечении θ и φ_1'' находим его энтальпию $I_1'' = 110$ кДж/кг.

Энтальпия насыщенного воздуха вблизи пленки воды, выходящей снизу из оросителя при $\theta = t_{ж2} = 25^\circ\text{C}$ и $\varphi_2'' = 100\%$ равна $I_2'' = 82$ кДж/кг.

Энтальпия наружного воздуха при принятых расчётных параметрах $I_1 = 62$ кДж/кг, влагосодержание $d_1 = 16$ г/кг.сух. воздуха.

Энтальпию влажного воздуха I_2 , выходящего из верхней части оросителя, можно определить из уравнения:

$$I_2 = I_1 + \frac{Q}{N \cdot G_{св} \cdot k} = 62 + \frac{3900}{4 \cdot 39,6 \cdot 0,95} = 88 \text{ кДж/кг},$$

где $G_{св}$ – расход сухой составляющей воздуха, проходящего через градирню.

$$G_{св} = \frac{G'_в}{1 + d_1} = \frac{40}{1 + 16 \cdot 10^{-3}} = 39,3 \text{ кг/с},$$

где влагосодержание d_1 подставляется в кг/кг сух. воздуха.

Отношение разностей энтальпий:

$$\frac{\Delta I_6}{\Delta I_M} = \frac{I_1'' - I_2}{I_2'' - I_1} = \frac{110 - 88}{82 - 62} = 1,1 \leq 1,8,$$

следовательно, для нахождения средней разности энтальпий используем формулу:

$$\Delta I_{ср} = 0,5 \cdot (I_1'' - I_2) + (I_2'' - I_1) = 0,5 \cdot ((110 - 88) + (82 - 62)) = 21 \text{ кДж/кг}$$

На выходе из оросителя градирни воздух насыщенный, т.е. $\varphi_2 = 100 \%$.

Поэтому по $I-d$ диаграмме можно определить $\theta_2 = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_2 = 23 \text{ г/кг}$ сух. воздуха.

Объем рабочего пространства оросителя всех секций определяется из выражения:

$$V_{\text{ор}} = Q/(\beta_{\text{хв}} k \cdot I_{\text{ср}}) = 3900/(1,22 \cdot 0,95 \cdot 21) = 160,2 \text{ м}^3$$

Расчетная высота оросителя, необходимая для обеспечения заданного теплосъёма и охлаждения воды:

$$h_{\text{ор}}^{\text{р}} = \frac{V_{\text{ор}}}{F'_{\text{ор}} \cdot N} = \frac{160,2}{16 \cdot 4} = 2,4 \text{ м}$$

Полученное значение $h_{\text{ор}}^{\text{р}}$ меньше высоты двухъярусного оросителя $h_{\text{ор}} = 2,44 \text{ м}$, следовательно, возможно дополнительное охлаждение воды ниже $t_{\text{ж2}} = 25^\circ\text{C}$.

Если бы высоты двухъярусного оросителя также было недостаточно, необходимо было бы изменить тип оросителя или увеличить число секций (при этом изменятся коэффициенты A и m).

7. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ

Расчет системы распределения воды в градирне включает в себя следующие пункты:

- выбор типоразмера форсунок и их эксплуатационных характеристик;
- определение числа форсунок и их размещение над оросителем с помощью распределительных труб;
- определение коэффициента неравномерности распределения воды по оросителю;
- определение размеров распределительных и коллекторных труб;
- гидравлический расчет системы распределения воды.

Опытные данные о неравномерности распределения воды группой форсунок при взаимодействии факелов разбрызгивания в диапазоне напоров 10-40 кПа могут быть представлены следующей эмпирической зависимостью:

$$k_{\text{нр}} = M \cdot k'_{\text{нр}} \cdot (f_{\text{я}} \cdot \frac{9,81}{H_{\text{ф}} \cdot R_{\text{ф}}})^{0,4}$$

где $f_{\text{я}}$ – площадь ячейки в сетке размещения форсунок в плане, м^2 ;

$H_{\text{ф}}$ – избыточное давление воды перед форсунками, кПа;

$R_{\text{ф}}$ – радиус факела, м (Приложение 3);

$k'_{\text{нр}}$ – коэффициент неравномерности распределения воды в зоне факела отдельно работающей форсунки (Приложение 3);

M – безразмерный коэффициент, зависящий от расстояния форсунок до оросителя и направления факелов разбрызгивания. При установке тангенциальных форсунок выходными отверстиями вниз при расстоянии от сопел до оросителя l

$= 0,5$ м $M = 1,3$; при $l = 0,75$ м $M = 0,9$; при $l = 1$ м $M = 0,5$. Коэффициент неравномерности $k_{нр} < 0,25$ считается допустимым.

Для уменьшения коэффициента неравномерности целесообразно увеличивать число форсунок, расстояние от их сопел до оросителя или использовать форсунки с большим углом раскрытия факела, а соответственно и R_{ϕ} .

При движении воды по распределительной трубе, на которой установлены форсунки, происходит постепенное уменьшение расхода и скорости течения, но для вентиляторных градирен распределительные трубы выполняются постоянного по длине диаметра. Рекомендуется задавать повышенное значение скорости движения воды в начале распределительной трубы $w_p = 1,5-2,5$ м/с.

При упрощенном расчете считается, что вода в коллекторной трубе движется по всей длине с одинаковой скоростью, т.е. не учитывается ее подача в распределительные трубы. Аналогичное допущение принимается и для распределительных труб, для которых скорость движения и расход воды также считаются постоянными, без учета подачи воды на форсунки.

Магистральные трубопроводы рассчитываются при скорости движения воды $w_m = 1,0-1,5$ м/с.

8. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В ГРАДИРНЕ

Необходимо произвести гидравлический расчет системы распределения воды для градири.

В качестве первого приближения выбираем тангенциальную форсунку с условными диаметрами входного и выходного отверстий $D_y = 20 \times 12$ мм (Приложение 3). Направление входного отверстия – вниз ($M = 0,5$), расстояние от сопла до оросителя 1 м. Расчетное избыточное давление воды перед форсунками $H_{\phi} = 3,0$ м.вод.ст., при котором объемный расход через одну форсунку $V_{\phi} = 1,46$ м³/ч $= 4,06 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

Объемный расход воды на одну секцию:

$$V'_{\text{ж}} = \frac{V_{\text{ж}}}{N} = \frac{400/3600}{4} = 0,031 \text{ м}^3/\text{с}$$

Число форсунок, устанавливаемых в одной секции:

$$n'_{\phi} = \frac{V'_{\text{ж}}}{V_{\phi}} = \frac{0,027}{4,06 \cdot 10^{-4}} = 66$$

Так как распределение воды по оросителю должно быть равномерным, принимаем число распределительных труб $n_{p.t} = 9$ и число форсунок на каждой трубе $n_{\phi.t} = 9$, т.е. общее число форсунок в секции $n_{\phi} = 9 \cdot 9 = 81$.

Уточняем объемный расход воды на одну форсунку

$$V_{\phi}^p = \frac{V'_{\text{ж}}}{n} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

При размещении оросительной системы в секции размером $a \times b = 4 \times 4$ м, расстояние между трубами $b_{\text{тр}} = \frac{4,0}{9} = 0,4$ м, расстояние между форсунками $b_{\text{ф}} = \frac{4,0 - 0,185}{9} = 0,42$ м (считаем, что расстояние от стены до распределительной трубы равно половине расстояния между трубами, а расстояние от краев распределительной трубы до форсунок в ней равно половине расстояния между форсунками). Тогда площадь ячейки в сетке размещения форсунок в плане:

$$f_{\text{я}} = b_{\text{тр}} \cdot b_{\text{ф}} = 0,44 \cdot 0,42 = 0,185 \text{ м}^2$$

Для выбранной форсунки и принятом расстоянии до оросителя $l = 1$ м уточняем интерполяцией напор воды при расходе воды через одну форсунку $V_{\text{ф}}^{\text{р}} = 3,33 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 1,379 \text{ м}^3/\text{ч}$ напор составит $H_{\text{ф}} = 2,55 \text{ м.вод.ст.} = 25 \text{ кПа}$ (Приложение 3).

Тогда коэффициент неравномерности распределения воды в зоне факела отдельно работающей форсунки $k_{\text{нр}} = 0,853$, а радиус факела $R_{\text{ф}} = 0,705$ м (Приложение 3).

Коэффициент неравномерности:

$$k_{\text{нр}} = M \cdot k'_{\text{нр}} \cdot [f_{\text{я}} \cdot 9,81 / (H_{\text{ф}} \cdot R_{\text{ф}})]^{0,4} = \\ = 0,5 \cdot 0,853 \cdot [0,185 \cdot 9,81 / (25 \cdot 0,705)]^{0,4} = 0,172$$

Значение $k_{\text{нр}} < 0,25$ считается допустимым, и поэтому принимается выбранное размещение форсунок над оросителем.

8.1. Расчет диаметров трубопроводов

Объемный расход воды на одну распределительную трубу $V_{\text{р}}$ определяется:

$$V_{\text{р}} = \frac{V'_{\text{р}}}{n_{\text{р.т}}} = \frac{0,031}{9} = 0,0035 \text{ м}^3/\text{с}$$

Диаметры труб находятся из уравнения неразрывности

$$V = f \cdot w,$$

где V – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

$f = (\pi \cdot d^2)/4$ – площадь проходного сечения трубы, м^2 ;

w – скорость движения воды, $\text{м}/\text{с}$.

Таким образом:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}}$$

Диаметр подводящей трубы, по которой вода поднимается к коллектору и оросительной системе при $w_{\text{п.т}} = 1,5 \text{ м}/\text{с}$:

$$d_{\text{п.т}} = \sqrt{4 \cdot V'_{\text{ж}} / (\pi \cdot w_{\text{п.т}})} = \sqrt{4 \cdot 0,031 / (3,14 \cdot 1,5)} = 0,163 \text{ м}$$

Выбираем трубу с внутренним диаметром 184 мм и толщиной стенки 5 мм (Приложение 7).

Определяем расчетную скорость течения воды:

$$w_{п.т} = 4 \cdot \frac{V'_ж}{\pi \cdot d_{п.т}^2} = 4 \cdot \frac{0,031}{3,14 \cdot 0,184^2} = 1,17 \text{ м/с}$$

Приняв $w_p = 2 \text{ м/с}$ определим диаметр распределительных труб:

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot V_p}{\pi \cdot w_p}} = \sqrt{4 \cdot 0,0035 / (3,14 \cdot 2)} = 0,047 \text{ м}$$

Выбираем трубу с внутренним диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм (табл. П.14).

Определяем расчетную скорость течения воды

$$w_p = 4 \cdot \frac{V_p}{(\pi \cdot d_p^2)} = 4 \cdot \frac{0,003}{3,14 \cdot 0,043^2} = 2,06 \text{ м/с}$$

При расчете диаметра коллекторной трубы принимаем скорость движения воды $w_k = 2 \text{ м/с}$. Так как из распределительной трубы вода поступает в коллектор и расходится на два потока (вправо и влево), соответственно, расход воды в коллекторе принимаем равным

$$V_k = \frac{V_p}{2} = \frac{0,0035}{2} = 0,00175 \text{ м}^3/\text{с}$$

Диаметр коллектора находим:

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot V_k}{\pi \cdot w_k}} = \sqrt{4 \cdot 0,00175 / (3,14 \cdot 2)} = 0,033 \text{ м}$$

Выбираем трубу с внутренним диаметром 33 мм и толщиной стенки 2,5 мм (Приложение 7). В связи с совпадением расчетного и принятого диаметра, действительная скорость воды в коллекторе будет равна принятой $w_k = 2 \text{ м/с}$.

9. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГРАДИРНИ

Целью расчета является определение полного аэродинамического сопротивления градирни и затем нахождение соответствующего этому сопротивлению действительного расхода воздуха через градирню по аэродинамической характеристике вентилятора.

Полное аэродинамическое сопротивление градирни представляет собой сумму местных сопротивлений по тракту движения воздуха

$$P_{полн} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{\zeta_i \cdot \rho_v \cdot w_i^2}{2}$$

где ζ_i – коэффициент местных сопротивлений в i -м сечении градирни;

w_i – скорость воздуха в данном сечении градирни, м/с.

Плотность воздуха в аэродинамическом расчете принимается равной указанной в характеристике вентилятора, обычно $\rho_v = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Осевой вентилятор, устанавливаемый в градирнях, является «объемной машиной», которая при любой плотности воздуха подает один и тот же объемный расход.

Расчетными элементами местных сопротивлений градирни являются: вход воздуха в градирню P_1 , воздухораспределитель P_2 , поворот потока в ороситель P_3 , внезапное сужение потока на входе в ороситель P_4 , ороситель P_5 , выход потока из оросителя P_6 , стеснение живого сечения градирни трубами водораспределительного устройства P_7 , водоуловитель P_8 , входной патрубок вентилятора P_9 (рис. 9).

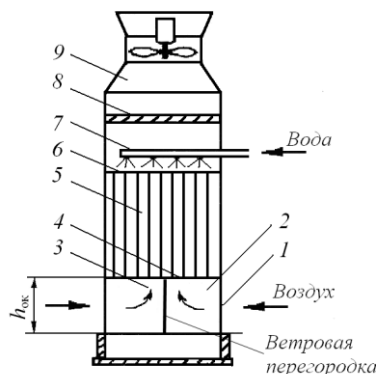


Рис. 9. Схема входа воздуха в градирню и номера участков местных сопротивлений по воздушному тракту градирни

Коэффициент местных сопротивлений для определения сопротивления входа P_1 рекомендуется принимать равным 0,55. Скорость воздуха во входных окнах может быть найдена из уравнения неразрывности $w_1 = V_v / f_{ок}$, при этом площадь входных окон $f_{ок}$ определяется в зависимости от конструкции градирни и числа рядом стоящих секций.

Коэффициент сопротивления одного метра воздухораспределителя ζ'_2 (коэффициент сопротивления дождя), по данным ВНИИГ им. Б. Веденеева, может быть определен по формуле:

$$\zeta'_2 = 0,1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot g_{ж}$$

где $g_{ж}$ – плотность орошения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Коэффициент сопротивления всего воздухораспределителя ζ_2 определяется:

$$\zeta_2 = \zeta'_2 \cdot l,$$

где l – длина воздухораспределителя (для противоточных градирен в эту формулу следует подставлять половину размера градирни в плане, т.к. воздухораспределитель разделен ветровой перегородкой).

Скорость воздуха в воздухораспределителе принимается равной половине скорости воздуха во входных окнах ($w_2 = w_1/2$).

Коэффициент сопротивления повороту потока в ороситель ζ_3 можно приближенно принимать равным 0,5. Скорость w_3 относится к площади оросителя в плане без учета загромождения проходного сечения пластинами оросителя $f_{ор}$, $w_3 = V_v / f_{ор}$.

Коэффициент сопротивления при внезапном сужении потока на входе в ороситель ξ_4 зависит от степени стеснения потока f_0/f_{op} :

$$\xi_4 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_{op}}\right) = 0,5(1 - k_3)$$

Коэффициент ξ_4 относится к скорости воздуха в живом сечении оросителя, т.е. $w_4 = V_B/f_0$.

Живое сечение оросителя можно найти с помощью коэффициента загромождения k_3 . Для асбоцементных оросителей:

$$k_3 = (S_1 - \delta)/S_1,$$

где S_1 и δ – расстояние между листами оросителя в самом узком месте и толщина листа соответственно [1].

Таким образом, площадь живого сечения оросителя может быть найдена как $f_0 = f_{op} \cdot k_3$, м², где f_{op} – площадь всего сечения оросителя.

Коэффициент сопротивления 1 м оросителя ξ_5' представляет собой сумму $\xi_5' = \xi_{c.op} + \xi_{ж}$, где $\xi_{c.op}$ – коэффициент сопротивления 1 м сухого оросителя (без подачи воды); $\xi_{ж} = k_{op} \cdot g_{ж} \cdot \xi_{c.op}$ – поправка, учитывающая дополнительные сопротивления, вызываемые пленками и каплями воды; k_{op} – коэффициент, учитывающий конструкцию оросителя, м·с/кг; $g_{ж}$ – плотность орошения, кг/(м²·с) [1].

Коэффициент сопротивления всего оросителя:

$$\xi_5 = \xi_5' \cdot h_{op} = (\xi_{c.op} + k_{op} \cdot g_{ж}) \cdot h_{op}$$

Расчетную скорость воздуха в оросителе относят к его полному сечению f_{op} , т.е. $w_5 = V_B/f_{op}$.

Коэффициент сопротивления выходу потока из оросителя ξ_6' (внезапное расширение потока) зависит от степени расширения f_0/f_{op} и определяется по формуле:

$$\xi_6 = \left(1 - \frac{f_0}{f_{op}}\right)^2$$

Расчетная скорость $w_6 = w_4$.

Для определения коэффициента сопротивления ξ_7 , характеризующего стеснение живого сечения градирни трубами водораспределительного устройства, можно воспользоваться формулой для неподвижной решетки:

$$\xi_7 = \left(0,5 + 1,3 \left(1 - \frac{f_{op.тр}}{f_{op}}\right)^2\right) \left(\frac{f_0}{f_{op.тр}}\right)^2$$

где $f_{op.тр}$ – площадь проходного живого сечения градирни в плоскости труб водораспределительного устройства, определяется по результатам расчета системы распределения воды в градирне.

Коэффициент сопротивления ξ_7' отнесен к скорости движения воздуха в свободном сечении градирни перед водоуловителем, т.е. $w_7 = w_5$.

Аэродинамическое сопротивление водоуловителей зависит от ряда факторов. Так, например, на сопротивление жалюзийных водоуловителей влияет степень заполнения живого сечения водоуловителей, наклон жалюзей, наличие скошенных кромок или каплеотбойников, положение верхнего ряда лопаток жалюзи относительно нижнего, длина жалюзи и общей высоты водоуловителя и материала жалюзи.

Рекомендации по назначению коэффициента сопротивления ξ_8 для водоуловителей различных типов сведены в таблицу 15. Коэффициент сопротивления ξ_8 отнесен к скорости движения воздуха в свободном сечении градирни перед водоуловителем, т.е. $w_8 = w_5$.

Переход от сечения градирни к входному патрубку вентилятора обычно осуществляется в виде сужающихся патрубков, аналогичных по форме коническому коллектору с торцевой стенкой. Величину коэффициента сопротивления ξ_9 входа в вентилятор, имеющего форму конического коллектора, можно определять в зависимости от центрального угла сужения α_k и относительной длины коллектора l_k/D_2 [1]. Величины α_k и l_k/D_2 находят из конструктивного чертежа вентиляторной установки.

Для вентиляторов марки ВГ центральный угол сужения можно определить:

$$\alpha_k = 2 \cdot \arctg \left(\frac{D_2 - D_3}{2 \cdot l_k} \right)$$

Коэффициент ξ_9 отнесен к скорости воздуха во входном отверстии вентилятора, площадь которого также находится по конструктивному чертежу: $w_9 = V_v / f_{вх.отв.}$.

Согласно аэродинамическим характеристикам, полное аэродинамическое сопротивление воздушного тракта градирни $P_{полн}$ может быть либо больше, либо меньше напора $P_{расч}$, развиваемого вентилятором при оптимальном режиме работы, который принят в качестве расчетного (Приложение 6).

Если $P_{полн} < P_{расч}$, то, согласно аэродинамической характеристике, фактический объемный расход воздуха $V_{факт}$ больше расчетного расхода V_v' , т.е. отвод тепловой нагрузки Q от воды будет обеспечен.

Если $V_{факт} < V_v'$, то по аэродинамической характеристике расход может быть меньше расчетного.

В этом случае необходимо изменить угол наклона лопастей вентилятора и, тем самым, перейти на другой график, согласно которому при $P_{полн}$ объемный расход будет больше или равен расчетному значению. Можно также принять другой ороситель, имеющий меньшее аэродинамическое сопротивление. При этом необходимо заново выполнить расчет градирни.

9.1. Аэродинамический расчет четырехсекционной вентиляторной градирни

Необходимо выполнить аэродинамический расчет четырехсекционной вентиляторной градирни.

Вход воздуха для четырехсекционной градирни показан на рис. 10.

Для крайних секций вход осуществляется через три окна, для средних – через два окна (размер оросителя $a \times b = 4 \times 4$ м, высота воздухоподводящих окон $h_{ок} = 2$ м, длина воздухораспределителя $a = 4$ м).

Большее значение сопротивления будет для средних секций, в которых величина площади окон составляет $f_{ок} = 2 \cdot h_{ок} \cdot a = 2 \cdot 2 \cdot 4 = 16 \text{ м}^2$.

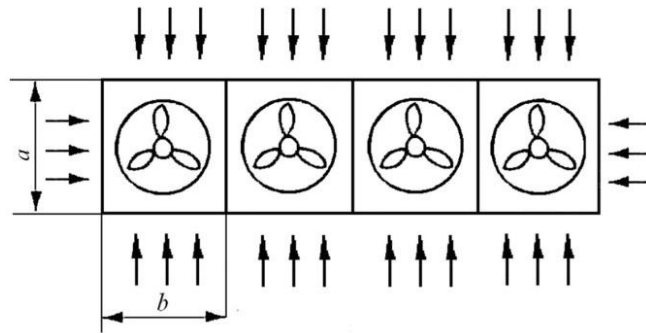


Рис. 10. Вход воздуха в четырехсекционную градирню

Предварительно выбран водоуловитель из волнистого асбоцемента и вентилятор 1ВГ25.

Номинальная подача вентилятора составляет $V'_B = 120 \text{ тыс.м}^3/\text{ч} = 33,33 \text{ м}^3/\text{с}$ (Приложение 4).

Участок 1:

$$w_1 = \frac{V'_B}{f_{ок}} = \frac{33,33}{16} = 2,1 \text{ м/с}$$

$$\xi_1 = 0,55$$

$$P_1 = \frac{\xi_1 \cdot p_B \cdot w_1^2}{2} = \frac{0,55 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 1,46 \text{ Па}$$

Участок 2:

$$\xi_2' = 0,1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot g_{ж},$$

где $g_{ж} = 1,94 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ – плотность орошения, полученная в тепловом расчете.

$$\xi_2' = 0,1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot 1,94 = 0,275$$

$$\xi_2 = \xi_2' \cdot l = 0,275 \cdot 2 = 0,55,$$

здесь в формулу подставляется половина длины воздухораспределителя, т.к. градирня противоточная, т.е. $l = 2$ м.

$$w_2 = \frac{w_1}{2} = \frac{2,1}{2} = 1,05 \text{ м/с}$$

$$P_2 = \frac{\xi_2 \cdot p_B \cdot w_2^2}{2} = \frac{0,55 \cdot 1,2 \cdot 1,05^2}{2} = 0,36 \text{ Па}$$

Участок 3:

$$\xi_3 = 0,5$$

$$f_{op} = a \times b = 4 \times 4 = 16 \text{ м}^2$$

$$w_3 = \frac{V'_B}{f_{op}} = \frac{33,33}{16} = 2,1 \text{ м/с}$$

$$P_3 = \frac{\xi_3 \cdot p_B \cdot w_3^2}{2} = \frac{0,55 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 1,3 \text{ Па}$$

Участок 4:

Для выбранного оросителя выписываем геометрические характеристики:
 $S_1 = 50,1 \text{ мм}$; $\delta = 7 \text{ мм}$ и коэффициенты $\xi_{c.op} = 7,4$; $\kappa_{op} = 1,08 \text{ м}^2 \cdot \text{с/кг}$ [1].

$$\kappa_3 = (S_1 - \delta)/S_1 = (50,1 - 7)/50,1 = 0,86$$

$$f_{op} = f_{op} \cdot \kappa_3 = 16 \cdot 0,86 = 13,76 \text{ м}^2$$

$$\xi_4 = 0,5(1 - f_0/f_{op}) = 0,5(1 - \kappa_3) = 0,5(1 - 0,86) = 0,07$$

$$w_4 = \frac{V'_B}{f_0} = \frac{33,33}{13,76} = 2,4 \text{ м/с}$$

$$P_4 = \frac{\xi_4 \cdot p_B \cdot w_4^2}{2} = \frac{0,07 \cdot 1,2 \cdot 2,4^2}{2} = 0,25 \text{ Па}$$

Участок 5:

$\xi_5 = \xi'_5 \cdot h_{op} = (\xi_{c.op} + \kappa_{op} \cdot g_{ж}) \cdot h_{op} = (7,4 + 1,08 \cdot 1,94) \cdot 2,44 = 23,2$
где $h_{op} = 2,44$ - величина, определенная в результате теплового расчета.

$$w_5 = w_3 = 2,1 \text{ м/с}$$

$$P_5 = \frac{\xi_5 \cdot p_B \cdot w_5^2}{2} = \frac{23,2 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 60,4 \text{ Па}$$

Участок 6:

$$\xi_6 = 0,51 \cdot (1 - \kappa_3)^2 = 0,5 \cdot (1 - 0,86)^2 = 0,01$$

$$w_6 = w_4 = 2,4 \text{ м/с}$$

$$P_6 = \frac{\xi_6 \cdot p_B \cdot w_6^2}{2} = \frac{0,01 \cdot 1,2 \cdot 2,4^2}{2} = 0,03 \text{ Па}$$

Участок 7:

Определяем площадь проходного живого сечения градири в плоскости труб водораспределительного устройства:

$$\begin{aligned} f_{тр} &= (a - d_{п.т}) \cdot n_{п.т} \cdot d_p + d_{п.т} \cdot b = \\ &= (4 - 0,185) \cdot 9 \cdot 0,057 + 0,185 \cdot 4 = 2,7 \text{ м}^2 \\ f_{op.тр} &= f_{op} - f_{тр} = 16 - 2,7 = 13,3 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\frac{f_{\text{ор.тр}}}{f_{\text{ор}}} = \frac{13,3}{16} = 0,83$$

$$\begin{aligned}\xi_7 &= \left(0,5 + 1,3 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{ор.тр}}}{f_{\text{ор}}} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{f_0}{f_{\text{ор.тр}}} \right)^2 = \\ &= (0,5 + 1,3 \cdot (1 - 0,83)^2) \cdot \left(\frac{1}{0,83} \right)^2 = 0,84\end{aligned}$$

$$w_7 = w_5 = 2,1 \text{ м/с}$$

$$P_7 = \frac{\xi_7 \cdot p_{\text{в}} \cdot w_7^2}{2} = \frac{0,84 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 2,22 \text{ Па}$$

Участок 8:

Для выбранного водоуловителя $\xi_8 = 4,5$.

$$\begin{aligned}w_8 &= w_5 = 2,1 \text{ м/с} \\ P_8 &= \frac{\xi_8 \cdot p_{\text{в}} \cdot w_8^2}{2} = \frac{4,5 \cdot 1,2 \cdot 2,1^2}{2} = 11,7 \text{ Па}\end{aligned}$$

Участок 9:

Для вентилятора марки 1ВГ25 (Приложение 5):

$$D_3 = 2520 \text{ мм}, D_2 = 3000 \text{ мм}, l_{\text{к}} = 390 \text{ мм}, l_{\text{к}}/D_2 = 0,1$$

$$\alpha_{\text{к}} = 2 \cdot \arctg \left(\frac{D_2 - D_3}{2 \cdot l_{\text{к}}} \right) = 2 \cdot \arctg \left(\frac{3000 - 2520}{2 \cdot 390} \right) \cdot \alpha_{\text{к}} = 63$$

$$\xi_9 = 0,17$$

$$w_9 = \frac{4 \cdot V'_{\text{в}}}{\pi \cdot D_3^2} = 4 \cdot \frac{33,3}{3,14 \cdot 2,52^2} = 6,7 \text{ м/с}$$

$$P_9 = \frac{\xi_9 \cdot p_{\text{в}} \cdot w_9^2}{2} = \frac{0,17 \cdot 1,2 \cdot 6,7^2}{2} = 4,56 \text{ Па}$$

$$\begin{aligned}P_{\text{полн}} &= \sum_{i=1}^9 P_i = 1,46 + 0,36 + 1,3 + 0,25 + 60,4 + \\ &+ 0,03 + 2,22 + 11,7 + 4,56 = 82,3 \text{ Па}\end{aligned}$$

По характеристике вентилятора 1ВГ25 с наклоном лопасти $\gamma = 15^\circ$ получаем при $P_{\text{полн}} = 82,3 \text{ Па}$: мощность вентилятора $N_{\text{в}} = 6,4 \text{ кВт}$; подача $V = 155 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$, т.е. больше номинального расхода, принимаемого в тепловом расчете (Приложение 6). Это значит, что наверняка будет обеспечен отвод от воды тепловой мощности Q при расчетных параметрах и геометрических характеристиках градирни.

10. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ВОДЫ

При охлаждении воды в градирнях всегда происходит потеря воды за счет испарения, уноса капельной влаги с уходящим воздухом, на продувку с целью ограничения солесодержания охлаждающей воды и из-за дренажа. Потери воды необходимо компенсировать соответствующим расходом добавочной воды.

Доля испарившейся воды $G_{и.ж}$ в процентах от общего расхода циркуляционной воды равна:

$$\frac{G_{и.ж}}{G_{ж}} \cdot 100 = \frac{c_{рж} \cdot \Delta t_{ж}}{r} \cdot 100 = \Delta t_{ж} \cdot a,$$

где $a = (c_{рж}/r) \cdot 100$.

Можно примерно оценить величину коэффициента a . Приняв среднюю температуру воды в градирне 30 °С, находим $r = 2430$ кДж/кг, а $C_p = 4,174$ кДж/(кг К). Тогда:

$$a = \frac{c_{рж}}{r} \cdot 100 = \frac{4,174}{2430} \cdot 100 = 0,17 \text{ К}^{-1}$$

В действительности, благодаря наличию теплоотдачи соприкосновением, особенно значительной при низких температурах наружного воздуха, величина этого коэффициента несколько меньше расчетной. Для учета этого эффекта при расчете потерь воды на испарение в зависимости от температуры наружного воздуха рекомендуются принимать следующие значения коэффициента a (таблица 17).

Таблица 17

Значения коэффициента a при расчете количества испарившейся воды

Температура наружного воздуха, °С	30	20	10	0
Коэффициент a , К ⁻¹	0,15	0,14	0,12	0,1

Таким образом, можно найти значение потерь воды в результате испарения как:

$$G_{и.ж} = a \cdot G_{ж}.$$

Потери воды в результате уноса капель с уходящим воздухом зависят от конструкции системы водораспределения, от конструкции и состояния водоуловителя и от равномерности поля скорости движения воздуха в градирне. Величина этих потерь определяется экспериментально. Для водоуловителей разных конструкций вынос капельной влаги не превышает 0,07 % от общего расхода воды. Однако, учитывая возможные неисправности в водоуловителе, а также при неравномерном распределении скорости воздуха, для вентиляторных градирен рекомендуется принимать потери за счет уноса в размере 0,2-0,5 % циркуляционного расхода воды [2]. При этом нижний предел относится к градирням большой производительности.

Таким образом, можно найти значение потерь воды из-за капельного уноса как:

$$G_{\text{ун}} = (0,2 \div 0,5) \cdot 10^{-2} \cdot G_{\text{ж}}$$

Потери воды за счет продувки. При эксплуатации вентиляторной градирни за счет испарения части воды возрастает солесодержание оставшейся охлаждающей воды. Кроме того, в оборотную воду могут попадать технологические выносы, продукты коррозии и т.д. С целью ограничения солесодержания выполняется продувка, т.е. часть оборотной воды отводится и заменяется добавочной (свежей) водой. В зависимости от состояния оборотной воды и от качества водоподготовки добавочной воды величина потерь на продувку может составлять 0,5-5 % от расхода циркуляционной воды в системе. Таким образом, можно найти значение потерь воды за счет продувки как:

$$G_{\text{пр}} = (0,5 \div 5) \cdot 10^{-2} \cdot G_{\text{ж}}$$

Особенностью эксплуатации системы оборотного водоснабжения компрессорной станции является то, что наряду с увеличением солесодержания за счет испарения воды происходит и обратный процесс – выпадение из воды накипи при прохождении ее по трубкам воздухоохладителей. В результате жесткость воды в системе не увеличивается и продувка не предусмотрена.

Бассейны градирен, как правило, выполняются с гидроизоляцией. Потери воды на фильтрацию при этом практически отсутствуют

Из теплового расчета массовый расход воды $G_{\text{ж}} = 110,89$ кг/с, степень охлаждения воды в градирне $\Delta t_{\text{ж}} = 8,41^\circ\text{C}$.

При расчетной температуре $\theta_1 = 26,5^\circ\text{C}$ принимаем $a = 0,15$.

Потери на испарение:

$$G_{\text{и.ж}} / G_{\text{ж}} \cdot 100 = \Delta t_{\text{ж}} \cdot a = 8,41 \cdot 0,15 = 1,26 \%$$

$$G_{\text{и.ж}} = G_{\text{ж}} \cdot 1,26/100 = 110,89 \cdot 1,26/100 = 1,39 \text{ кг/с}$$

Для выбранного каплеуловителя потери из-за уноса равны 0,07% от общего расхода воды, т.е.:

$$G_{\text{ун}} = \frac{0,07 \cdot G_{\text{ж}}}{100} = 0,07 \cdot \frac{110,89}{100} = 0,077 \text{ кг/с}$$

Так как градирня предназначена для охлаждения воды в компрессорной станции, продувка системы не предусматривается.

Суммарные потери воды в градирне составляют:

$$G_{\text{пот}} = G_{\text{и.ж}} + G_{\text{ун}} = 1,39 + 0,077 = 1,467 \text{ кг/с} = 5281,7 \text{ кг/ч}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гладков В.А. Вентиляторные градирни / В.А. Гладков, Ю.И. Арефьев, В.С. Пономаренко. – М.: Стройиздат, 1976. – 216 с.
2. Пономаренко В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
3. СНиП 2.04.02–84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
4. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02–84). – М.: ВНИИ Водгео, 1989.
5. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
6. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
7. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий. В 2-х частях / под ред. Б.А. Левченко. Ч.1 – Харьков, 1999. – 420 с.
8. Ильченко О.Т. Тепло- и массообменные аппараты ТЭС и АЭС / О.Т. Ильченко, Б.А. Левченко. – К.: Выща школа, 1992. – 207 с.
9. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х томах. – М.: Машиностроение, 2001.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
11. СНиП 2.01.01-82. Строительные нормы и правила. Строительная климатология и геофизика.
12. Берман С.С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок / С.С. Берман. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 427 с.
13. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Л.Д. Берман. – М.-Л., 1957. – 440 с.
14. Гончаров А.В. Брызгальные водоохладители ТЭС и АЭС / А.В. Гончаров. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 140 с.
15. Макаров В.М. Рациональное использование и очистка воды на машиностроительных предприятиях / В.М. Макаров, Ю.П. Беличенко, В.С. Галустов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
16. Кучеренко Д.И. Обратное водоснабжение (системы водяного охлаждения) / Д.И. Кучеренко, В.А. Гладков. – М.: Стройиздат, 1980. – 169 с.
17. Насосы. Каталог-справочник. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 80 с.
18. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 472 с.

Приложение 1

Среднесуточные метеорологические условия различной обеспеченности за летний период года (июнь, июль, август)

Населенный пункт	Обеспеченность 99%			Обеспеченность 95%			Обеспеченность 90%		
	θ	φ	τ	θ	φ	τ	θ	φ	τ
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
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
Екатеринбург	25,8	49	18,8	23,2	57	17,8	21,5	62	17
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
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
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
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	19Д	22,5	63	17,8	21,3	68	17,6
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

Окончание прил.1

Населенный пункт	Обеспеченность 99%			Обеспеченность 95%			Обеспеченность 90%		
	θ	φ	τ	θ	φ	τ	θ	φ	τ
Сыктывкар	25,1	49	18,3	23,1	54	17,3	21,9	58	16,9
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

Приложение 2

Вентиляторные секционные градирни

Размеры одной секции, м		Число секций в градирне	Тип вентилятора	Тип оросителя	Материал элементов градирни		
в плане	высота				каркаса	обшивки	оросителя
Градирни, располагаемые на зданиях с плоской кровлей							
1×2	5,8	2-6	06-320 №8 (нагнетательный)	Пленочный	Сталь	Асбоцемент	Пластмассовая перфорированная пленка
				Капельный	-	-	Дерево
2×4	6,9	2-5	06-320 №12 (нагнетательный)	Пленочный	-	-	Пластмассовая перфорированная пленка
				Капельный	-	-	Дерево
4×4	6,72	2-3	1ВГ25	Пленочный	-	Асбоцемент или волокнистый стеклопластик	Волокнистый полиэтилен; асбоцемент
				Капельный	-	То же	Дерево
Градирни, располагаемые на поверхности земли							
1×2	6,5	2-6	06–320 №8 (нагнетательный)	Пленочный	Сталь	То же	Дерево
				Капельный	-	То же	-
2×4	6,8	2-3	06-320 №12 (нагнетательный)	Пленочный	-	То же	Дерево; асбоцемент
				Капельный	-	То же	Дерево
4×4	11,01	2-6	1ВГ25	Пленочный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево; асбоцемент
				Капельный		-	Дерево
				Брызгальный		-	Отсутствует
8×8	13,34	2,5	1ВГ50	Пленочный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево; асбоцемент
				Капельный		-	Дерево
				Брызгальный		-	Отсутствует
12×12	16,65	2-3	1ВГ70	Пленочный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево; асбоцемент
				Брызгальный		-	Отсутствует
12×16	16,65	2-3	1ВГ50	Капельный	Железобетон или сталь	Асбоцемент	Дерево; асбоцемент
				Брызгальный		-	Отсутствует

Приложение 3

Гидравлические характеристики центробежных тангенциальных форсунок

Н _ф , м.вод.ст	V _ф , м ³ /ч	k' _{нр}			R _ф , м		h _ф , м
		Направление выходного отверстия и расстояния от сопла до оросителя, м					
		вниз l = 1	вниз l = 0,5	вверх l = 0,25	вниз l = 1	вверх l = 0,25	вверх l = 0,25
Тангенциальное сопло, D _y = 20×12 мм, μ = 0,53							
1,5	1,15	0,79	0,70	0,50	0,55	1,7	1,0
2,0	1,28	0,82	0,72	0,44	0,65	2,0	1,2
3,0	1,46	0,88	0,79	0,35	0,75	2,5	1,8
4,0	1,65	0,94	0,83	0,30	0,80	2,9	2,5
Тангенциальное сопло, D _y = 32×16 мм, μ = 0,51							
1,5	2,70	0,74	0,72	0,79	0,45	1,8	1,2
2,0	3,06	0,75	0,80	0,62	0,50	2,1	1,4
3,0	3,50	0,94	0,89	0,50	0,62	2,8	1,9
4,0	3,80	0,94	0,76	0,40	0,70	3,1	2,6
Тангенциальное сопло, D _y = 32×22 мм, μ = 0,50							
1,5	3,90	0,67	0,57	0,75	0,75	1,9	1,1
2,0	4,25	0,70	0,65	0,82	0,82	2,1	1,3
3,0	5,25	0,72	0,55	0,90	0,90	2,6	1,8
4,0	6,00	0,73	0,50	0,95	0,95	3,0	2,5

Приложение 4

Технические характеристики вентиляторов, применяемых в вентиляторных градирнях

Показатели	Тип вентилятора					
	06-320 №8	06-320 №12	06-320 №12	1ВГ25	1ВГ50	1ВГ70
Диаметр вентилятора, м	0,8	1,2	1,2	2,5	5,0	7,0
Число лопастей, шт	4	4	4	3	3	3
Подача воздуха, кг/с (тыс. м ³ /ч)	4,9 (147,6)	16 (48)	21,7 (65)	40 (120)	166,7 (500)	366,7 (1100)
Давление, Па (мм.вод.ст)	117,72 (12)	90,25 (9,2)	104,97 (10,7)	137,34 (14)	156,96 (16)	147,15 (15)
Тип электродвигателя	АОЛ2-22-6	АО2-52-8	АО-636Щ2	ВАСВ 10-19-16	ВАСВ 14-16-32	ВАСВ 15-23-36
Мощность электродвигателя, кВт	1,1	5,5	7-10	10	32	75
Частота вращения электродвигателя, об/мин	930	750	970	380	178	145
Общая масса вентиляторной установки, кг	222	522	522	1300	5300	10600

Приложение 5

Геометрические размеры вентиляторных установок марки ВГ

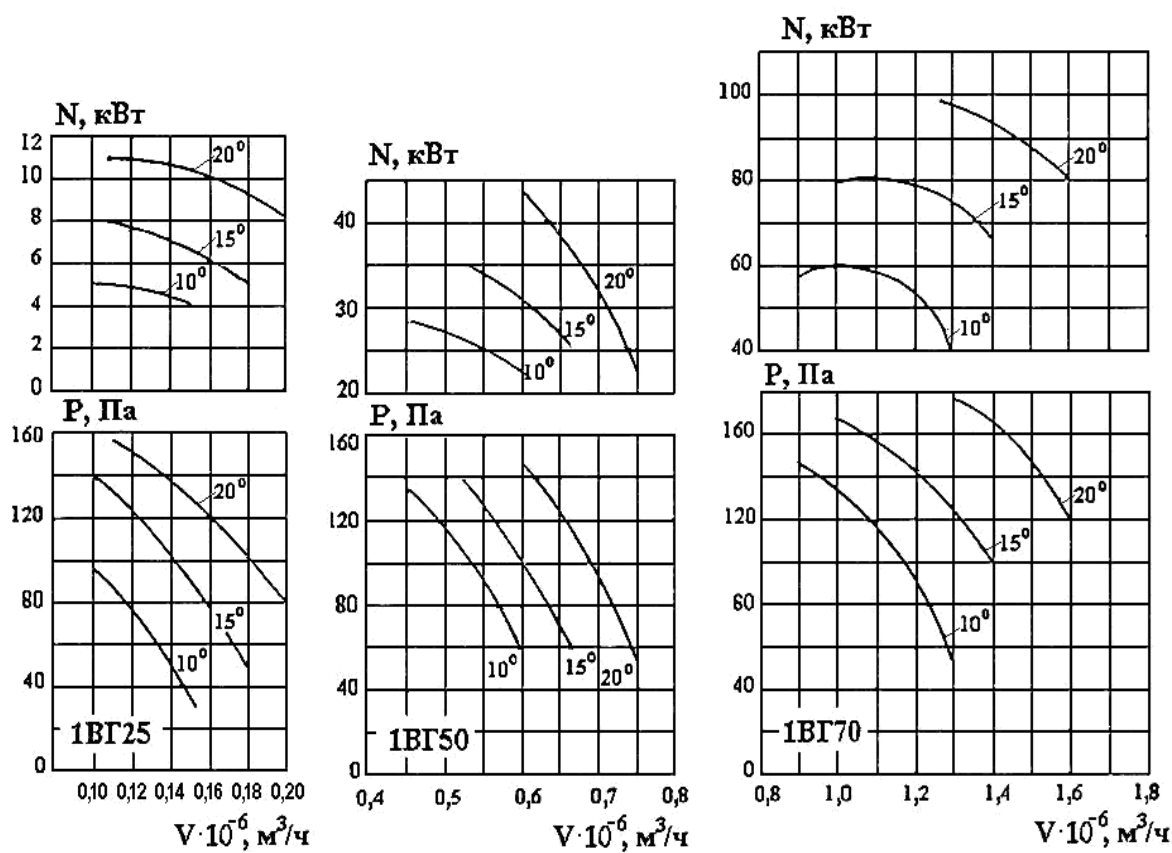
Марка вентилятора	Размеры, м						
	D_1	D_2	D_3	H_1	H_2	H_3	l_k
ВГ25	3000	3000	2520	1870	1000	480	390
ВГ50	6000	5910	5040	3720	2200	700	820
ВГ70	8400	8400	7050	5150	3000	1000	1150

Геометрические размеры осевых вентиляторов марки 06-300

Номер венти- лятора	Диаметр рабочего колеса вентилято- ра, мм	Размеры, мм									
		D_1	D_2	D_3	А	Б	Г	Е	Ж	К	Н
4	400	160	403	430	-	-	-	200	-	-	-
5	500	200	503	530	-	-	-	250	-	-	-
6,3	630	252	633	650	-	-	-	315	-	-	-
8	800	320	805	830	750	250	550	320	32,5	806	315
10	1000	400	1006	1035	900	330	670	400	32,0	960	394
12,5	1250	500	1258	1285	1100	400	850	500	47,0	1160	494

Приложение 6

Аэродинамические характеристики вентиляторов марок ВГ



Приложение 7

Трубы стальные

Условный проход d_0	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса 1 м трубы, кг	Площадь поперечного живого сечения стенки трубы, см^2
32	38	33	2,5	2,15	2,79
40	45	40	2,5	2,6	3,30
50	57	51	3,0	4,0	5,09
70	76	70	3,0	5,4	6,88
80	89	82	4,0	7,3	9,40
100	108	100	4,0	10,2	13,11
125	133	125	4,0	12,7	16,2
150	159	150	4,5	17,2	21,9
175	194	184	5	23,2	29,7
200	219	207	6	31,5	40,2
250	273	259	7	46,7	58,4
300	325	309	8	62,5	79,4
350	377	359	9	81,5	104
400	426	408	9	91,6	118
400	426	414	6	62,0	79
450	480	466	7	80,5	104
500	530	514	8	103	131
600	630	612	9	137	176
700	720	700	10	173	223
800	820	800	10	200	254
900	920	898	11	246	300
1000	1020	996	12	298	380
1100	1120	1096	12	326	418
1200	1220	1192	14	415	530
1400	1420	1392	14	482	618

Примечание. Материал и тип труб для $d_0 = 32-400$ мм – бесшовные горячекатаные и холоднокатаные, Ст. 2сп, Ст. 3сп, стали 10 и 20. ГОСТ 8731–87 и ГОСТ 8733–87. Для $d_0 = 400-1400$ мм – стальные электросварные с двухсторонним прямошовным или спиральным швом, Ст. 2сп, Ст. 3сп, стали 10 и 20. ГОСТ 10706–76, группа А; Гост 8696-74*. Группы А и В.

Приложение 8

Теплофизические характеристики воды

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$P_n, \text{Па}$	610,8	1227	2337	4241	7375	12335	19917	31170	47360
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,9	999,7	998,2	995,7	992,2	988,1	983,2	977,8	971,8
$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	4,212	4,191	4,183	4,174	4,174	4,174	4,179	4,187	4,195
$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	1,789	1,306	1,006	0,805	0,659	0,556	0,478	0,415	0,365
$r, \text{кДж/кг}$	2500	2477	2454	2430	2406	2383	2358	2333	2308

Теплофизические характеристики сухого воздуха ($p = 0,101 \text{ МПа}$)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\rho, \text{кг/м}^3$	1,293	1,247	1,205	1,165	1,128	1,093	1,060	1,029	1,000
$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,009	1,009

Приложение 9

Варианты схем сети для расчета системы оборотного водоснабжения

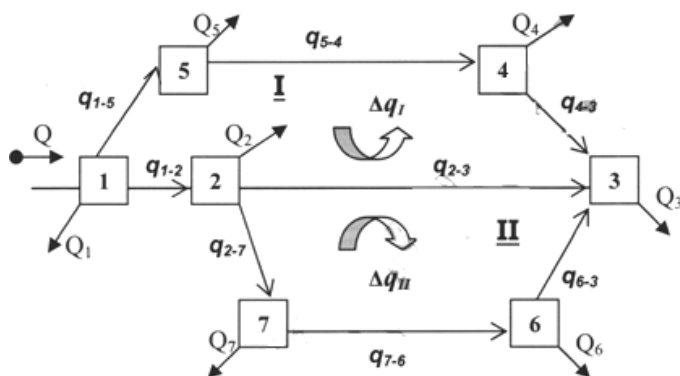


Схема А

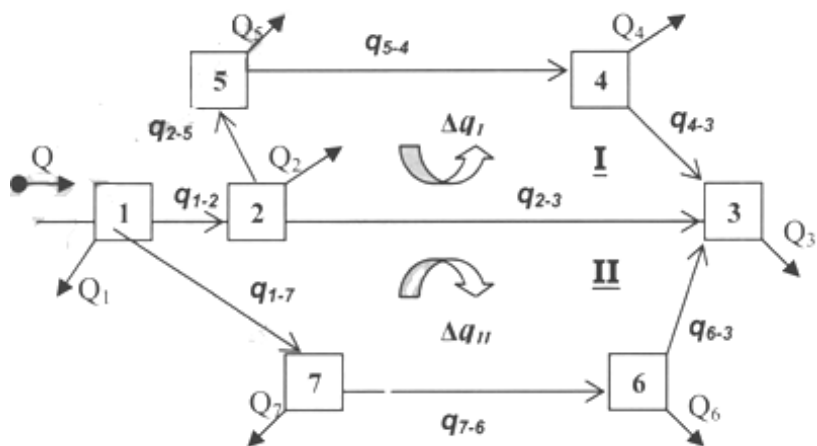


Схема Б

Приложение 10

Варианты задания для расчета системы оборотного водоснабжения

Схе- ма	Номер варианта																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	А	Б	Б	А	Б	Б	А	Б	Б	А	Б	Б	А	Б	Б	А	Б	Б	А	Б	Б	А	Б	Б	А
Q ₁	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Q ₂	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Q ₃	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Q ₄	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Q ₅	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Q ₆	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Q ₇	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
L ₁₋₅	300	-	500	350	-	450	400	-	400	450	-	350	500	-	300	200	-	300	400	-	500	400	-	450	400
L ₅₋₄	600	800	700	650	750	650	700	700	600	750	650	550	800	600	500	500	600	800	700	650	750	650	700	700	600
L ₄₋₃	200	300	350	250	400	400	300	450	450	350	350	300	400	300	350	300	400	300	450	450	350	350	300	400	300
L ₁₋₂	50	100	50	100	100	50	150	150	200	200	200	150	250	300	200	50	100	100	50	150	150	200	200	200	150
L ₂₋₃	600	700	600	650	650	550	700	600	500	750	550	450	800	500	400	650	650	550	700	600	500	750	550	450	800
L ₂₋₇	250	-	-	300	-	-	350	-	-	400			450	-	-	500	-	-	550	-	-	600	-		650
L ₇₋₆	450	600	500	500	550	450	550	500	400	600	450	350	650	400	300	500	550	450	550	450	400	600	450	350	650
L ₆₋₃	200	300	250	250	300	250	300	250	200	350	200	150	400	200	100										200
L ₁₋₇		350	300		350	300		300	250		300	200		300	200										
L ₂₋₅		250			350			400			300			250											
Э ₁₋₅	1,5		0,8	0,5		0,7	1		1	0,8		0,5	0,9		1										1,3
Э ₅₋₄	2	1,5	1	1	0,8	1	1,2	1,5	1	1	1	0,8	0,8	2	1,5										0,8
Э ₄₋₃	2,5	2	1,5	1	1	1	1,5	2	2	2	1,5	1	1	2	1,5	2	1,5	1	1	1	1,5	2	2	2	1,5
Э ₁₋₂	3	2,5	2	1,5	1	1,5	2	2,5	3	2,5	2	1,5	1	2,5	2										1
Э ₂₋₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1										1
Э ₂₋₇	0,8			0,5			0,2			0,6			0,3												0,8
Э ₇₋₆	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5										0,9
Э ₆₋₃	1	0,8	0,7	0,6	0,6	1	0,8	0,7	0,5	0,4	0,9	1	0,8	0,6	0,5										0,5
Э ₁₋₇		0,2	1		0,9	0,5		0,9	0,6		1	0,4		0,8	0,7										
Э ₂₋₅		1			0,5			1			0,5			1											
h _{изб}	3	4	5	6	7	8	3	4	5	6	7	8	6	7	8	6	7	8	3	4	5	6	7	8	6

Приложение 11

Варианты задания для расчета градирни

Номер варианта	Город	Категории потребителя воды	Расход воды, м ³ /ч	Тепловая нагрузка, кВт
1	Астрахань	1	360	3500
2	Волгоград	11	400	3800
3	Краснодар	111	380	3600
4	Москва	1	440	4000
5	Астрахань	11	480	4700
6	Волгоград	111	320	3200
7	Вологда	1	360	3700
8	Грозный	11	400	3900
9	Дудинка	111	380	4200
10	Екатеринбург	1	440	4400
11	Иркутск	11	480	4900
12	Казань	111	320	3400
13	Кишинев	11	400	3700
14	Краснодар	1	430	4050
15	Красноярск	11	380	4200
16	Кустанай	111	440	4400
17	Магадан	1	480	4900
18	Томск	11	320	3400
19	Тула	111	400	3700
20	Уфа	11	430	4050

Учебное текстовое электронное издание

**Агапитов Евгений Борисович
Соколова Маргарита Сергеевна**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРАДИРЕН
ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Учебное пособие

1,57 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2018 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра теплотехнических и энергетических систем
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru