Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Клочков Юрий Сергеевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 15.10.2026 14:55:21
Уникальный программный ключ:
3beb265d5d589e7ff4c954946f3ad99a1e70ac12

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт сервиса и отраслевого управления

Кафедра Промышленной теплоэнергетики

Тепловой и аэродинамический расчёт градирни для ТЭЦ

Методические указания к курсовому проекту
для обучающихся специальности
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
всех форм обучения

Составители:
А.А. Меньшикова, ассистент
П.А. Третьякова, старший преподаватель

Тюмень
ТИУ
2020

Тепловой и аэродинамический расчёт градирни для ТЭЦ: методические указания к курсовому проекту для обучающихся специальности 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника /сост. А.А.Меньшикова, П.А.Третьякова; Тюменский индустриальный университет. – Тюмень: Издательский центр БИК ТИУ, 2020. – 25 с. – Текст: непосредственный.

Ответственный редактор: д.т.н, профессор О.А. Степанов, заведующий кафедрой Промышленной теплоэнергетики

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры Промышленной теплоэнергетики «01» октября 2020 года, протокол № 3

Аннотация

Методические указания для выполнения курсового проекта по дисциплине «Тепломассообменное оборудование промышленных предприятий» по специальности 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника. Данная дисциплина изучается в одном семестре.

Методические указания состоят из пояснительной записки, теоретических сведений необходимых для выполнения курсового проекта, задания к курсовому проекту в соответствии с программой дисциплины и списком рекомендуемой литературы.

Методические указания окажут помощь при выполнении курсового проекта, а также могут пригодиться обучающимся при повторении изученного материала и подготовке к экзамену.

Содержание

Введение 6
Требования по оформлению курсового проекта «Тепловой и аэродинамический расчёт градирни для ТЭЦ» 6
Основные понятия и расчётные соотношения 7
Тепловой конструкторский расчёт градирни 12
Аэродинамический расчёт градирни 16
Пример поверочного расчёта башенной градирни 21
Литература 24

Условные обозначения

$C_ж$ – теплоёмкость жидкости (воды), Дж/(кг·^{0}С).

$\rho_В$ – плотность воздуха при средней температуре воздуха, кг/м^3

F – поверхность охлаждения, м^2.

$F_{ор}$ – площадь оросителя, м^2.

$g_ж$ – удельная гидравлическая нагрузка орошаемой поверхности (на 1 *пог. м*), кг/(м·с).

$G_ж$ – гидравлическая нагрузка охладителя, кг/с.

$G_и$ – количество испарившейся воды, кг/с.

$G_в$ – расход воздуха, кг/с.

$H_{ор}$, $H_б$ – высота оросителя, башни, м.

q – плотность орошения, м^3/(м^2·с).

Q – тепловая нагрузка охладителя, Вт.

r – теплота испарения воды (скрытая теплота фазового перехода), Дж/кг.

$V_{ор}$ – объём оросителя, м^3.

$V_в$ – объёмный расход воздуха, м^3/с.

$W_в$, $W_о$ – абсолютная и относительная скорости воздуха в оросителе градирни, м/с.

$W_ж$ – абсолютная скорость жидкостной плёнки, м/с.

$P_{ас}$ – полное аэродинамическое сопротивление, Па.

$\beta_р$ – коэффициент массоотдачи (испарения), отнесённый к разности парциальных давлений пара, кг/м^2·с·Па.

$\beta_х$ – коэффициент массоотдачи (испарения), отнесённый к разности влагосодержаний, кг/м^2·с·(кг/кг).

ξ - коэффициент сопротивления.

$\lambda = \frac{G_в}{G_ж}$ – относительный расход воздуха, кг/кг.

τ – температура влажного термометра или предел охлаждения, ^{0}С.

φ - относительная влажность воздуха.

$\Delta t = t_1 - t_2$ – ширина зоны охлаждения (перепад температур воды), ^{0}С.

$t_{1в}$ – температура воды на входе в конденсатор, ^{0}С.

$t_{2в}$ – температура воды на выходе из конденсатора, ^{0}С.

$m = \frac{G_ж}{D_к}$ – кратность охлаждения конденсатора.

$D_к$ – паровая нагрузка конденсатора, кг/с.

Параметры влажного воздуха в охладителе

1. Наружный воздух (входящий в охладитель).

θ_1 - температура сухого воздуха, ^{0}С.

φ_1 - относительная влажность воздуха.

B - барометрическое давление, Па.

$P_1 = \varphi_1 \cdot P_{нас1}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе при температуре θ_1, ^{0}С.

$P_{нас1}$ – давление насыщенного водяного пара при температуре θ_1, Па (табличное значение).

x_1 – влагосодержание влажного воздуха, кг/кг.

h_1 – энтальпия (теплосодержание) влажного воздуха, Дж/кг.

2. Уходящий воздух.

θ_2 - температура сухого воздуха, ^{0}C.

φ_2 - относительная влажность воздуха.

$P_2 = \varphi_2 \cdot P_{нас2}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе при температуре θ_2, ^{0}C.

$P_{нас2}$ – давление насыщенного водяного пара при температуре θ_2, Па (табличное значение).

x_2 – влагосодержание влажного воздуха, кг/кг.

h_2 – энтальпия (теплосодержание) влажного воздуха, Дж/кг.

3. Насыщенный воздух у поверхности жидкости при начальной температуре воды t_1.

$P_1^{//}$ - упругость пара при температуре воды t_1, Па (табличное значение).

$x_1^{//}$ - влагосодержание насыщенного воздуха, кг/кг.

$h_1^{//}$ - энтальпия (теплосодержание) насыщенного воздуха, Дж/кг.

4. Насыщенный воздух у поверхности жидкости при начальной температуре воды t_2.

$P_2^{//}$ - упругость пара при температуре воды t_2, Па (табличное значение).

$x_2^{//}$ - влагосодержание насыщенного воздуха, кг/кг.

$h_2^{//}$ - энтальпия (теплосодержание) насыщенного воздуха, Дж/кг.

$\partial P'' = 0{,}25 \cdot (P_1'' + P_2'' - 2 \cdot P_m'')$ - поправка при определении температуры воздуха на выходе из градирни, Па.

P''_m - упругость пара при средней температуре охлаждаемой и охлаждённой воды, Па.

$\partial h'' = 0{,}25 \cdot (h_1'' + h_2'' - 2 \cdot h_m'')$ – поправка при определении среднего энтальпийного напора, Дж/кг.

h_m'' – энтальпия насыщенной водяными парами воды при средней температуре охлаждаемой и охлаждённой воды, Дж/кг.

Введение

Курсовой проект «Тепловой и аэродинамический расчёт градирни для ТЭЦ» является составляющей частью курса «Тепломассообменное оборудование предприятий» для обучающихся направления подготовки 13.03.01 «Теплотехника и теплоэнергетика» профиля «Промышленная теплоэнергетика». Для выполнения курсового проекта обучающийся должен овладеть методами расчёта основных процессов тепломассообмена, научиться решать с привлечением ЭВМ практические задачи по расчёту, подбору и конструированию теплообменных аппаратов, а также приобрести навыки пользования государственными стандартами, нормативными материалами, технической и справочной литературой.

Целью методических указаний является изложение рекомендаций по её выполнению с использованием технической литературы. Выполнение курсового проекта позволит закрепить теоретический материал, полученный на лекциях и в результате самостоятельной проработки части курса, применить его к решению практической задачи – исследование работы водоохлаждающих устройств.

Требования по оформлению курсового проекта «Тепловой и аэродинамический расчёт градирни для ТЭЦ»

Курсовой проект (работа) в общем случае должен содержать:

- текстовую часть - пояснительную записку;
- графическую часть - чертежи формата А3, презентации, схемы, графический материал и пр.

Курсовой проект (работа) состоит из следующих структурных элементов:

- титульный лист;
- задание на курсовой проект(работу);
- содержание;
- введение;
- основная часть (согласно заданию на проектирование);
- заключение (выводы, рекомендации);
- список использованных источников (с указанием актуальной учебно-методической литературы и использованных нормативных документов);
- приложения.

Для набора текста необходимо использовать редактор Microsoft Word для Windows, название шрифта - Times New Roman. Размер шрифта основного текста – 14 кегль. Межстрочный интервал – полуторный. Отступы до и после текста не ставятся.

Страницы должны иметь поля верхнее, нижнее, правое – 10 мм, левое – 25 мм. выравнивание – по ширине страницы, абзацный отступ –

1,25. Все главы кроме титульного листа и приложений должны иметь рамки. Отступ рамки от края страницы лево – 20 мм, право, верх, низ – 5 мм. Каждая глава кроме введения, заключения и списка используемой литературы начинается с большого штампа на первой странице, последующие страницы имеют маленький штамп.

Заголовки разделов (глав) оформляются прописными буквами с полужирным начертанием. Составляющие глав оформляются полужирным начертанием, как в предложении.

Формула должна располагаться по центру. Используется сквозная нумерация формул по порядку следования для каждой главы. Номер формулы указывается в круглых скобках с правого края. При ссылке на формулу в тексте номер формулы указывается также в круглых скобках.

Расположение подрисуночных подписей внутри рисунка не допускается, подписи набираются непосредственно в тексте с использованием шрифта Times New Roman 12, выравнивание по центру. После подписи отступ одна строка. При ссылке на рисунок или таблицу в тексте указывается, например «рисунок 1.1» или «таблица 1.1». Если рисунок или таблица представлены в приложении курсового проекта, то обозначаются, например «рисунок В.1» или «таблица В.1» для приложения В.

Таблицы нумеруются по порядку следования в тексте для каждой главы. Слово «Таблица» пишется слева без абзацного отступа, шрифт Times New Roman 14. Через дефис пишется название таблицы. Выравнивание по ширине. Количество столбцов и строк в таблице определяется автором. Шрифт для содержимого таблицы устанавливается Times New Roman 12. Таблица, как и рисунок располагается по центру.

Список литературы, оформленный по требованиям нормативного документа ГОСТ Р 7.0.100–2018, включает все использованные в работе литературные источники в алфавитном порядке, интернет-ресурсы записываются ниже списком. Необходимо указать в квадратных скобках номер источника согласно списку литературы. Список литературы включает все использованные в работе литературные источники, располагают их в алфавитном порядке, интернет-ресурсы записываются ниже списком.

Основные понятия и расчётные соотношения

Оборотное водоснабжение – система водоснабжения, которая обеспечивает многократный оборот одной и той же воды в технологическом процессе. Применение оборотного водоснабжения вместо прямоточного позволяет существенно уменьшить расход природной воды и предотвратить загрязнение окружающей среды. В системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий применяются в основном испарительные охладители, в которых охлаждение воды главным образом происходит за счёт испарения. В

отдельных случаях применяются поверхностные охладители, где охлаждаемая вода отдает свое тепло окружающему воздуху через площадь поверхности теплопередачи. Из испарительных охладителей в промышленности широко применяются: пруды-охладители, брызгальные бассейны, градирни. Из поверхностных охладителей применяются радиаторные градирни. Выбор типа охладителя производится на основании технико-экономических расчетов в зависимости от технологических требований к температуре охлажденной воды, климатических условий, возможностей площадки строительства. В ряде случаев выбор типа охладителя можно осуществить на основе практических наблюдений и исследований.

Башенные градирни обеспечивают более устойчивый охладительный эффект. Они применяются для малых и для больших расходов циркуляционной воды (допускают установку на застроенной территории) и унос воды из них сравнительно невелик. Выбор типа оросителя зависит от ширины и высоты зоны охлаждения и от качества воды. Основным преимуществом пленочных градирен является их компактность по сравнению с капельными. Градирни с капельным оросителем легче поддаются чистке, что имеет преимущество при воде, содержащей загрязнения. Они также проще в сооружении, так как пленочный ороситель требует более высокой точности сборки. Схема башенной градирни с оборотным водоснабжением представлена на рис. 1.

Вентиляторные градирни позволяют получать наиболее низкие температуры воды при удельной тепловой нагрузке 90-120 кВт/м^2. Возможно регулирование температуры охлаждающей воды. Сооружение вентиляторных градирен дешевле, чем башенных, но они требуют расхода электроэнергии и постоянного надзора за вентилятором. Вентиляторные градирни нашли применение на химических, нефтехимических и других предприятиях.

Радиаторные градирни (сухие) используют в районах с ограниченными водными ресурсами. Они бывают как с искусственной, так и с естественной тягой воздуха. Радиаторная градирня представляет собой систему радиаторов, выполненных из стали или сплава меди и алюминия, и скомпонованных в несколько секций. Малая теплоемкость воздуха и низкий коэффициент теплоотдачи от воды к воздуху через стенки радиаторов вызывают необходимость создания оребрённой поверхности охлаждения и осуществления подачи большого количества воздуха через радиаторы. Температура охлажденной воды значительно выше, чем в испарительных градирнях и бывает на 15-20 ^{0}С выше температуры воздуха.

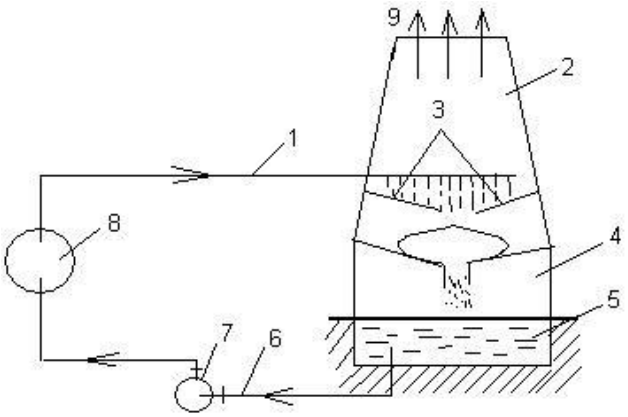


Рис. 1 - Схема оборотного водоснабжения с башенной градирней: 1 – подвод воды в градирню, 2 – вытяжная башня, 3 – распределительные желоба, 4 – оросительное устройство, 5 – сборный бассейн охлажденной воды, 6 – отвод воды из сборного бассейна, 7 – циркуляционный насос, 8 – конденсатор, 9 – выход нагретого влажного воздуха.

Зимой вода охлаждается до более низких температур и составляет 5-6 ^{0}C. Охлаждение воды может быть улучшено орошением водой наружной поверхности радиаторов. Стоимость радиаторных градирен выше стоимости испарительных градирен.

Тепловой расчет охладительной воды может производиться по формулам испарительного охлаждения, теплообмена, эмпирическим уравнениям и графикам охлаждения [1,2,3,4,5]. Различают конструкторский и поверочный тепловой расчёт охладителя. Основной задачей конструкторского теплового расчета охладителей является определение площади тепломассообмена или объёма, числа типовых охладителей, необходимых для обеспечения заданного охладительного эффекта. В поверочном тепловом расчете охладителей предусматривается при известных типах и геометрических размерах охладителей, определение гидравлической нагрузки при заданных температурах воды или же обеспечение охладительного эффекта при заданных тепловой и гидравлической нагрузке.

Для теплового конструкторского расчета охладителей необходимо иметь следующие исходные данные: гидравлическую нагрузку или общий расход охлаждаемой воды $M_ж$, кг/с; тепловую нагрузку Q, Вт; температуру охлаждённой воды t_2, ^{0}C, барометрическое давление B; расчётную скорость ветра W, м/с, если охладитель открытого типа; расчётный расход воздуха одного вентилятора G_B, кг/с (для вентиляторных градирен); параметры наружного воздуха – температура сухого воздуха по сухому термометру θ_1, ^{0}C, и относительную влажность φ_1 в долях единицы или % (для испарительных охладителей). Вместо φ_1 может быть задана температура воздуха по влажному термометру τ_1, ^{0}C. По двум заданным параметрам определяется третий параметр по диаграмме, расчетным

способом по формуле или психрометрическим таблицам. Величина расчётной подачи воздуха вентилятором устанавливается аэродинамическим расчетом вентиляторной градирни, который может предшествовать тепловому расчету.

Среднемесячные значения барометрического давления, температуры атмосферного воздуха и относительной влажности скорости ветра в заданном пункте наблюдения принимаются в соответствии с СП 131.13330.2018 (СВОД ПРАВИЛ. СТРОИТЕЛЬНАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ; дата введения 2019-05-29).

Гидравлическая и тепловая нагрузки и температура воды на выходе из градирни дают возможность определить перепад температур воды (ширину зоны охлаждения):

$$\Delta t = \frac{Q}{G_ж \cdot C_ж} = \frac{\Delta h_к}{m \cdot C_ж}, \quad (1)$$

где $\Delta h_к$ – разность теплосодержаний пара и конденсата, принимается $\Delta h_к = r$, Дж/кг.

Гидравлическая и тепловая нагрузки определяются на основе тепловых балансов охлаждаемых водой аппаратов-холодильников, конденсаторов (см. рис. 2). При этих расчётах важным является определение оптимальных значений температуры t_1, до которой должны охлаждаться технологические потоки в аппаратах, и температуры t_2, поступающей из охладителя воды. Значительное повышение t_1 в результате увеличения разности $t_1 - t_2$ или увеличения t_2 может повлечь за собой снижение качества продукции, уменьшение производительности установок и т.п.

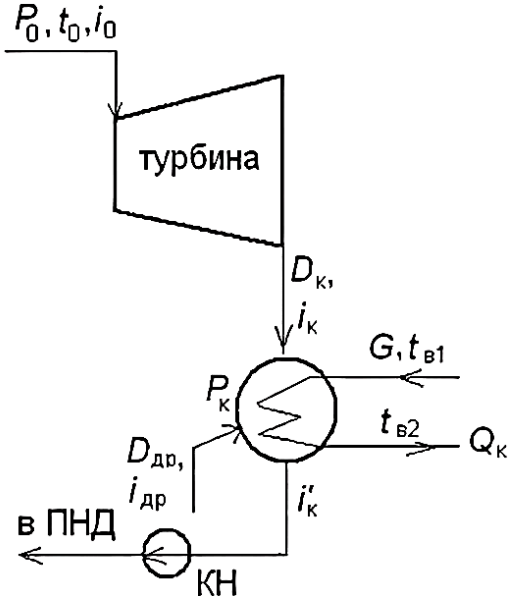


Рис. 2 – Схема конденсатора и турбины с технологическими параметрами

На ТЭЦ используются поверхностные конденсаторы (см. рис. 3). Через горловину 4 пар после турбинной установки попадает в аппарат, где после контакта с трубками 2 конденсируется и превращается в жидкость. Конденсат скапливается внизу и из патрубка 5 откачивается для подачи в водогрейные котлы. В трубках же используется вода, которая охлаждается на градирнях. На рисунке 3 вода подается через патрубок 1 и, пройдя по трубкам и сменив направление, возвращается в водооборотный цикл через патрубок 3. На конденсаторе устанавливается патрубок для удаления, попавшего в аппарат воздух. Специальным насосом он отсасывается вместе с небольшим количеством не успевшего сконденсироваться пара.

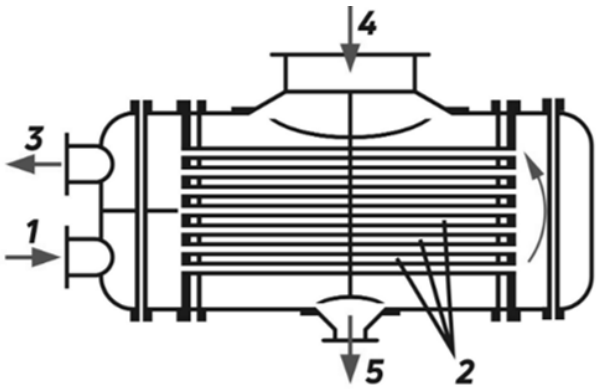


Рис. 3 – Общий вид поверхностного конденсатора

Градирни на ТЭЦ служат для охлаждения конденсаторов, которые выполняют главные функции: поддерживают необходимый уровень разрежения (вакуума) у выпускного патрубка турбины; превращают поступающий из турбины пар в жидкость, которая возвращается обратно в паровые котлы. Иначе снижается вакуум в конденсаторах, что ведет к снижению конденсации пара. Учитывая, что вода для паровых котлов должна быть подготовлена определенным образом, обессолена, не содержать других примесей, то её восполнение обходится довольно дорого. Кроме того, возрастают разовые затраты на ремонт турбин, требуется замена большего количества лопаток, происходит ускорение коррозии.

На градирне происходит следующий цикл. Забрав определённое количество теплоты от конденсатора, нагретая вода по водной магистрали направляется обратно в охладительную башню, но уже в водораспределительную систему. Здесь, через специальные водоразбрызгивающие сопла, обеспечивается равномерное разбрызгивание по всей поперечной площади и обильным ливнем орошается слой, состоящий из блоков оросителя. Ороситель обеспечивает основное охлаждение жидкости до оптимальной температуры путём замедления стекания, образования тонкой водяной плёнки и мелких капель, которые, в свою очередь, обдуваются потоком воздуха. Воздушный поток образуется

за счёт конусной формы охладительного сооружения, разности температур и давлений внутри и снаружи. Иными словами – эффект вытяжной трубы. При таком процессе вода остывает и частично, в виде тёплой паровоздушной смеси, уносится в атмосферу. Основная масса её падает в водосборный бассейн и уже охлаждённая, насосами по трубопроводам, вновь подаётся в конденсаторы.

При обычной нагрузке ТЭЦ, одна установка охлаждает свыше 10 000 кубических метров жидкости в час. Эффективное решение для уменьшения потерь при охлаждении – это водоуловитель. Благодаря специально разработанной конструкции, водоуловитель создаёт небольшое препятствие, в котором пар обращается в крупные капли, а те, в свою очередь, под воздействием силы тяжести, падают в водосборный бассейн. Таким образом, применение водоуловителя в открытых охлаждающих установках позволяет сократить капельный унос до 0,01-0,02 % от общего объёма.

Тепловой конструкторский расчёт градирни

1. По температуре наружного и уходящего воздуха и относительной влажности определяют влагосодержание и энтальпию воздуха:

$$x_{1,2} = 0{,}622 \cdot \frac{P_{1,2}}{B - P_{1,2}}; \quad (2)$$

$$h_{1,2} = \left[\theta_{1,2} + x_{1,2}\left(2493 + 1{,}97 \cdot \theta_{1,2}\right)\right] \cdot 10^3. \quad (3)$$

По температуре охлаждаемой и охлаждённой воды определяют влагосодержание и энтальпию насыщенного воздуха парами воды у поверхности жидкости:

$$x_{1,2}'' = 0{,}622 \cdot \frac{P_{1,2}''}{B - P_{1,2}''}; \quad (4)$$

$$h_{1,2}'' = \left[t_{1,2} + x_{1,2}''\left(2493 + 1{,}97 \cdot t_{1,2}\right)\right] \cdot 10^3. \quad (5)$$

2. Принять значения температуры воздуха на выходе из градирни в пределах 20-35 ^{0}С и рассчитать по формуле температуру воздуха на выходе из градирни при относительной влажности $\varphi_2 = 100$ %, подставив принятые значения:

$$\theta_2 = \theta_1 + 13{,}1 \cdot 10^4 \cdot (x_2 - x_1) \frac{t_1 + t_2 - \theta_1 - \theta_2^{\text{прин}}}{P_1'' + P_2'' - P_1 - P_2 - 2\,\partial P''}, \quad (6)$$

Уравнение (6) решается графическим методом. По оси абсцисс откладывается расчётное значение температуры воздуха на выходе из градирни, а по оси ординат – принятое. Точка пересечения полученной кривой с прямой линией, проходящей через начало координат под углом 45 ^{0}С к осям, определит искомое значение температуры воздуха на выходе из градирни. Произведённые действия показаны на рис. 4.

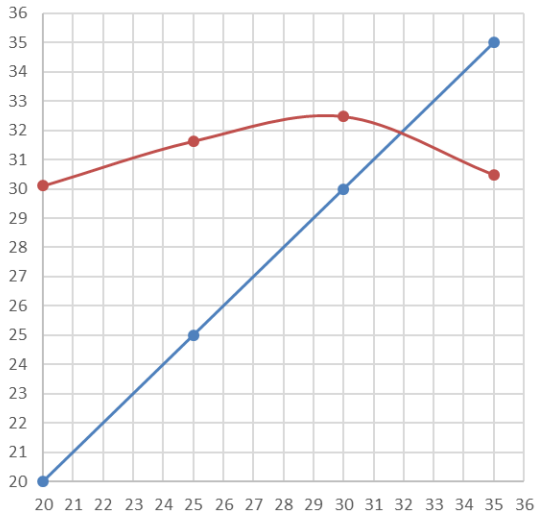


Рис. 4 – График определения температуры воздуха на выходе из градирни

3. Теоретический (соответствующий полному насыщению на выходе из градирни парами воды) относительный расход воздуха через градирню определяется по формуле (7):

$$\lambda = \frac{C_{ж} \cdot \Delta t}{k \cdot (h_2 - h_1)}, \quad (7)$$

где k - коэффициент, учитывающий долю теплоты, отведенной от воды за счёт частичного испарения, рассчитывается по формуле (8):

$$k = 1 - \frac{x_2 - x_1}{h_2 - h_1} \cdot C_{ж} \cdot t_2 \quad (8)$$

Уточним энтальпию воздуха на выходе из градирни в соответствии с выражением (9):

$$h_2 = h_1 + \frac{C_{ж} \cdot \Delta t}{k \cdot \lambda} \quad (9)$$

4. Поверхность тепломассообмена градирни с плёночным оросителем определяется по выражению (10):

$$F = \frac{G_{ж} \cdot C_{ж} \cdot \Delta t}{k \cdot \Delta h_{ср} \cdot \beta_x}, \quad (10)$$

где $\Delta h_{ср}$ – средний энтальпийный напор, в случае противоточного движения воздуха и охлаждаемой воды определяется по формуле (11):

$$\Delta h_{ср} = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{\ln \frac{\Delta h_1 - \partial h''}{\Delta h_2 - \partial h''}}, \quad (11)$$

где $\Delta h_1 = h_1'' - h_2$ - разность энтальпий воздуха на стороне входа воды, Дж/кг;

$\Delta h_2 = h_2'' - h_1$ - разность энтальпий воздуха на стороне выхода воды, Дж/кг.

5. Коэффициент массоотдачи, отнесённый к разности влагосодержаний, определяется по формуле (12):

$$\beta_x = 1{,}61 \cdot B \cdot \beta_p. \quad (12)$$

Коэффициент массоотдачи, отнесённый к разности парциальных давлений, $\beta_р$, определяется из критериального уравнения (13):

$$Nu = A(Re)^n = \frac{\beta_Р \cdot d_э}{D_р}, \quad (13)$$

где $d_э$ - эквивалентный диаметр, принимаем равным двум расстояниям между соседними щитами – b. Рекомендуется принять b=0,02-0,05 м;

A, n – коэффициенты в критериальном уравнении, которые выбираются в зависимости от критерия режима движения. Значения приведены в таблице 1.

Таблица 1

$Re<10^4$	A=0,0008	n=1,18
$Re>10^4$	A=0,028	n=0,8

$D_р$ – коэффициент диффузии, отнесенный к градиенту парциального давления, кг/м·с·Па, определяемый по формуле (14):

$$D_Р = \frac{1{,}75 \cdot 10^{-5}}{B} \cdot \left(\frac{\theta_{ср}+273{,}15}{273}\right)^{0{,}8}, \quad (14)$$

Re – критерий Рейнольдса, определяется по формуле (15):

$$Re = \frac{W_0 \cdot d_Э}{\nu_{воз}}, \quad (15)$$

где $\nu_{воз}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха при средней температуре воздуха, $м^2/с$.

Скорость воздуха W_0 определяется относительно поверхности движущейся плёнки, то есть при противотоке, из выражения (16):

$$W_0=W_В+W_{ж}, \quad (16)$$

Величина $W_ж$ может быть найдена в зависимости от гидравлической нагрузки и средней температуры воды, принимается ориентировочно $W_ж$ = 0,2-0,25 м/с. Выбор скорости воздуха производится из расчёта по формуле (17):

$$W_В = \frac{2 \cdot g_ж \cdot \lambda}{b \cdot \rho_В}, \quad (17)$$

Величина удельной гидравлической нагрузки на один погонный метр каждой стороны щитов (в горизонтальном направлении) составляет $g_ж \geq$ 0,0235 кг/м·с, что должно соответствовать устойчивому поддержанию плёнки жидкости на всей поверхности щитов.

Правильность выбора скорости воздуха определяется последующим расчётом высоты оросителя. Если по каким-либо соображениям полученная высота оросителя не удовлетворяет проектировщика, то необходимо изменить скорость воздуха в сторону, приводящую к желаемому изменению высоты оросителя.

6. Для капельного оросителя градирни рассчитывается объём:

$$V_{OP} = \frac{G_{ж} \cdot C_{ж} \cdot \Delta t}{k \cdot \beta_{XV} \cdot \Delta t_{CP}}, (18)$$

где β_{XV} – объёмный коэффициент массоотдачи, кг/(м^3·с), определяется по эмпирической формуле (19):

$$\beta_{XV} = A \cdot (W_B \cdot \rho_B)^m \cdot g_ж{}^n, \quad (19)$$

где рекомендуется принимать плотность орошения в пределах $g_ж$=0.7 – 2 кг/(м^2·с); A=0,292; m=0,53; n=0,39. Скорость воздуха определяется по формуле (20):

$$W_B = \frac{g_ж \cdot \lambda}{\rho_B} \quad (20)$$

Варьируя величиной $g_ж$ и соответственно скоростью воздуха, можно менять расчетную высоту оросителя.

7. Для противоточной плёночной градирни размеры оросителя (см. рис. 5) подсчитываются при помощи следующих формул:

· живое сечение оросителя (проходное сечение для воздуха)

$$F_B = \frac{G_в}{\rho_B \cdot W_B}; (21)$$

· общая высота оросителя (щитов)

$$h_{op} = \frac{a_h \cdot F \cdot b}{2 \cdot F_B}, (22)$$

где a_h – коэффициент, учитывающий влияние неравномерности распределения воды и воздуха, принимаем a_h=1,1-1,3;

· активная площадь оросителя прищитовой конструкции

$$F_{op} = a_F \cdot \frac{b+\delta}{b} \cdot F_в, \quad (23)$$

где a_F – коэффициент, учитывающий площадь, занятую под стойками, колоннами и другими элементами строительной конструкции, принимается равным a_F=1,1-1,2;

δ – толщина щита, принимается равной δ=0,01 м.

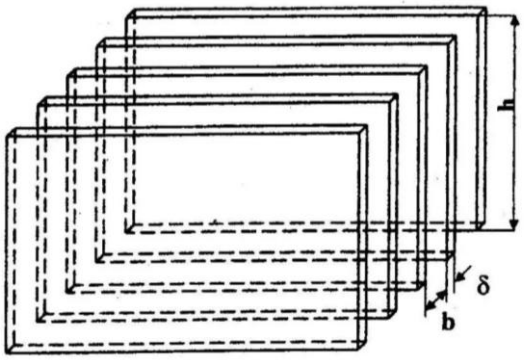


Рис. 5 – Схематичное изображение оросителя плёночной градирни

8. Для противоточной капельной градирни размеры оросителя (см. рис. 5) подсчитываются при помощи следующих формул:

· общая высота оросителя (щитов)

$$h_{op} = \frac{a_h \cdot V_{op}}{F_{op}}, \quad (22)$$

· активная площадь оросителя прищитовой конструкции

$$F_{op} = \frac{G_ж}{q_ж} \quad (23)$$

Коэффициент a_h имеет тот же смысл, что и для плёночного оросителя.

Аэродинамический расчёт градирни

Аэродинамический расчёт производится как для вновь проектируемых градирен, так и при привязке типовых проектов градирен. Этот расчёт, как правило, должен предшествовать тепловому расчёту. При проектировании новых градирен предварительно выбирают тип и конструкцию градирни, основные размеры градирни (или секции), размеры входных окон, воздухоподогревателя, оросителя, водоуловителя, водораспределителя, тип вентилятора (для вентиляторных градирен).

В результате аэродинамического расчёта необходимо установить соответствие аэродинамического сопротивления градирни давлению, развиваемому вентилятором при нормальной подаче, или напору, создаваемому вытяжной башней.

Полное аэродинамическое сопротивление градирни суммируется из сопротивлений: входа воздуха в градирню P_1, воздухораспределителя P_2, поворота воздуха в ороситель P_3, внезапного сужения при входе воздуха в ороситель P_4, оросителя P_5, внезапного расширения при выходе из оросителя P_6, водоуловителя P_7, водораспределителя P_8, входа воздуха в вентилятор P_9:

$$P_{a.c.} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 \quad (24)$$

Величины сопротивлений определяются по формуле:

$$P_{1,2\ldots9} = \xi_{1,2\ldots9} \cdot W^2_{1,2\ldots9} \cdot \frac{\rho_{ср}}{2}, \quad (25)$$

Из всех элементов градирен широкому экспериментальному исследованию подвергались лишь оросители и водоуловители. Для них имеется большое количество данных для практических расчётов.

Коэффициент сопротивления воздухораспределителя определяется по формуле:

$$\xi_2 = l_в(0{,}1 + 0{,}000025 \cdot g_ж), \quad (26)$$

где $l_в$ - длина воздухораспределителя (в противоточных градирнях половина длины воздухораспределителя), м.

Из всех элементов наибольшим сопротивлением обладает ороситель градирни, коэффициент сопротивления которого определяется по формуле:

$$\xi_5 = (\xi_{сух.op} + К_{op} \cdot g_ж) \cdot h, \quad (27)$$

где $\xi_{сух.op}$ - коэффициент сопротивления сухого оросителя;

$К_{op}$ - коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления оросителя при подаче воды, (м·с)/кг.

Метод вычисления сопротивления градирни как суммы входящих в него элементов является приближенным методом, поскольку не учитывает взаимного влияния элементов. Более точные результаты могут быть получены на основе данных аэродинамических исследований градирен в натуре. При проектировании градирен, сходных с испытанными по типу, конфигурации и конструкции элементов, рекомендуются коэффициенты, полученные в аэродинамическом расчёте, и они приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты сопротивления градирен

Тип градирни	Площадь оросителя	Плотность орошения	Коэффициент сопротивления
Отдельно стоящая вентиляторная капельно-плёночная противоточная	380	1,25 – 1,39	31,2*
Секционная вентиляторная плёночная противоточная	64	0,83 – 4,02	85,3*
Секционная вентиляторная капельная поперечноточная	60	0,83 – 1,94	14,1*
Секционная вентиляторная капельная противоточная	16 – 60	1,11 – 1,94	50 – 70
Башенная капельная	до 50 100 500 1000 2000 2400	0,56 – 1,40 – " – – " – – " – – " – – " –	30 – 60 40 – 70 60 – 100 75 – 125 90 – 160 100 - 180
Башенная плёночная с вертикальными каналами	до 700	1,67 – 2,78	8 – 12
Башенная плёночная с наклонными щитами и разрывами между досками	от 800	1,67 – 2,78	25 – 60

* Коэффициент сопротивления соответствует средней плотности орошения.

По результатам аэродинамического расчёта можно определить подачу вентилятора или расход воздуха через башенную градирню аналитически. При этом графическую характеристику вентилятора представляют в виде формулы:

$$\mathrm{P_в} = (l \cdot G_в^2 + m \cdot G_в + d_в) \cdot 9{,}81, \qquad (28)$$

где $\mathrm{P_в}$- полное давление, развиваемое вентилятором, Па;

$G_в$- расход воздуха, проходящего через градирню, м^3/с;

$l, m, d_в$ - постоянные коэффициенты, значения которых для некоторых типов вентиляторов, применяемых на градирнях.

Расход воздуха, проходящего через градирню, определяется также аэродинамическим сопротивлением градирни и вычисляется по известной зависимости:

$$G_в = F_{ор} \left(\frac{2 \cdot \mathrm{P_{a.c}}}{\rho_{ср} \cdot \sum \xi} \right)^{0,5} \qquad (29)$$

где $\sum \xi$ - сумма коэффициентов аэродинамических сопротивлений элементов градирни или коэффициент полного аэродинамического сопротивления градирни.

В условиях работы градирни $P_в$=$P_{а.с}$, поэтому расчётная формула для определения подачи воздуха вентилятором имеет вид

$$G_в = \frac{-m \pm (m^2 - 4(l-f)d_в)^{0,5}}{2(l-f)}, \qquad (30)$$

где f определяется по формуле:

$$f = 0{,}5 \cdot \frac{\rho_{ср} \cdot \sum \xi}{F_{ор}^2 \cdot 9{,}81}$$

Средняя плотность воздуха в градирне может быть определена как среднее арифметическое плотности воздуха на входе и на выходе из градирни. Для вентиляторных градирен с достаточной степенью точности можно принять $\rho_{ср} \approx \rho_1$

При вычислении $\sum \xi$ все коэффициенты аэродинамических сопротивлений градирни можно отнести к скорости воздуха в горизонтальном сечении градирни на уровне оросителя, то есть скорости воздуха в оросителе W_5. Это допущение не снижает точности расчётов, поскольку величина сопротивления оросителя составляет 85 – 92% полного аэродинамического сопротивления градирни. С учётом этого $\sum \xi$ можно также посчитать по упрощённой зависимости:

$$\sum \xi = а_б . g_ж + в_б. \qquad (31)$$

Здесь величины $а_б$ и $в_б$ являются постоянными для данной конструкции градирни и могут быть определены по формулам:

$$а_б = К_{ор} \cdot h + 0{,}921; \qquad (32)$$

$$в_б = \xi_{гр.без.ор} + \xi_{сух.ор} \cdot h + \xi_7 , \qquad (33)$$

где $\xi_{гр.без.ор}$ - коэффициент аэродинамического сопротивления градирни без оросителя и другого технологического оборудования, принимается согласно рисунку 6 в зависимости от отношения площади входных окон к площади оросителя.

В случае расчёта градирен при выключенном вентиляторе, а также башенных градирен, вместо давления, развиваемого вентилятором, определяется сила тяги по формуле:

$$Р_б = 9{,}81 \cdot Н \cdot (\rho_1 - \rho_2), \qquad (34)$$

где Н - высота градирни от верха входных окон, м (см. рис. 7).

Расход воздуха, проходящего через градирню с выключенным вентилятором или через башенную градирню, определяется по формуле:

$$G_в = \sqrt{\frac{H \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{f}}. \qquad (35)$$

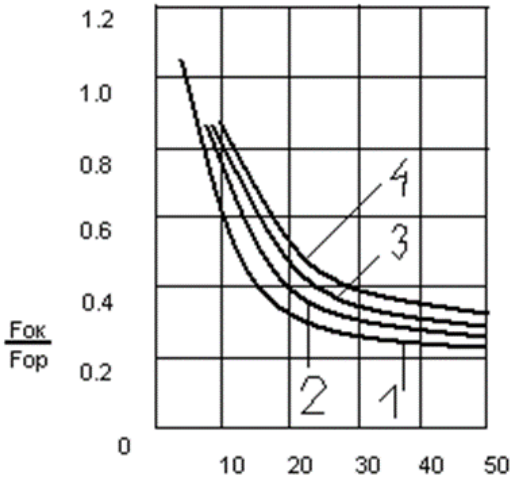


Рис. 6 - График зависимости $\xi_{гр.без.ор}$ от отношения площади входных окон к площади оросителя:
1 - башенные градирни; 2 – отдельно стоящие вентиляторные; 3 – квадратные секционные; 4 – прямоугольные секционные градирни.

При определении плотности воздуха используют формулу Л. Микишки и Р. Рейнима:

$$\rho_{1,2} = \frac{S - \lg(h_{1,2}) + 3{,}62}{\sigma}, \qquad (36)$$

где Б и S- постоянные коэффициенты, значения их приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значение коэффициентов Б и S

φ, %	100	90	80	70	60	50	40	30	20
σ	4,69	4,72	4,75	4,78	4,81	4,84	4,76	4,69	4,58
S	6,66	6,68	6,68	6,69	6,70	6,69	6,56	6,44	6,21

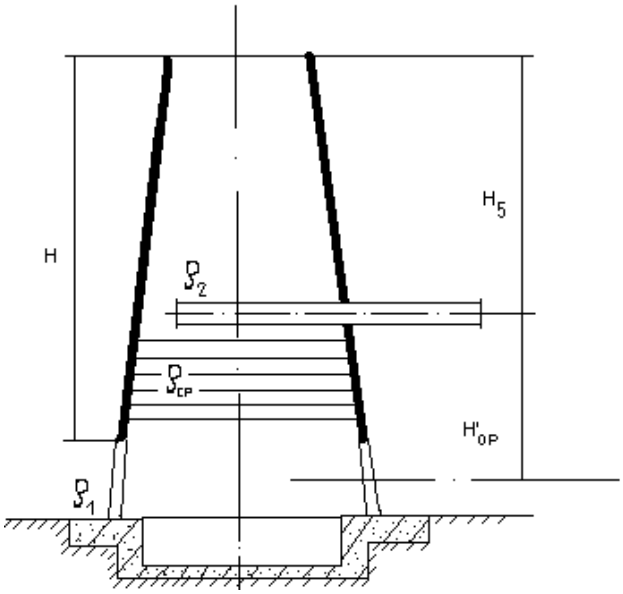


Рис. 7 - К аэродинамическому расчету градирни

Индивидуальные задания для выполнения курсового проекта

Номер варианта	Наименование пункта наблюдения	Площадь орошения градирни, $F_{ор}$, $м^2$	Плотность орошения, q, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	Паровая нагрузка конденсатора, $D_к$, т/ч	Давление пара в конденсаторе, $P_к$, кПа	Глубина охлаждения воды, ^0C
1	Астрахань	3200	10	545	3,43	4
2	Волгоград	3200	10	553	3,43	5
3	Нижний Новгород	2300	12	535	5,8	4
4	Иркутск	2300	11	513	5,8	5
5	Казань	2300	11	528	5,8	4
6	Москва	3200	10	554	3,43	5
7	Новосибирск	3200	10	556	3,43	5
8	Омск	2300	12	532	5,8	4
9	Томск	3200	10	541	3,43	5
10	Уфа	3200	10	556	3,43	5
11	Челябинск	3200	10	561	3,43	6
12	Тюмень	2300	11	538	5,8	5
13	Самара	3200	10	549	3,43	6
14	Саратов	3200	10	567	3,43	6
15	Калуга	3200	10	558	3,43	5
16	Чульман	2300	11	518	5,8	6
17	Ярославль	2300	12	533	5,8	6
18	Петрозаводск	3200	10	559	3,43	6
19	Липецк	2300	11	519	5,8	5
20	Астрахань	3200	10	545	3,43	4

Пример поверочного расчёта башенной градирни

Задача поверочного расчета заключается в определении четырех неизвестных величин: $G_ж$, θ_2, φ_2 и λ. Используя уравнение теплового баланса, материального баланса, тяги, получаем систему из четырех уравнений, связывающих искомые величины:

$$\begin{cases} \lambda = \dfrac{C_ж \cdot \Delta t}{k \cdot (h_2 - h_1)} & (37) \\ \theta_2 = \theta_1 + 13{,}1 \cdot 10^4 \cdot (x_2 - x_1)\dfrac{t_1 + t_2 - \theta_1 - \theta_2}{P_1'' + P_2'' - P_1 - P_2 - 2\,\partial P''} & (38) \\ F = \dfrac{\lambda \cdot G_ж \cdot (x_2 - x_1)}{\beta_p \cdot \Delta P_{ср}} & (39) \\ \lambda = \dfrac{F}{G_ж} \cdot \sqrt{\dfrac{H_д \cdot (\rho_1^2 - \rho_2^2) \cdot 9{,}8}{\xi}} & (40) \end{cases}$$

где $H_Д$ – действующая высота градирни; ξ - коэффициент сопротивления градирни; $\Delta P_{ср}$ – разность парциальных давлений пара.

Решение в общем виде этих уравнений невозможно и его приходится производить подбором графическим путем. Ход решения представлен на числовом примере.

Плёночная градирня имеет поверхность щитов F=230000 м^2, площадь живого сечения оросителя $F_В$=1240 м^2; полную площадь оросителя $F_{ор}$=1680 м^2 и действующую высоту $H_д$=43,3 м.

Требуется определить температуру охлаждённой воды при $G_ж$=3,06·10^3 кг/с; Δt=12 ^{0}C; θ_1=35 ^{0}C; φ_1=0,4 и В=9,94·10^4 Па.

Для данного состояния наружного воздуха находим: P_1=0,224·10^4 Па; x_1=0,0144 кг/кг; ρ_1=1,114 кг/м^3 и h_1=72,0 кДж/кг.

Подставляя в уравнение (37) значения Δt, $C_ж$ и h_1, получаем (полагая, что k=1):

$$\lambda = \frac{50.4}{h_2 - 72}.$$

Задаваясь различными h_2, находим λ, значения которых приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения λ - теоретического относительного расхода воздуха

Показатели	Размерность	Значения коэффициентов		
h_2	кДж/кг	142	163	184
λ	кг/кг	0.714	0.551	0.448

По этим данным наносим на график кривую зависимости λ от h_2 (см. рис.8. а, кривая А). Задаваясь затем различными значениями φ_2, подсчитываем λ также по уравнению (40). Значения θ_2 и ρ_2 определяются из таблиц влажного воздуха по принятым значениям h_2 и φ_2. Результаты этих расчетов сведены в таблицу 5.

Полученные данные наносим на прежний график в виде трех кривых $\lambda=f(h_2)$, отвечающих каждая определенному значению φ_2 (см. рис. 8. а, кривые В).

Таблица 5. Значения λ - теоретического относительного расхода воздуха

h_2	кДж/кг	142			163			184		
φ_2	-	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,8
θ_2	^{0}C	36,6	38,1	40,2	39,3	41,1	43,0	41,7	43,4	45,5
ρ_2	кг/м^3	1,091	1,085	1,080	1,078	1,072	1,066	1,066	1,060	1,057
λ	кг/кг	0,469	0,518	0,568	0,583	0,629	0,672	0,672	0,710	0,755

Точки пересечения кривых В с кривой А (см. рис. 8. а) определяют значение λ, h_2 и φ_2, удовлетворяющие двум уравнениям (37) и (40). Величина t_2 в эти уравнения не входит. Для получения h_2 и φ_2 находим также из таблиц и диаграмм соответствующие значения θ_2 , P_2 и x_2 (см. табл. 6).

Таблица 6. Параметры уходящего воздуха

λ	кг/кг	0,570	0,597	0,624	Из рис.8. а
h_2	кДж/кг	160,0	156,0	152,5	
φ_2	-	1,0	0,9	0,8	
θ_2	^{0}C	38,9	40,2	41,6	По таблицам и диаграммам
P_2	Па	$0{,}695\cdot10^4$	$0{,}67\cdot10^4$	$0{,}65\cdot10^4$	
x_2	кг/кг	0,0469	0,0450	0,0430	

Найденные значения θ_2 наносим на другой график в зависимости от λ (рис. 8. б, кривая С).

Задаемся теперь тремя значениями t_2. Для каждого из этих значений t_2 подсчитываем θ_2по уравнению (38), подставляя в правую часть этого уравнения значения θ_2, P_2 и x_2 из таблицы 6. Результаты этих подсчётов сведены в таблицу 7.

Таблица 7. Значение θ_2

t_2	°C	34			36			39		
λ	кг/кг	0,570	0,597	0,624	0,570	0,597	0,624	0,570	0,597	0,624
θ_2	°C	39,6	38,8	37,1	41,0	39,7	38,6	42,0	40,9	39,9

Новые значения θ_2, подсчитанные по уравнению (38), также наносим на график в форме трёх кривых $\theta_2 = f(\lambda)$, отвечающих каждая определённому значению t_2 (см. рис. 8., б, кривые Д).

Точки пересечения кривых Д с кривой С (см. рис. 8.б) определяют значения λ, θ_2, ϕ_2, и t_2, удовлетворяющие уже трём уравнениям (37), (38) и (40).

Подсчитываем затем для каждого из принятых значений t_2 соответствующую величину поверхности охлаждения F, пользуясь формулой (39). Коэффициент массоотдачи β_{xv} рассчитываем по критериальному уравнению каждый раз в соответствии со скоростью воздуха в оросителе при данном λ. Полученные значения приведены в таблице 8.

По данным таблицы 8 строим кривую $F = f(t_2)$ и для заданной поверхности охлаждения F = 230.000 м^2 находим искомую температуру охлаждения воды $t_2 = 33,6°C$ (см. рис. 8, в).

Таблица 8. Зависимость параметров уходящего воздуха от температуры охлажденной воды

t_2	°C	34	36	39	
λ	кг/кг	0,577	0,592	0,605	Из рис. 8, б
θ_2	°C	39,2	39,9	40,6	
ϕ_2	-	0,97	0,92	0,87	
β_p	кг/м^2 · с · Па	$8,16 \cdot 10^{-8}$	$8,32 \cdot 10^{-8}$	$8,55 \cdot 10^{-8}$	
F	м^2	220,000	165,000	118,000	

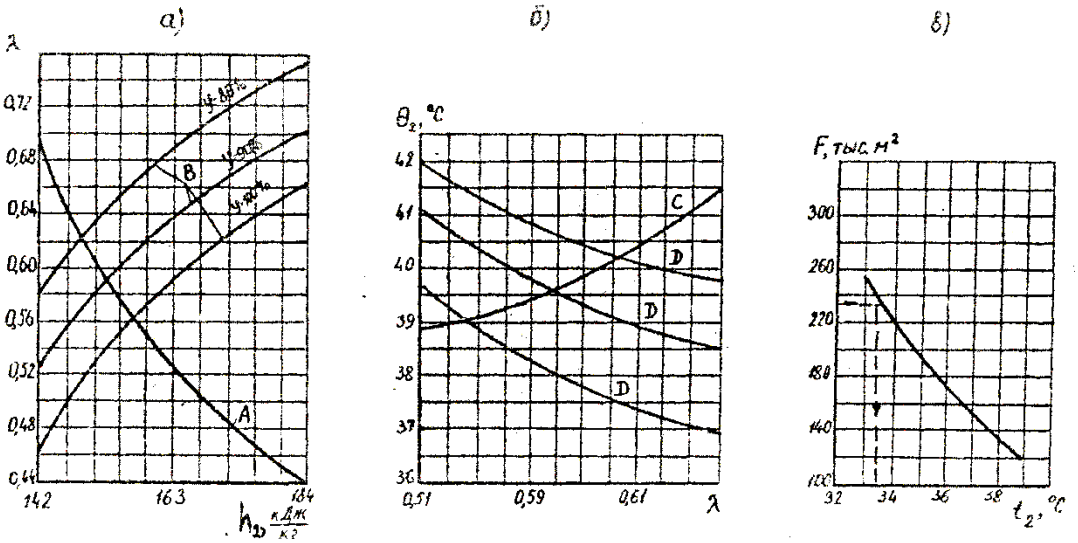


Рис. 8 - К поверочному расчету башенной градирни

Список литературы

1. Тепловой и аэродинамический расчет градирни для ТЭЦ. Д.т.н., проф. Моисеев Б.В., к.т.н., доц. Полетыкина Т.П. Методические указания для студентов специальности ПТ. Тюмень: ТюмГАСА, 2005, 24 стр. Текст : непосредственный.
2. Арефьев, Ю. И. Аэродинамический расчет башенных градирен при реконструкции / Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко. – Текст : электронный // ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО
3. Пособие к СНиП 2.04.02-84. Пособие по проектированию градирен. – Москва: 1989. – 96 с. – URL : https://narfu.ru/agtu/www.agtu.ru (дата обращения 11.11.2020).
4. Берман, Л. Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды/ Л.Д. Берман. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1949. - 440 с. – Текст : непосредственный.
5. Расчет вентиляторных градирен. Переселков О. Р., Круглякова О.В. Методические указания для курсового и дипломного проектирования для студентов специальности «Теплоэнергетика». Харьков: Харьковский политехнический институт, 2016 г. 59 с. – URL : http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/25659/1/prohramy_2016_Raschety_ventilyatornykh_gradiren.pdf (дата обращения 26.11.2020).

Учебное издание

Тепловой и аэродинамический расчёт градирни для ТЭЦ

Методические указания к курсовому проекту

Составитель
МЕНЬШИКОВА *Анна Антоновна*
ТРЕТЬЯКОВА Полина Александровна

Ответственный редактор
О.А. Степанов, заведующий кафедрой ПТ

В авторской редакции

Подписано в печать 20.12.2020. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 2,75.
Тираж 30 экз. Заказ № 18-921.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.