

Исследование процесса испарительного охлаждения

Методические указания

Иваново
2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

Исследование процесса испарительного охлаждения

Методические указания

Составители:
А.Г. Липин
В.О. Небукин
А.А. Липин

Иваново 2018

УДК 66.021.4

Составители: А.Г. Липин, В.О. Небукин, А.А. Липин

Исследование процесса испарительного охлаждения: метод. указания / сост.: А.Г. Липин, В.О. Небукин, А.А. Липин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2018. – 28 с.

В методических указаниях рассмотрены теоретические основы процесса испарительного охлаждения, устройство и работа лабораторной установки, методика проведения исследований и порядок обработки результатов, полученных при охлаждении воды воздухом в насадочной колонне.

Предназначены студентам всех направлений подготовки ИГХТУ дневного и заочного отделений, выполняющим лабораторный практикум по дисциплинам «Процессы и аппараты химической технологии», «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты биотехнологии», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Процессы и аппараты отрасли».

Табл. 2. Ил. 11. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент

доктор технических наук, профессор С.П. Бобков

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

Оглавление

1. Теоретическое введение.....	4
1.1. Физическая сущность процесса.....	4
1.2. Типы и конструкции охладителей.....	5
1.3. Методы расчета процесса испарительного охлаждения.....	13
2. Экспериментальная часть.....	19
2.1. Описание лабораторной установки.....	19
2.2. Порядок проведения эксперимента.....	20
2.3. Порядок обработки экспериментальных данных.....	21
Список библиографических источников.....	25
Приложения.....	26

1. Теоретическое введение

1.1. Физическая сущность процесса

Испарительное охлаждение – это охлаждение жидкости вследствие тепло- массообменных процессов, происходящих с ней при контакте с газом или газовой смесью. Понижение температуры обусловлено следующими процессами:

- 1) теплоотдачей через соприкосновение;
- 2) излучением;
- 3) испарением жидкости с ее поверхности.

При испарении жидкость теряет свои наиболее быстро движущиеся молекулы, таким образом, уменьшается ее средняя кинетическая энергия или, другими словами, температура жидкости становится ниже. Избыточная энергия, которую тратят молекулы на преодоление сил сцепления и увеличение объема называется *избыточным испарением*.

Испаряясь, молекулы воды большей частью остаются у ее поверхности, так как скорость удаления молекул за счет диффузии и конвекции ничтожно мала в сравнении со скоростью их испарения.

Поверхностное испарение происходит, когда давление насыщенного пара при температуре поверхности больше чем парциальное давление пара на достаточном удалении от нее. При этом следует помнить, что испарение жидкости всегда связано с ее охлаждением.

Что касается теплопередачи соприкосновением, то теплота будет передаваться в ту сторону, где меньше температура.

Когда температура газа выше температуры жидкости, газ охлаждается через соприкосновение с водой путем теплоотдачи. Но пока количество отдаваемого газом тепла меньше того, что тратят молекулы жидкости на испарение, жидкость будет продолжать охлаждаться. Этот процесс будет длиться до тех пор, пока не установится баланс между теплотой, отдаваемой

газом, и той, которая затрачивается на испарение. Достижение баланса в этом случае называют *теоретическим пределом охлаждения*.

1.2. Типы и конструкции охладителей

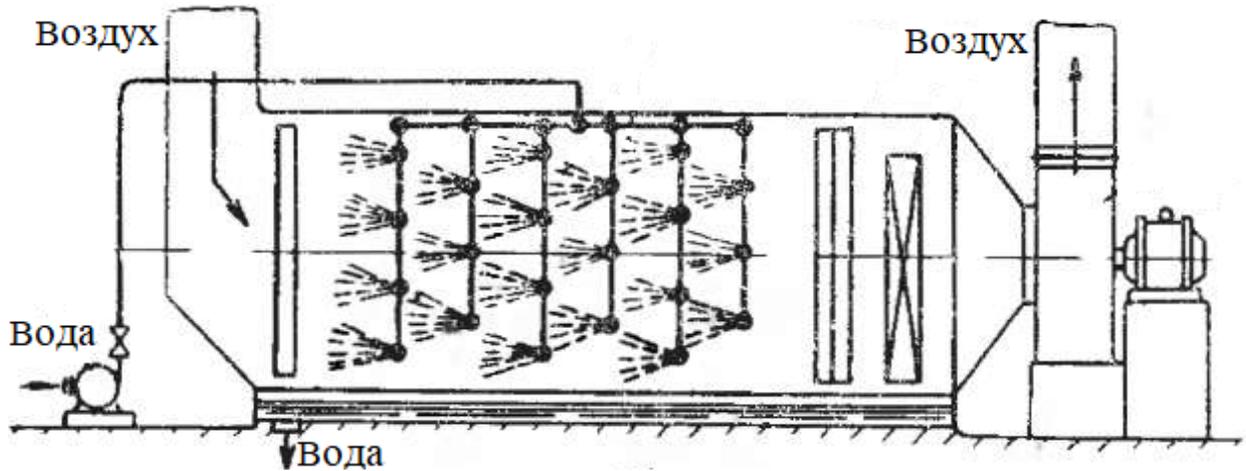


Рис. 1. Камерный аппарат

В смесительных теплообменных аппаратах процесс передачи теплоты осуществляется непосредственно между двумя средами (без разделительной стенки). По конструктивным признакам смесительные теплообменники бывают камерные, насадочные, струйные, пленочные и др. В камерных (безнасадочных) теплообменниках (рис. 1) жидкость распыляется

форсунками в газовую среду. На поверхности капель происходит теплообмен между жидкостью и газом.

Преимущество – простота конструкции, недостаток – несовершенство процессов тепло- и массообмена, как следствие, большие габариты аппаратов (например, градирня).

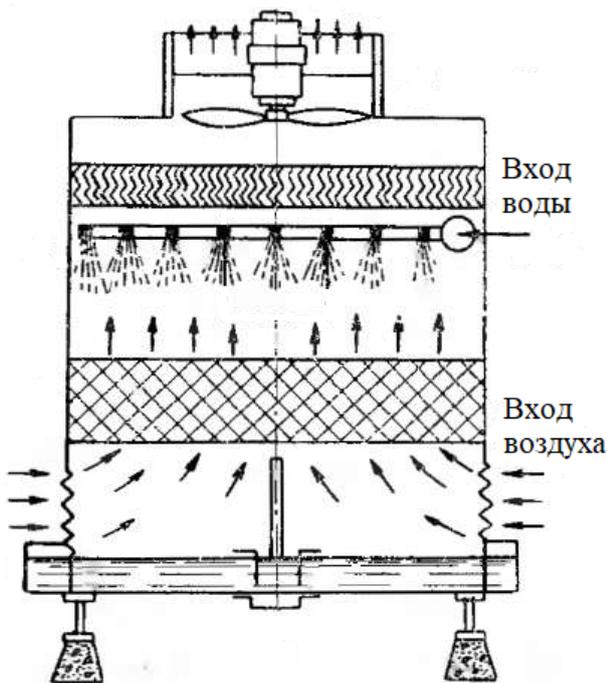


Рис. 2. Насадочный аппарат

В насадочных аппаратах (рис. 2) соприкосновение газа с жидкостью происходит на смоченной поверхности

насадки (кольца Рашига, куски кокса, деревянные рейки и другие устройства, обеспечивающие пленочное стекание жидкости). Преимущество – меньшие, чем у камерных аппаратов, геометрические размеры. Недостаток – большое аэродинамическое сопротивление насадки (особенно если загрязняется), как следствие – большой расход электроэнергии на привод вентилятора.

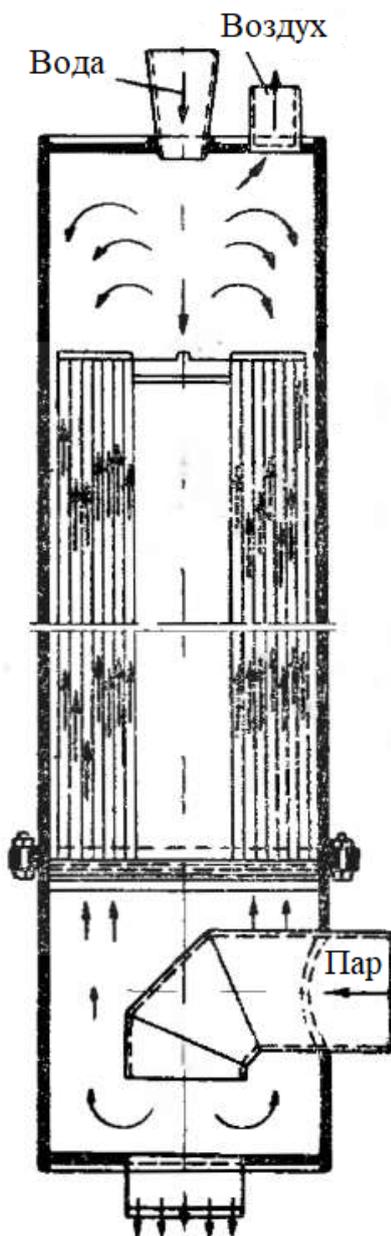


Рис. 4. Пленочный аппарат

Струйные смесительные аппараты (рис. 3) применяются как трансформаторы теплоты. Один теплоноситель (пар, вода) с более высоким давлением проходит через сопло: скорость его

увеличивается, давление уменьшается, возникает инжектирующий эффект и второй теплоноситель подсасывается в аппарат. Между ними происходит процесс тепломассообмена. По конструкции аппарат прост, нет привода, трущихся частей. Он может использоваться как подогреватель, как аппарат для поддержания разрежения.

В пленочных смесительных аппаратах (рис. 4) через сопло подается вода, ударяется о розетку, разбрызгивается и стекает пленкой по обеим сторонам концентрически расположенных металлических цилиндров. Скорость воды достаточно велика, что повышает коэффициент

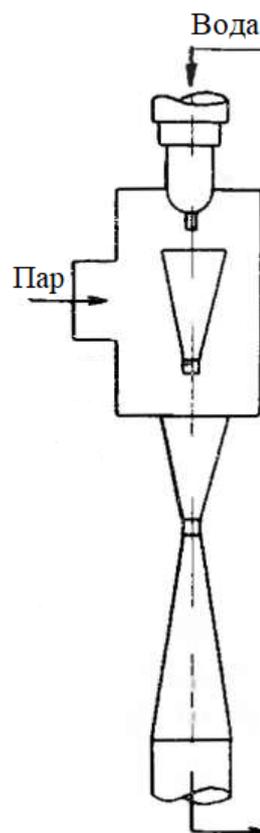


Рис. 3. Струйный аппарат

теплоотдачи, а габариты аппарата делает небольшими. Недостаток – возможность коррозии металлических цилиндров.

Наибольшее распространение среди смесительных теплообменников, работающих с полным или значительным (более двух третей) испарением орошающей жидкости, получили полые скрубберы (рис. 5), представляющие собой колонны круглого или прямоугольного сечения. Орошающая жидкость, подаваемая сверху, дробится на капли механическими форсунками грубого распыла, работающими под давлением 0,3 – 0,4 МПа. При этом факелы распыла должны перекрывать все поперечное сечение скруббера. Поэтому газ со скоростью 0,7 – 1,5 м/с, как правило, направляется противоточно по отношению к каплям, т.е. снизу-вверх.

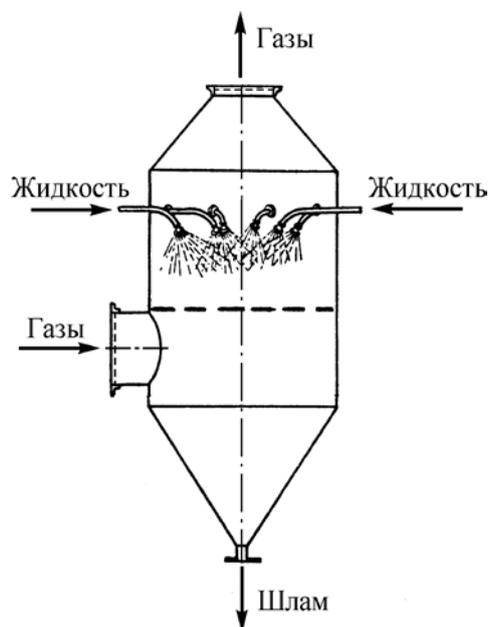


Рис. 5. Пोलый скруббер

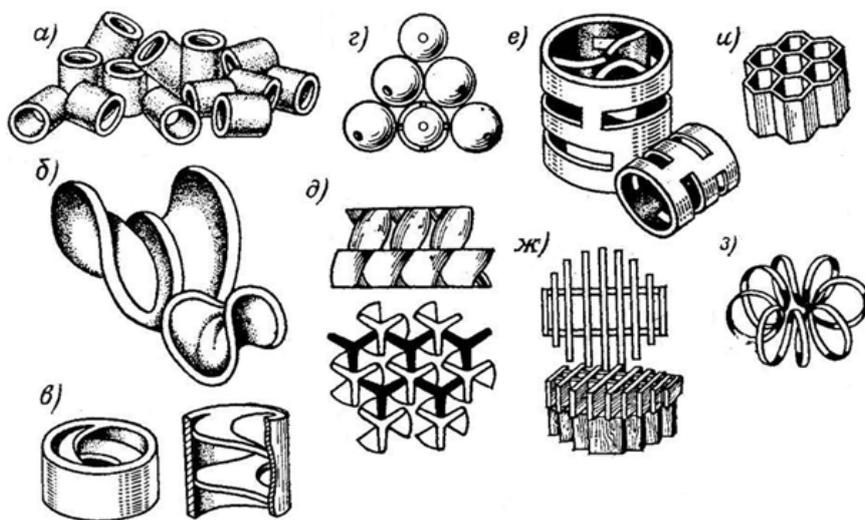


Рис. 6. Насадка: а) кольца Рашига; б) седла Берла; в) кольца с перегородками; г) шары; д) пропеллерная насадка; е) кольца Палля; ж) хордовая насадка; з) спирали; и) керамические блоки

Насадочные скрубберы представляют собой колонны, заполненные телами различной формы – насадкой (рис. 6). Насадка предназначена для распределения жидкости по развитой поверхности.

Важнейшими требованиями к насадке являются: обеспечение большой поверхности контакта фаз, низкий перепад давления в слое, а также равномерное распределение потоков газа и жидкости по сечению аппарата.

Тарельчатые скрубберы (рис. 7) также используют для очистки газов. Они могут работать в барботажном и пенном режимах. В первом случае газ проходит через слой жидкости в виде пузырьков, на поверхности которых и происходит осаждение частиц пыли, во втором на скрубберной тарелке имеет место пенообразование, и очистка газов от частиц осуществляется поверхностью пены. Так как межфазная поверхность при пенном режиме больше, чем при барботажном, то аппараты, работающие в пенном режиме, более эффективны и находят более широкое применение в промышленности, чем барботажные.

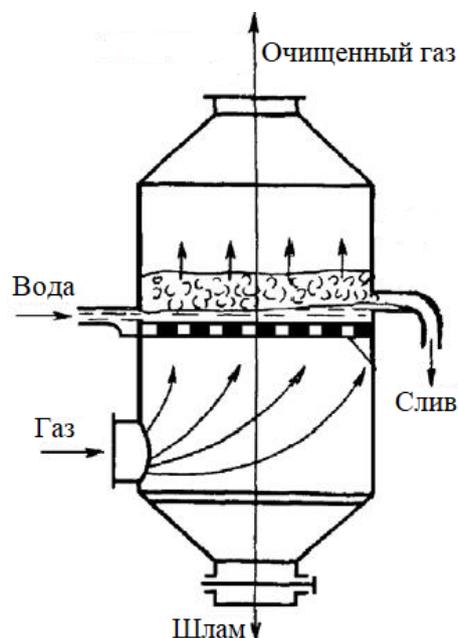


Рис. 7. Пенный тарельчатый скруббер



Рис. 8. Скруббер с псевдооживленной насадкой

Скрубберы с псевдооживленным слоем легких инертных тел (рис. 8) работают в режимах псевдооживления. Обрабатываемый газ подают снизу под опорно-распределительную перегородку с расположенной на ней дисперсной насадкой. Последняя сверху закрывается ограничительной перегородкой, на которую распыляется через форсунки орошающая жидкость. Для уменьшения каплеуноса в верхней части аппарата расположен брызгоотделитель.

Для охлаждения больших объемов циркуляционной воды используются открытые

охладители, такие как охлаждающие пруды (рис. 9) и брызгальные бассейны (рис. 10), а также башенные охладители, например, башенные брызгальные и пленочные градирни (рис. 11, 12). Кроме того, используются вентиляторные охладители (рис. 13) и охладители смешанного типа (рис. 14).

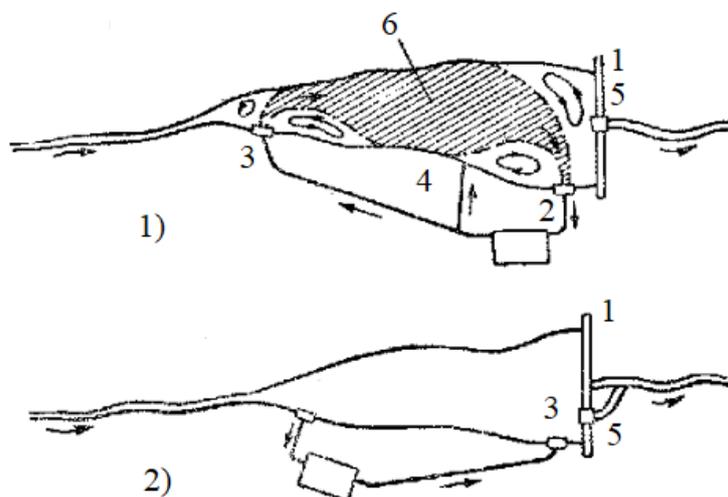


Рис.9. Искусственные пруды-водохранилища:

1 – плотина; 2 – забор охлажденной воды; 3 – сброс теплой воды; 4 – перепускной канал (зимний сброс); 5 – сброс воды из пруда; 6 – транзитный поток (заштрихован)

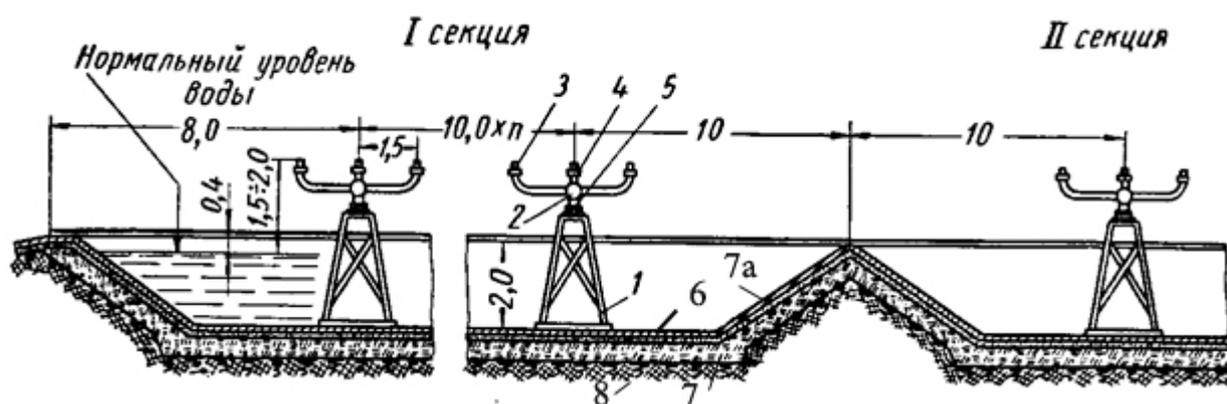


Рис.10. Поперечный разрез брызгального бассейна:

1 – железные опоры под распределительные трубы; 2 – распределительные трубы; 3 – разбрызгивающие сопла; 4 – соплодержатели; 5 – роликовые опоры; 6 – бетонные плиты; 7 – крупный песок; 7а – щебень или галька; 8 – мягкая глина

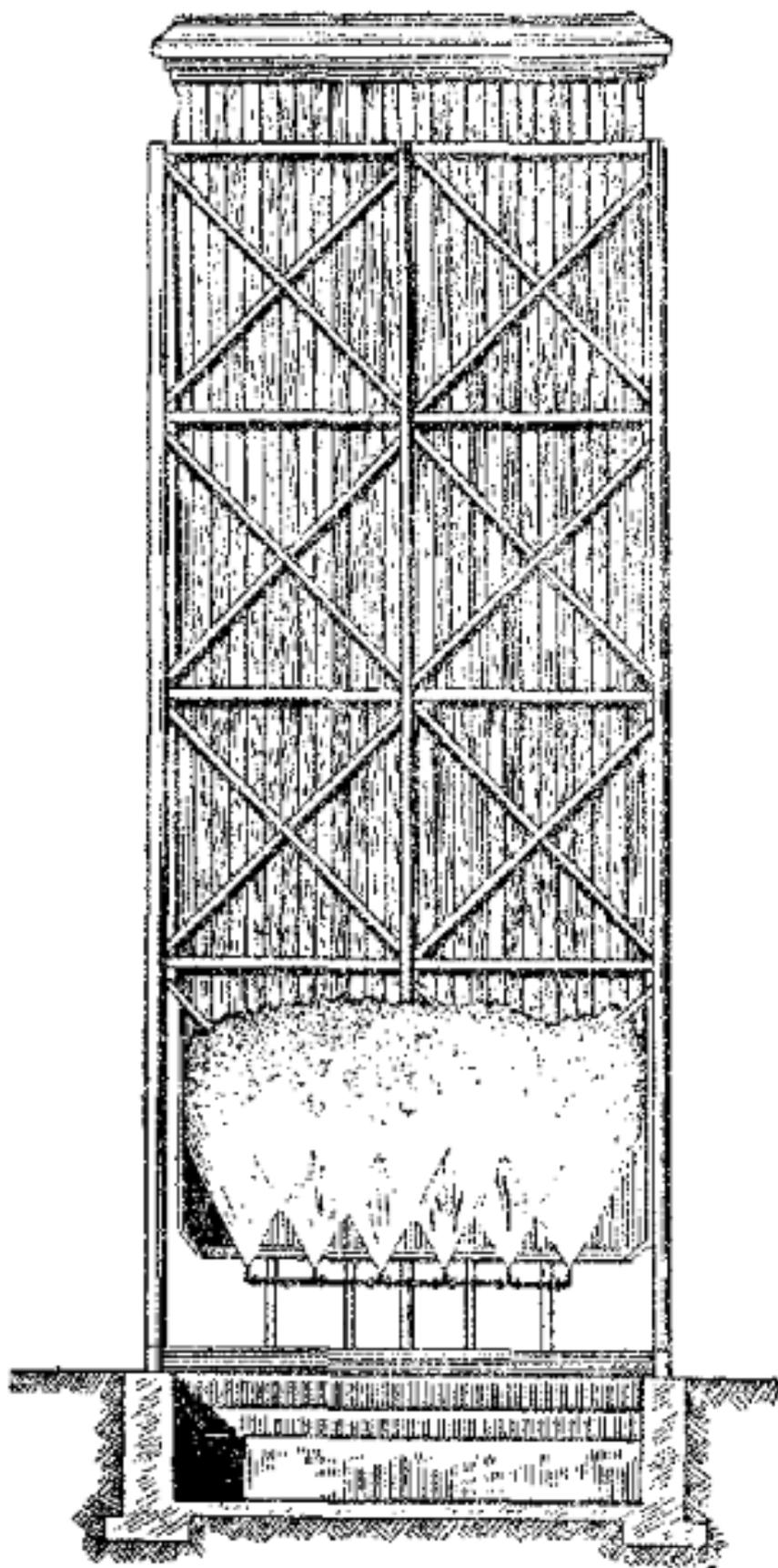


Рис.11. Башенная брызгальная градирня

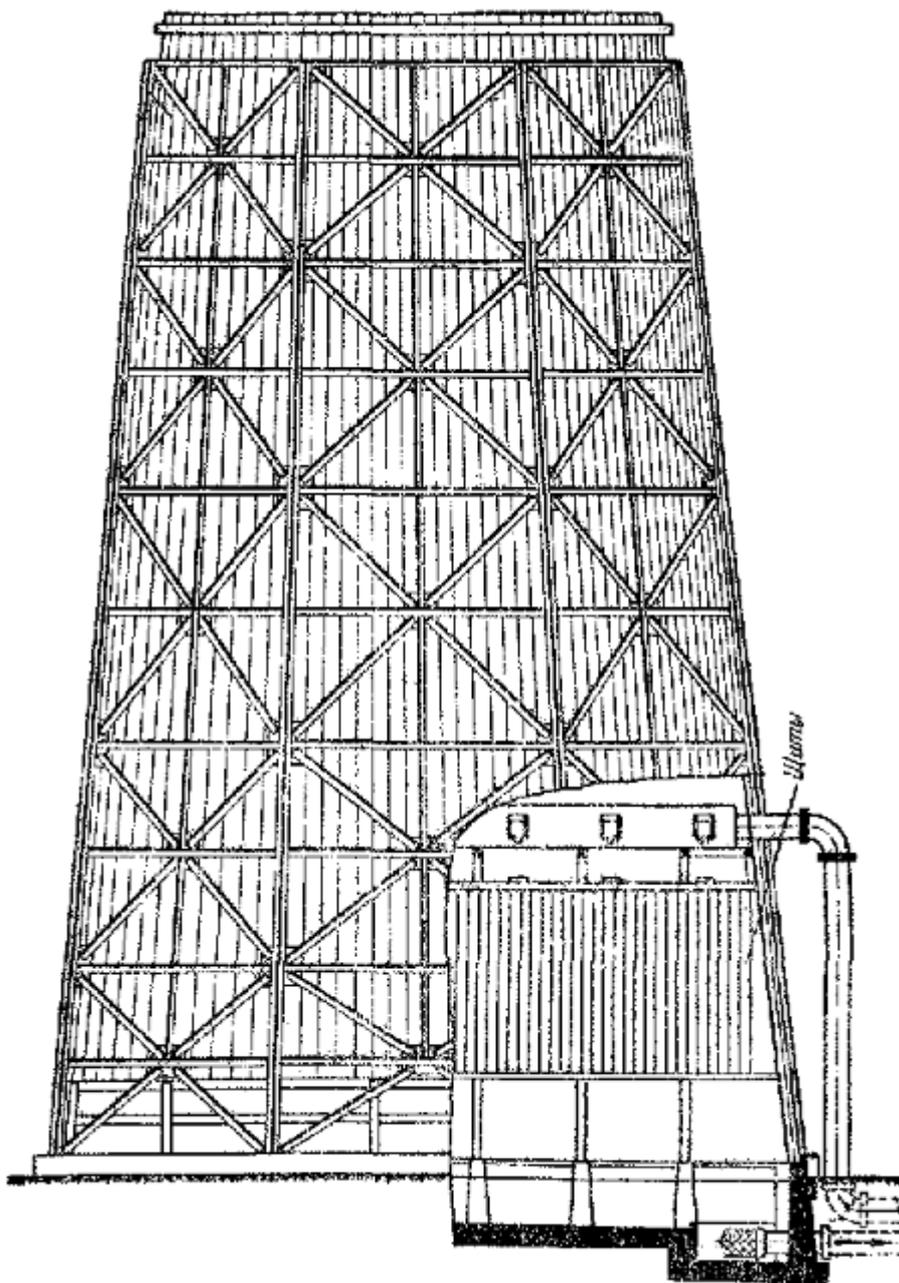


Рис.12. Башенная пленочная градирня

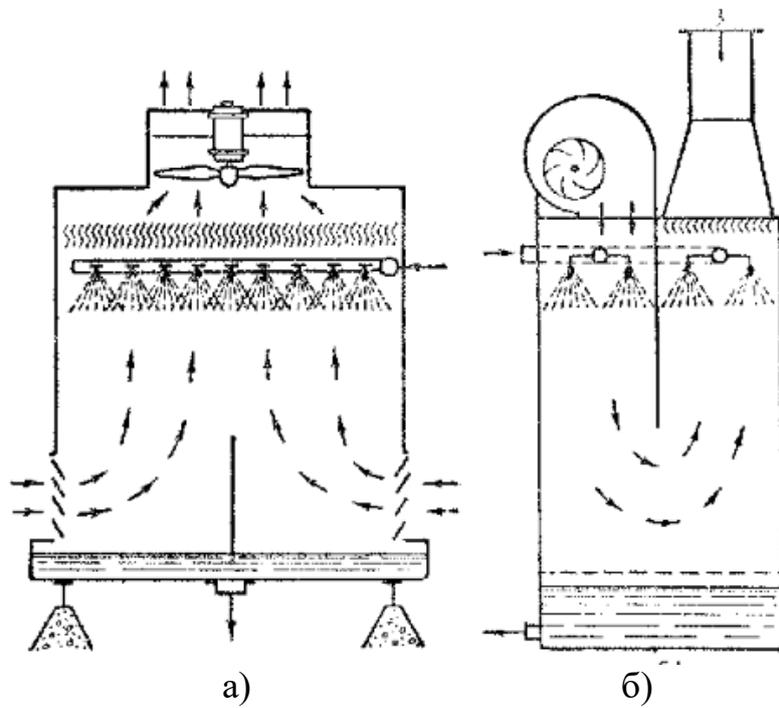


Рис.13. Вентиляторные брызгальные градирни:
а – одноходовая; *б* – двухходовая

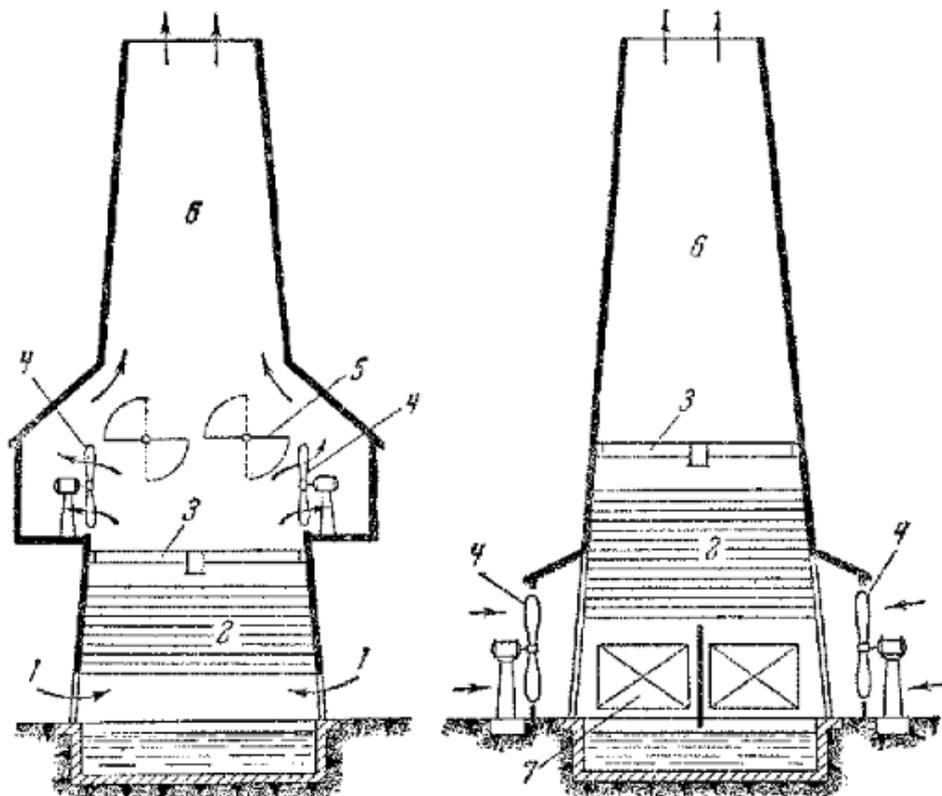


Рис.14. Градирня со смешанной вентиляцией:
 1 – вход воздуха; 2 – решетник; 3 – водораспределительное устройство; 4 – вентилятор; 5 – повторная заслонка; 6 – вытяжная башня; 7 – проем со съемным щитом

В химической, металлургической, пищевой промышленности, при производстве строительных материалов, минеральных удобрений широкое распространение получили аппараты с непосредственным смешиванием газообразного и жидкого теплоносителей – скрубберы. Этому способствуют широкая область применения (для нагревания, охлаждения, увлажнения, осушки газов, пылеулавливания, абсорбции, ректификации), простота конструкции, высокие коэффициенты тепломассообмена, развитые поверхности контакта фаз и как следствие – небольшие габариты, большие объемные расходы обрабатываемого газа, широкий диапазон регулирования параметров.

Отсутствие в газожидкостных теплообменниках разделительной стенки обеспечивает смешение теплоносителей. Непосредственный контакт газа и жидкости обуславливает протекание не только теплообменных, но и массообменных (испарение, конденсация) процессов.

Наиболее распространенной в промышленности парой газ – жидкость является воздух – вода. Поэтому для проектирования смесительных теплообменников необходимо знание особенностей тепло- и массообмена влажного воздуха с водой или влажной твердой поверхностью.

Теплотехнические расчеты процессов, протекающих с участием влажного воздуха, проводят, как правило, с использованием H - d -диаграммы, поскольку она способствует упрощению, быстроте определения параметров влажного воздуха, а также наглядности представления протекающих процессов.

1.3. Методы расчета процесса испарительного охлаждения

Рассмотрим процесс тепломассообмена в насадочном скруббере при противоточном движении воздуха и воды. Пусть известны параметры воздуха на входе (энтальпия H' , температура t' , влагосодержание d'), расходы воздуха L и охлаждающей воды G_B , а также температура воды на входе t_B' и выходе t_B'' .

Необходимо определить параметры воздуха на выходе из скруббера (H'' , t'' , d'') и построить процесс его осушки в H - d -диаграмме. Из уравнения теплового баланса для скруббера имеем:

$$LH' + G_B c_{pB} t_B' = LH'' + (G_B \pm \Delta W) c_{pB} t_B'',$$

где c_{pB} – теплоемкость воды, ΔW – количество влаги, сконденсировавшейся из воздуха. Так как $\Delta W \ll G_B$, то в практических расчетах величиной ΔW обычно пренебрегают.

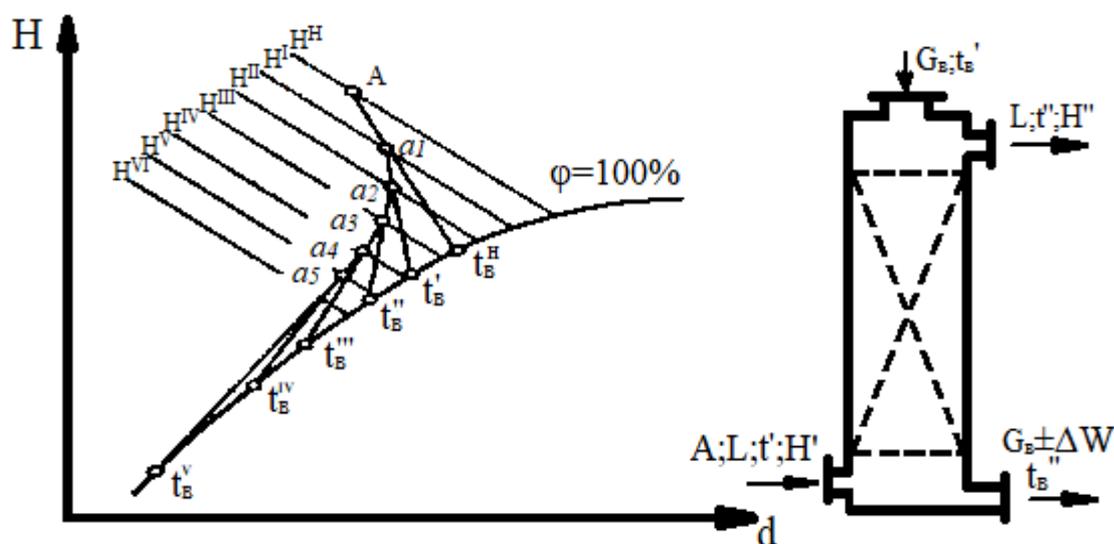


Рис. 15. Изображение осушки воздуха в скруббере

Для построения на H - d -диаграмме процесса осушки весь аппарат по высоте разбивают на участков. Тем самым весь перепад энтальпий

$$H' - H'' = n\Delta H,$$

где ΔH – перепад энтальпий на каждом участке.

Для каждого участка скруббера, находящегося между двумя соседними сечениями, можно составить уравнение теплового баланса для двух участков.

$$LH' + G_B c_{pB} t_B^I = G_B c_{pB} t_B'' + LH^I,$$

$$LH^I + G_B c_{pB} t_B^{II} = G_B c_{pB} t_B^I + LH^{II}.$$

В этих уравнениях t_B^I и t_B^{II} – температуры воды соответственно в I и II сечениях. Из первого уравнения определяют неизвестную температуру

воды t_B^I , зная которую, по второму уравнению находят t_B^{II} . Аналогично можно составить уравнения теплового баланса для следующих участков и определить температуру воды в каждом промежуточном сечении.

Процесс осушки воздуха строится по ступеням на H - d диаграмме следующим образом. На диаграмму наносят точку A , соответствующую начальным параметрам воздуха, а также значения энтальпий в каждом сечении. Далее на линии $\varphi = 100\%$ отмечают значения температур воды в каждом сечении. На первом участке воздух с параметрами точки A смешивается с насыщенным воздухом, имеющим $\varphi = 100\%$ и температуру $t_B = t_B''$. Далее через точку A проводят линию смешения и при пересечении с линией $H = \text{const}$ получают точку a_1 , характеризующую параметры воздуха в этом промежуточном сечении. Для последующих участков рассуждения аналогичны.

Построения процессов увлажнения воздуха при противотоке и увлажнения (осушки) воздуха при прямотоке, подобных описанным, изображены на рисунке 16.

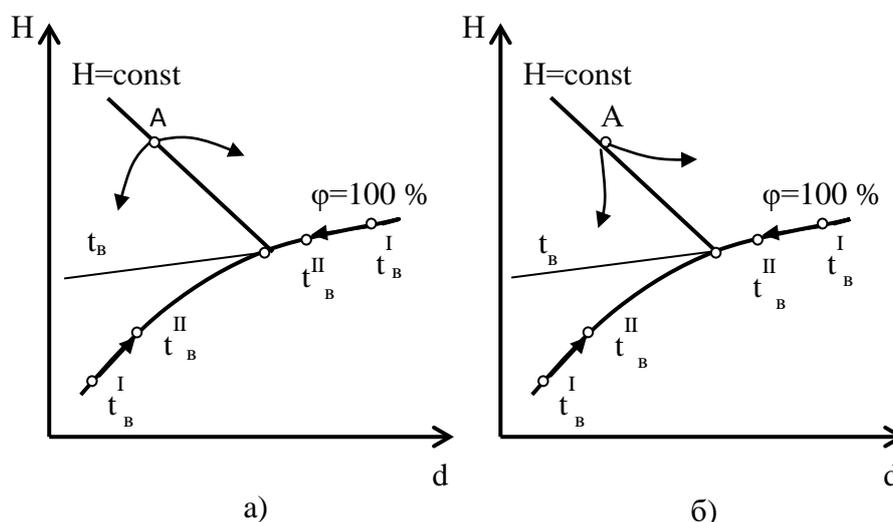


Рис. 16. Изображение процессов смешения воздуха и воды:

а – прямоток; б – противоток

В зависимости от времени года, местных климатических условий и производственного процесса воздух, подаваемый в помещение, может подвергаться охлаждению или нагреванию, осушке или увлажнению.

В общем случае при наличии тепло- и массообмена между влажным воздухом и водой уравнение для теплового потока может быть записано в виде:

$$q = \alpha(t - t_v) + j \cdot r,$$

где $j = \beta_p(\rho - \rho_v)$ – поток пара к поверхности конденсации путем конвективной диффузии, а ρ_v и ρ – парциальные плотности пара непосредственно у межфазной поверхности и вдали от нее, r – теплота парообразования.

Коэффициент массоотдачи β_p отнесен к разности концентраций (плотностей) диффундирующего вещества. При конденсации пара выделяется теплота rj . Коэффициенты конвективной теплоотдачи и массоотдачи могут быть определены по известным критериальным уравнениям. Если критериальные уравнения теплообмена экспериментально получены для большого количества поверхностей теплообмена, то в области исследования массообмена экспериментального материала меньше. Поэтому часто при расчете теплообменников для влажного воздуха (например, в кондиционировании, сушильной и холодильной технике) вводят ряд упрощающих предположений, позволяющих рассчитывать аппарат без вычисления коэффициента массообмена.

Широкое применение нашел метод, основанный на использовании соотношения Льюиса и уравнения Меркеля. Соотношение Льюиса вытекает из условия подобия между процессами массообмена и теплообмена. Его обычно представляют в виде:

$$\frac{\alpha}{\beta_d} = c_p.$$

Соотношение Льюиса справедливо лишь тогда, когда имеет место аналогия между теплообменом и массообменом, т. е. когда можно

пренебречь влиянием поперечного потока массы и Стефановского потока на поля скоростей, температур и парциальных давлений. В случае, когда содержание пара в смеси невелико (например, для влажного воздуха), используя соотношение Льюиса, Меркель получил выражения для переноса теплоты при тепломассообмене, где в качестве движущей силы используется энтальпийный потенциал.

Рассмотрим, например, стационарный процесс конденсации влаги из парогазовой смеси на поверхности стенки, смоченной жидкостью. Масса жидкости, сконденсировавшейся на элементарной площадке поверхности раздела фаз за единицу времени равна

$$dG_B = \beta_p (\rho - \rho_B) dF = j d.$$

Если в качестве движущей силы в вышеприведенном уравнении взять разность влагосодержаний воздуха, то уравнение примет вид

$$dG_B = \beta_d (d - d_B) dF.$$

Количество теплоты, переданной стенке при конденсации пара

$$dQ_{ст} = dG_B r = \beta_d (d - d_B) r dF.$$

Количество теплоты, переданной стенке чисто конвективным путём

$$dQ_я = \alpha (t - t_B) dF.$$

Тогда общее количество теплоты, переданной стенке, составит

$$dQ_{п} = dQ_я + dQ_{ст} = (\alpha (t - t_B) + \beta_d (d - d_B) r) dF.$$

Первую составляющую теплового потока $Q_я$ часто называют явной теплотой, а $Q_{ст}$ – скрытой; $Q_{п}$ обычно называют полной теплотой.

Используя соотношения Льюиса и пренебрегая физической теплотой влаги по сравнению с теплотой фазового перехода в выражении для энтальпии влажного пара, можно написать

$$dQ_я = \beta_d (H - H_B) dF.$$

Интегрируя это выражение по всей поверхности теплообменника, для случая постоянной температуры стенки получаем

$$Q_{\text{п}} = \beta_{\text{д}} \Delta H_{\text{ср}} F,$$

где

$$\Delta H_{\text{ср}} = \frac{\Delta H_{\text{б}} - \Delta H_{\text{м}}}{\ln \left(\frac{\Delta H_{\text{б}}}{\Delta H_{\text{м}}} \right)},$$

$$\Delta H_{\text{б}} = H' - H_{\text{в}},$$

$$\Delta H_{\text{м}} = H'' - H_{\text{в}}.$$

Соотношения Льюиса и уравнение Меркеля справедливы при относительно низких температурах, которые имеют, например, место в системах кондиционирования воздуха и холодильной технике. При температурах воды 25°C и выше нельзя пренебрегать физической теплотой воды, вносимой ею в воздух; в этом случае погрешность расчета может составлять более 10%.

2. Экспериментальная часть

Цель работы: практическое ознакомление с процессом испарительного охлаждения жидкости в насадочной колонне. Расчет материального и теплового балансов процесса. Построение процесса на диаграмме влажного воздуха. Определение коэффициента массоотдачи и эффективного коэффициента теплоотдачи.

2.1. Описание лабораторной установки

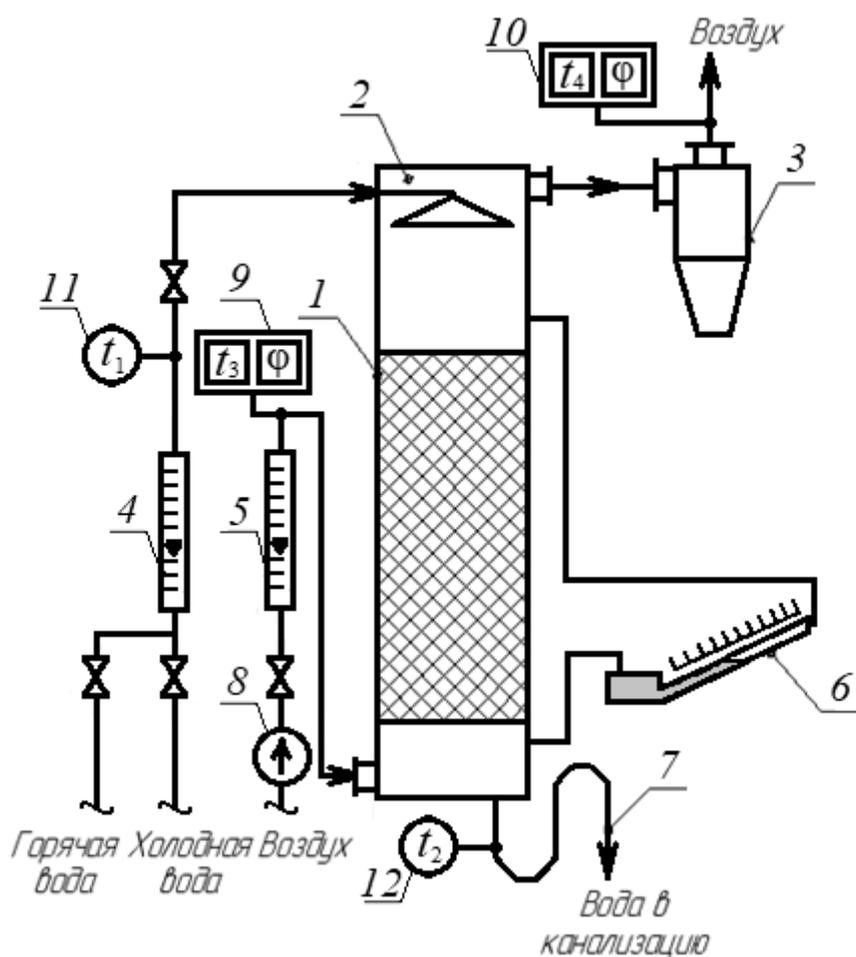


Рис. 17. Схема лабораторной установки:

- 1 – колонна с насадкой; 2 – ороситель; 3 – циклон для брызгоулавливания;
- 4, 5 – ротаметры; 6 – дифференциальный манометр; 7 – гидрозатвор;
- 8 – компрессор; 9, 10 – термогигрометры; 11, 12 – измерители температур

Изображенная на рис. 17 экспериментальная установка состоит из вертикальной цилиндрической колонны 1 диаметром 58 мм, снабженной

решеткой, на которой расположен слой насадки высотой 0,65 м из беспорядочно уложенных виниловых колец Рашига. Орошающая вода подается в аппарат через ротаметр 4 и распределительное устройство 2, расход воды регулируется вентилем. Отработанная вода из кубовой части колонны и гидрозатвор 7 удаляется в канализацию. Воздух из ресивера компрессора через регулировочный кран и ротаметр 5 поступает под распределительную решетку колонны 1, после чего, последовательно пройдя через слой насадки, и циклон-аппарат 3, выбрасывается в атмосферу. Перепад давления на слое насадки измеряется дифференциальным микроманометром 6. Для определения температуры воды на входе и выходе из аппарата установлены две термопары 11, 12. Измерение параметров воздуха, поступающего в колонну на входе и выходе из аппарата, осуществляется с помощью цифровых термогигрометров ТГЦ-1У 9,10.

Параметры насадки:

Тип насадки – пластмассовые цилиндры (кольца Рашига);

Высота $H=13$ мм;

Внутренний диаметр $d=8$ мм;

Наружный диаметр $D=13$ мм;

Количество колец $n=575$ штук;

Удельная поверхность насадки $\sigma = 451,9$ м²/м³;

Свободный объем насадки $V_{св}=0,641$ м³/м³;

Площадь поверхности всех колец $S_{п}=0,7757325$ м².

Параметры колонны:

Диаметр $D_{к}=0,058$ м;

Высота $H_{к}=0,65$ м.

2.2. Порядок проведения эксперимента

Перед включением установки в работу необходимо визуально убедиться в её исправности. С помощью клавишного переключателя

включить измерительные приборы, установленные на стенде. Для включения термогигрометра дополнительно нажать клавишу на панели прибора. Краном открыть линию сжатого воздуха и по ротаметру 5 установить его расход. По калибровочному графику определяют величину расхода, м³/с. Подвижную шкалу дифманометра 6 устанавливают так, чтобы её нулевая отметка совпадала с концом столбика воды в наклонной трубке при отключенной подаче воздуха.

При помощи вентиля на линиях горячей и холодной воды по ротаметру 4 устанавливают заданный расход и температуру воды. Величину расхода воды определяют по калибровочному графику. Затем с помощью приборов, установленных на стенде, измеряют начальную и конечную температуру воды, а также параметры воздуха (температура и относительная влажность) на входе и выходе из аппарата. Необходимо обратить внимание на установление режима работы скруббера. Запись показаний приборов следует проводить только после того, как в нем установится стационарный гидродинамический и тепловой режим работы. Полученные результаты сводятся в таблицу опытных данных.

2.3. Порядок обработки экспериментальных данных

Таблица 1

Экспериментальные данные

№ п/п	Объемный расход воды		Объемный расход воздуха		Температура воздуха, °С		Температура воды, °С		Относительная влажность воздуха, %	
	Деления ротаметра	$G_{\text{вод}} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	Деления ротаметра	$G_{\text{воз}} \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	Начальная $t_{\text{воз.н}}$	Конечная $t_{\text{в.к}}$	Начальная $t_{\text{вод.н}}$	Конечная $t_{\text{в.к}}$	Начальная $\varphi_{\text{н}}$	Конечная $\varphi_{\text{к}}$

Алгоритм расчета

1. Плотность воздуха, кг/м³:

$$\rho_{\text{воз}} = 1,29 \cdot \left(\frac{T_0}{T_0 + t_{\text{воз.н}}} \right),$$

где $T_0 = 273$ °К; $t_{\text{воз.н}}$ – начальная температура воздуха, °С.

2. Массовый расход влажного воздуха, кг/с:

$$L_{\text{вл.воз}} = G_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}},$$

где $G_{\text{воз}}$ – объемный расход воздуха, м³/с.

3. Массовый расход абсолютно сухого воздуха, кг/с:

$$L_{\text{а.с.воз}} = L_{\text{вл.воз}} \cdot (1 - x_{\text{н}}),$$

где $x_{\text{н}}$ – влагосодержание воздуха на входе в аппарат.

4. Количество испаренной воды, кг/с:

$$G_{\text{исп}} = L_{\text{а.с.воз}} \cdot (x_{\text{к}} - x_{\text{н}}),$$

где $x_{\text{к}}$ – влагосодержание воздуха на выходе из аппарата.

5. Количество теплоты, полученное воздухом (приход теплоты), Вт:

$$Q_{\text{прих}} = L_{\text{а.с.воз}} \cdot c_{\text{воз}} \cdot (t_{\text{воз.к}} - t_{\text{воз.н}}) + G_{\text{исп}} \cdot r^*,$$

где $c_{\text{воз}}$ – теплоемкость воздуха Дж/(кг·°С); r^* – теплота парообразования воды, Дж/кг; $t_{\text{воз.н}}$, $t_{\text{воз.к}}$ – начальная и конечная температура воздуха, °С.

6. Массовый расход воды, кг/с:

$$L_{\text{вод}} = G_{\text{вод}} \cdot \rho_{\text{вод}},$$

где $G_{\text{вод}}$ – объемный расход воды, м³/с; $\rho_{\text{вод}} = 1000$ кг/м³ – плотность воды.

7. Количество теплоты, отданное водой (расход теплоты), Вт:

$$Q_{\text{расх}} = L_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}} \cdot (t_{\text{вод.н}} - t_{\text{вод.к}}),$$

где $c_{\text{вод}}$ – теплоемкость воды Дж/кг·°С, $t_{\text{вод.н}}$, $t_{\text{вод.к}}$ – начальная и конечная температура воды, °С.

8. Потери теплоты, Вт:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{расх}} - Q_{\text{прих}}.$$

9. Используя диаграмму Рамзина (приложение 1) и данные о температуре воздуха и его относительной влажности, необходимо найти влагосодержание воздуха.

10. Движущая сила при входе в аппарат:

$$\Delta x_{\text{дв.с.н}} = (x_{\text{нас}} - x_{\text{н}}),$$

где $x_{\text{нас}}$ – максимальное влагосодержание воздуха при данной температуре и давлении (насыщенный воздух), кг/кг; $x_{\text{н}}$ – влагосодержание на входе в аппарат, кг/кг.

11. Движущая сила при выходе из аппарата:

$$\Delta x_{\text{дв.с.к}} = (x_{\text{нас.1}} - x_{\text{к.1}}),$$

где $x_{\text{к}}$ – влагосодержание на выходе из аппарата, кг/кг.

12. Среднее значение движущей силы:

$$\Delta x_{\text{дв.с.ср}} = \frac{(\Delta x_{\text{нач}} - \Delta x_{\text{кон}})}{\ln \left(\frac{\Delta x_{\text{нач}}}{\Delta x_{\text{кон}}} \right)}.$$

13. Объем, занимаемый насадкой, м³:

$$V_{\text{нас}} = 0,785 \cdot d_{\text{к}}^2 \cdot H_{\text{нас}},$$

где $d_{\text{к}}$ – диаметр колонны, м; $H_{\text{нас}}$ – высота слоя насадки, м.

14. Поверхность испарения, м²:

$$F_{\text{исп}} = F_{\text{нас}} = V_{\text{нас}} \cdot \sigma,$$

где $F_{\text{нас}}$ – площадь поверхности насадки, м²; σ – удельная поверхность насадки, м²/м³.

15. Коэффициент массоотдачи, м/с:

$$\beta = \frac{G_{\text{исп}}}{F_{\text{исп}} \cdot \Delta x_{\text{дв.с.ср}} \cdot \rho_{\text{воз}}}.$$

16. Разница между температурой воды на выходе и температурой газа на входе, °С:

$$\Delta t_{\text{в}} = t_{\text{вод.к}} - t_{\text{воз.н}}$$

17. Разница между температурой воды на входе и температурой газа на выходе, °С:

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{вод.н}} - t_{\text{воз.к}}$$

18. Средняя разность температур между теплоносителями, °С:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{в}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)}$$

19. Эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град):

$$\alpha_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{прих}}}{F_{\text{исп}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}}$$

20. Результаты расчета сводят в таблицу 2. Делают выводы по работе.

Таблица 2

Результаты расчета

№ п/п	Количество испарившейся воды $G_{\text{исп}} \cdot 10^5$, кг/с	Количество теплоты полученной воздухом $Q_{\text{прих}}$, Вт	Количество теплоты отданное водой $Q_{\text{расх}}$, Вт	Потери теплоты $Q_{\text{пот}}$, Вт	Средняя разность температур между теплоносителями, $\Delta t_{\text{ср}}$, °С	Коэффициент массоотдачи, м/с	Эффективный коэффициент теплоотдачи, $\alpha_{\text{э}}$, Вт/м ² ·град

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бакластов, А.М. Промышленные теплообменные процессы и установки: учебник для вузов/ А.М. Бакластов, В. А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.; под ред. А. М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.: ил.
2. Романков, П. Г. Теплообменные процессы химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов. - Л.:, 1982 – 288 с., ил.
3. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник для вузов: в 2 кн. / под общ. ред. В.Г. Айнштейна.- М. : Химия, 1999. - 869 с.
4. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Кн.2. / Н.И. Гельперин.- М.: Химия, 1981. - 811 с.
5. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А.Г. Касаткин.-10-е изд., стереотип., дораб.-М.: ООТИД “Альянс”, 2004.-753 с.
6. Таубман, Е.И. Контактные теплообменники / Е.И. Таубман и др.-М.: Химия, 1987. - 256 с.

Приложения

Приложение 1

Диаграмма свойств влажного воздуха Рамзина.

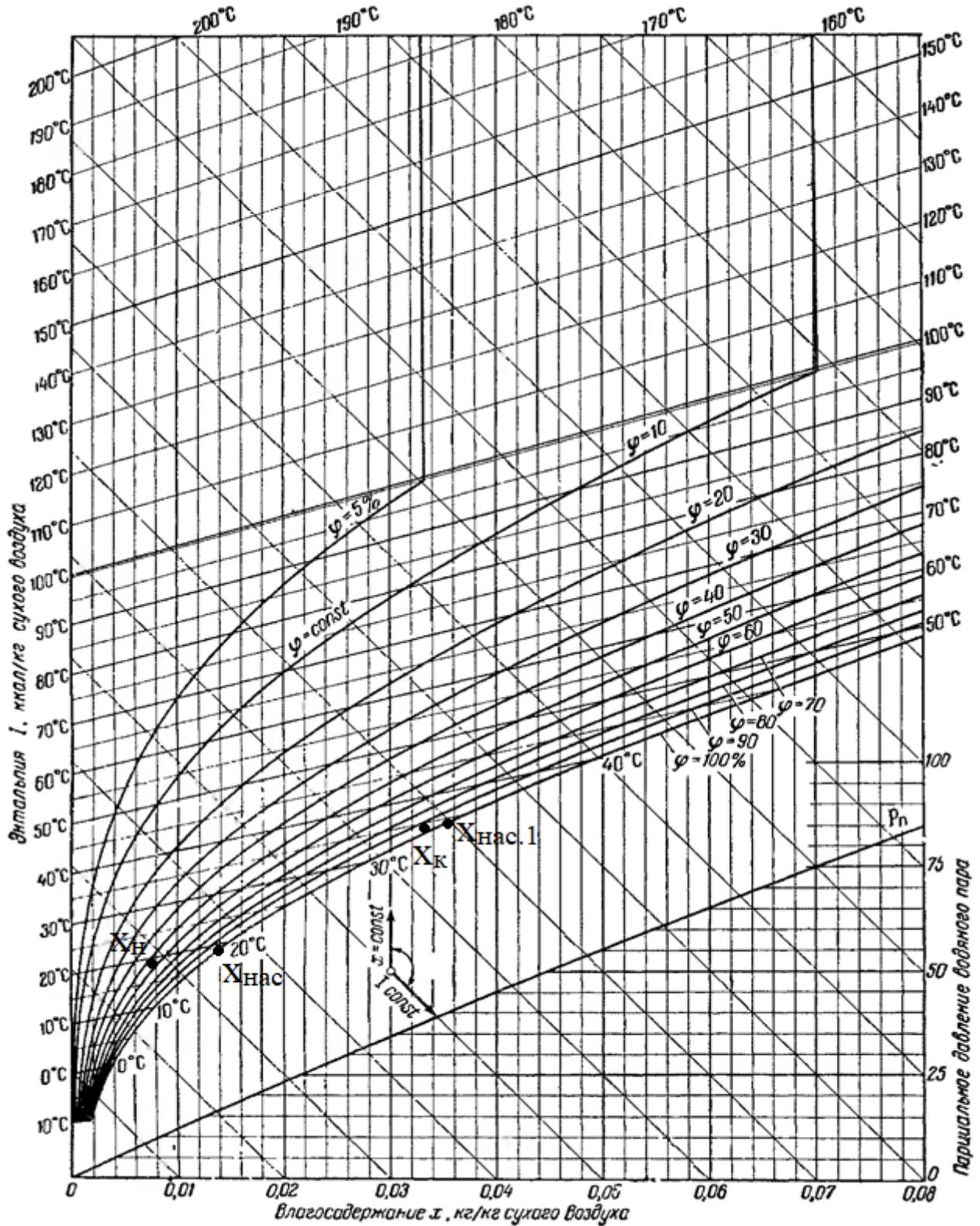


Таблица 1

Физические свойства сухого воздуха
($P_0=760$ мм рт. ст. = $1,013 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688

Таблица 2

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$	Pr
0	1,013	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	0,70	9,52
20	1,013	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,82	7,02
30	1,013	995,7	4,174	61,3	14,9	801,5	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	64,3	15,7	549,4	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	65,9	16,0	469,9	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	6,32	2,21
90	1,013	966,3	4,208	68,0	16,8	314,9	6,95	1,95
100	1,013	958,4	4,220	68,3	16,9	282,5	7,52	1,75

Составители:

Липин Александр Геннадьевич

Небукин Владимир Олегович

Липин Андрей Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРИТЕЛЬНОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ

Методические указания

Редактор В.Л. Родичева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7