

Ю. А. СУВОРОВА, А. В. КОЗАЧЕК, С. С. НИКУЛИН

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Ю. А. СУВорова, А. В. КОзачек, С. С. НИКулин

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Утверждено Ученым советом университета в качестве практикума
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 05.03.06
«Экология и природопользование», 20.03.01 «Техносферная безопасность»,
магистрантов 05.04.06 «Экология и природопользование»,
20.04.01 «Техносферная безопасность»

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023

УДК 620.92
ББК 31.6
С89

Рецензенты:

Кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой биологии
и биотехнологии ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина»

Е. В. Малышева

Кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры «Химия и химические технологии» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

А. Ю. Осетров

Суворова, Ю. А.

С89 Энерго- и ресурсосберегающие экологические технологии [Электронный ресурс] : практикум / Ю. А. Суворова, А. В. Козачек, С. С. Никулин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 5,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2727-6

Представлены основные подходы при расчете технологических решений в области энергосбережения, а также методики расчета автономных систем обеспечения энергией с использованием альтернативных источников энергии. Дан теоретический материал, необходимый для более глубокого усвоения соответствующих разделов дисциплин «Энергоресурсосберегающие экологические технологии», «Энергоресурсосберегающие экологические технологии и альтернативные экологические источники энергии». Теоретический материал подкреплён примерами расчета и заданиями для самостоятельного выполнения учащимися.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 05.03.06 «Экология и природопользование», 20.03.01 «Техносферная безопасность», по направлениям подготовки магистрантов 05.04.06 «Экология и природопользование», 20.04.01 «Техносферная безопасность».

УДК 620.92
ББК 31.6

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2727-6

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

ВВЕДЕНИЕ

В условиях возрастающих темпов промышленного производства и урбанизации территорий одной из актуальных проблем, стоящих перед человечеством, являются рационализация использования энергоресурсов, энерго- и ресурсосбережение и внедрение технологий альтернативной энергетики в хозяйственную деятельность.

Использование альтернативных источников энергии – одна из наиболее перспективных отраслей современности. Наша страна обладает определенным потенциалом, связанным с географическим расположением и особенностями климата, для развития и активного внедрения солнечной и ветроэнергетики. Перспективными для развития солнечной энергетики являются юго-западные регионы: Астраханская и Волгоградская область, Калмыкия, Ставропольский край, на территории которых интенсивность солнечного излучения достаточна для выработки электроэнергии. Наиболее подходящие территории для развития ветроэнергетики являются Северо-Запад, Южный, Сибирский, Уральский, Дальневосточный федеральные округа, Сахалин и Камчатка.

Активное развитие сельского хозяйства, деревоперерабатывающей отрасли промышленности приводит к необходимости разрабатывать и внедрять современные технологии утилизации образующихся отходов, которые могут быть переработаны в ценный источник энергии – биогаз. Кроме того, отходы водоочистки также могут быть переработаны в биогаз. По имеющимся сведениям, в настоящее время Россия использует только 12% своего биоэнергетического потенциала.

Анализ опыта различных стран в решении проблемы энергосбережения показывает, что одним из наиболее эффективных путей ее решения является сокращение потерь тепла через ограждающие конструкции промышленного оборудования, тепловых сетей. В этой связи необходимо знать и уметь грамотно подбирать и рассчитывать теплоизоляционные конструкции.

Одной из важных проблем энергосбережения при эксплуатации теплоэнергетического оборудования является снижение тепловой производительности из-за накопления отложений, в результате чего возрастают потери тепловой энергии.

Вышеперечисленным проблемам и путям их решения посвящен практикум.

Современный специалист – эколог должен обосновывать и рекомендовать к применению в организации энергосберегающие технологии, рассчитывать автономные системы обеспечения энергией с использованием альтернативных источников энергии.

ЧАСТЬ 1. ТЕХНОЛОГИИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

1. РАСЧЕТ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

1.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

Мощность воздушного потока зависит от скорости и направления движения, продолжительности ветреной погоды, характера изменения скорости ветра во времени, площади сечения движущихся струй воздуха. На эти характеристики влияют метеоусловия, рельеф местности, период суток и года. Все это делает мощность потока непредсказуемым, и заранее определить скорость и направление ветра не представляется возможным. Тем не менее среднестатистические характеристики для отдельных территорий и каждого периода времени остаются стабильными, что позволяет оценивать ветроэнергетические ресурсы и принимать обоснованные решения для выбора места для возведения ветроэнергетической установки и ее оптимальной мощности.

Основными характеристиками ветра являются его направление и средняя скорость за определенный период времени.

За направление ветра принимается та часть горизонта, откуда дует ветер. Направление ветра определяется с помощью флюгера и измеряется в румбах по сторонам света или в градусах, начиная с севера по часовой стрелке. Для анализа повторяемости различного направления ветра применяют взятый за определенный промежуток времени график, называемый розой ветров. Скорость ветра измеряется в метрах в секунду (м/с) с помощью анемометра.

Энергетические характеристики ветра для конкретного региона отражаются в ветроэнергетическом кадастре. Энергетическими характеристиками

ветра являются валовой, техникой и экономический ресурсы или потенциалы ветра.

Для использования энергии ветра применяются специальные ветродвигатели, которые включаются в состав ветроэнергетических агрегатов или ветроэнергетических установок. Ветродвигатель преобразует энергию ветра в механическую работу. Совокупность ветродвигателя и машины, преобразующей энергию, представляет собой ветроэнергетическую установку (ВЭУ). Она включает в себя ряд специальных устройств, призванных обеспечить ее бесперебойную работу в период безветрия или изменения силы и направления ветра. Это аккумулятор энергии, система автоматической ориентации ветродвигателя и т.п.

Использование ветроэнергетических установок считается экономически выгодным и оправданным при среднегодовой скорости ветра $V \geq 5$ м/с. Районы со среднегодовой скоростью более 6 м/с являются благоприятными для строительства ветростанций.

Ветроэнергетическая установка преобразует кинетическую энергию ветра в удобную для практического использования механическую или электрическую энергию. Полученная энергия используется для бытовых или промышленных нужд.

Наибольшей эффективностью в настоящее время обладают горизонтальные пропеллерные ВЭУ. Однако необходимость ориентации горизонтальных пропеллерных ВЭУ на ветер требует наличия механизмов ориентации на ветер.

Ветер может иметь скорость, не соответствующую расчетному диапазону скоростей. При относительно низкой скорости ветра ветроагрегат совсем не станет работать. Если скорость ветра превышает номинальную рабочую скорость, то часть энергии ветра теряется. Ограничителем здесь является номинальная мощность электрогенератора. Слишком высокая скорость ветра может вывести из строя и разрушить ВЭУ, поэтому при большой скорости ветра ВЭУ останавливается в безопасном положении.

Для описания работы ветроколеса используются следующие его характеристики: ометаемая площадь; геометрическое заполнение; коэффициент мощности; коэффициент быстроходности.

Ометаемая площадь ветроколеса S – площадь, покрываемая его лопастями при вращении в плоскости, перпендикулярной направлению потока. Для горизонтально осевого ветроколеса

$$S = \frac{\pi D^2}{4},$$

где D – диаметр ветроколеса.

Геометрическое заполнение равно отношению площади проекции лопастей на перпендикулярную потоку плоскость к ометаемой площади.

При одинаковых лопастях четырехлопастное колесо имеет вдвое большее геометрическое заполнение, чем двухлопастное.

Ветроколеса ВЭУ с большим геометрическим заполнением вырабатывают большую мощность при небольшой скорости ветра. При увеличении скорости вращения колеса резко возрастают потери энергии. Такие ВЭУ часто используются в регионах с небольшими скоростями ветра для получения механической энергии.

Ветроколеса с малым заполнением вырабатывают максимальную мощность на больших оборотах. Они используются с электрогенераторами, которым требуется высокая частота вращения.

Коэффициент быстроходности Z равен отношению скорости конца лопасти V_r к скорости набегающего воздушного потока V_0 :

$$Z = \frac{V_r}{V_0} = \frac{R\omega}{V_0},$$

где ω – угловая скорость вращения ветроколеса радиусом R .

Скорость проходящего через ветроколесо потока падает от V_0 перед ветроколесом до V_2 после ветроколеса. Скорость воздушного потока в плоскости ветроколеса составляет

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2}.$$

Коэффициент торможения потока a находится по формулам

$$a = \frac{V_0 - V_1}{V_0} = \frac{V_0 - V_2}{2V_2}.$$

Тогда величина скорости воздушного потока в плоскости ветроколеса будет иметь вид

$$V_1 = \frac{1-a}{V_0}.$$

При взаимодействии воздушного потока с лопастями часть энергии передается ветроколесу. Кинетическая энергия воздушного потока не может полностью превратиться в механическую энергию ветроколеса, поскольку воздушный поток не останавливается, а движется за ветроколесом с меньшей скоростью.

Часть мощности набегающего потока, передаваемая ветроколесу, равна

$$C_p = 4a(1-a^2).$$

Мощность ветроколеса меньше мощности потока воздуха, и их различие характеризуется коэффициентом мощности C_p . Для идеального ветроколеса максимальное значение коэффициента мощности составляет $C_p = 0,59$. Остальная энергия тратится на движение воздуха сквозь ветродвигатель и другие потери. У реальных ветроэнергетических установок C_p не превышает $0,40 \dots 0,55$. Колебания скорости ветра также могут снижать количество вырабатываемой электрической энергии. Мощность ветроэнергетической установки с ростом скорости ветра сначала резко увеличивается, а затем наступает стабилизация. Максимальная мощность ограничивается характеристиками электрогенератора.

Удельная кинетическая энергия воздушного потока с поперечным сечением в 1 м^2 , движущегося со скоростью V , определяется выражением

$$E_k = \frac{mV_0^2}{2}.$$

Масса воздуха, протекающая через поперечное сечение F со скоростью V , равна

$$m = \rho S V_0 ,$$

где ρ – плотность воздуха.

Подставив эту формулу в выражение кинетической энергии, получим мощность потока, проходящего через ветроколесо:

$$P_0 = \frac{\rho S V_0^3}{2}.$$

При скорости ветра V_0 и плотности воздуха ρ ветроколесо с ометаемой площадью S развивает мощность, пропорциональную кубу скорости ветра:

$$P = \frac{C_p \rho S V_0^3}{2}.$$

В ветроэнергетических установках большой мощности для увеличения площади используемого ветрового потока S применяются ветроколеса с большой длиной лопастей. Диаметр ветроколес мощных ветроэлектростанций может быть более 100 м.

В горизонтально-осевых ветроэнергетических установках сила, действующая по оси ветроколеса, называется лобовым давлением и определяется по формуле

$$F_{\max} = \frac{\rho S_1 V_0^2}{2}.$$

Максимальный крутящий момент ветроколеса T_{\max} не может превышать произведения максимальной действующей на ветроколесо силы F_{\max} на радиус R :

$$T_{\max} = F_{\max} R = \frac{\rho S_1 V_0^2 R}{2}.$$

1.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Ветроэнергетическая установка имеет постоянный коэффициент быстроходности $Z = 5$. Концы лопастей ветроколеса движутся со скоростью звука $c = 340$ м/с. Чему равна скорость ветра?

Решение.

Воспользуемся формулой

$$c = ZV_0,$$

где c – скорость звука; V_0 – скорость ветра; Z – быстроходность.

Получаем

$$V_0 = \frac{c}{Z} = \frac{340}{5} = 68 \text{ м/с.}$$

Задача 2. Найти коэффициент быстроходности Z для двухлопастного, шестилопастного и десятилопастного ветроколеса.

Решение.

Оптимальная быстроходность ветроколеса определяется по формуле

$$Z_0 = \frac{4\pi}{n},$$

где n – количество лопастей.

Получаем:

$$Z_0 = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{2} = 6,28;$$

$$Z_0 = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{6} = 2,09 \approx 2;$$

$$Z_0 = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{10} = 1,26.$$

Задача 3. Вычислить скорость ветра на высоте $h_2 = 40$ м, если на высоте $h_1 = 10$ м скорость ветра составляет $V_0 = 5$ м/с.

Решение.

Скорость ветра на высоте h_2 определяется соотношением

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{0,2}.$$

Здесь $V_1 = 5$ м/с, $h_2 = 40$ м, $h_1 = 10$ м.

Подставив в соотношение числовые данные, получим скорость ветра:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{0,2} = 5 \left(\frac{40}{10} \right)^{0,2} = 6,6 \text{ м/с.}$$

Задача 4. Вычислить диаметр ветроколеса для ветроэнергетической установки мощностью $P = 600$ кВт, если плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³, скорость ветра $V_0 = 12$ м/с и мощность потока $C_p = 0,5$.

Решение.

Расчетная мощность ветроэнергетической установки определяется формулой

$$P = \frac{C_p \rho S V_0^3}{2}.$$

Из нее получаем

$$S = \frac{P \cdot 2}{C_p \rho V_0^3} = \frac{60\,000 \cdot 2}{0,5 \cdot 1,2 \cdot S \cdot 12^3} = 115,7 \text{ м}^2.$$

Используя выражение

$$S = \frac{\pi D^2}{4},$$

получаем

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 115,7}{3,14}} = 12,14 \text{ м.}$$

1.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Скорость проходящего через ветроколесо воздушного потока падает от $V_0 = 10$ м/с перед ветроколесом до $V_2 = 6$ м/с после ветроколеса. Определить коэффициент торможения потока a и скорость ветра V_1 в плоскости ветроколеса.

2. Скорость воздушного потока перед ветроколесом $V_0 = 8$ м/с. Радиус ветроколеса $R = 16$ м. Плотность воздуха $\rho = 1,1$ кг/м³. Определить мощность ветрового потока P_0 .

3. Скорость воздушного потока перед ветроколесом $V_0 = 5$ м/с, после колеса $V_2 = 4$ м/с. Плотность воздуха $\rho = 1,15$ кг/м³. Радиус ветроколеса $R = 15$ м. Определить мощность ветроустановки P .

4. Через ометаемое сечение $S = 200$ м² протекает воздушный поток со скоростью $V_1 = 14$ м/с. Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³. Определить кинетическую энергию воздушного потока E_k .

5. Ветер со скоростью $V_0 = 6$ м/с давит на ветроколесо стационарной ветроустановки сечением $S = 300$ м². Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³. Определить мощность ветроустановки P .

6. Ветроустановка мощностью $P = 100$ кВт работает при скорости ветра $V_0 = 7$ м/с, давящего на площадь колеса сечением $S = 600$ м², плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³. Определить диаметр ветроколеса D и скорость ветра в плоскости ветроколеса V_1 .

7. Скорость ветра перед ветроколесом $V_0 = 8$ м/с. Плотность воздуха $\rho = 1,25$ кг/м³. Площадь, ометаемая ветроколесом, $S = 20$ м². Коэффициент мощности $C_p = 0,5$. Найти мощность P , развиваемую ветроколесом.

8. Организации требуется ветроустановка, вырабатывающая мощность $P = 10$ кВт. Средняя скорость ветра составляет $V_0 = 10$ м/с. Коэффициент мощности ветроколеса $C_p = 0,45$. Найти диаметр D ветроколеса.

9. Мощность потока воздуха, проходящего через ветроколесо, $P_0 = 600$ Вт. Ветроколесо развивает мощность $P = 200$ Вт. Определить коэффициент торможения потока a .

10. Мощность потока воздуха, проходящего через ветроколесо, $P_0 = 800$ Вт. Мощность, передаваемая ветроколесу, $P = 350$ Вт. Определить коэффициент мощности C_p .

11. Ветроколесо имеет следующие характеристики: быстроходность $Z_0 = 4$, частота вращения $\nu = 6$ Гц. Скорость потока воздуха $V_0 = 10$ м/с. Найти диаметр D ветроколеса.

12. Ветровая электростанция развивает мощность $P = 5$ МВт. Скорость ветра $V_0 = 7$ м/с. Площадь, занимаемая одним ветряком, $S_0 = 40$ м². Радиус ветроколеса $R = 3$ м. Коэффициент быстроходности $C_p = 0,45$. Определить площадь, занимаемую электростанцией.

13. Скорость воздушного потока перед ветроколесом $V_0 = 10$ м/с. Угловая скорость вращения двенадцатилопастного ветроколеса $\omega = 2$ рад/с. Определить диаметр D ветроколеса.

14. На электростанции установлено 16 ветроустановок. Каждое ветроколесо ометает площадь $S = 6$ м². Коэффициент мощности ветроколес $C_p = 0,4$. Средняя скорость ветра $V_0 = 10$ м/с. Определить мощность P электростанции.

15. Ветроколесо имеет 3 лопасти длиной $R = 2$ м. Определить скорость ветра V_0 , при которой ветроколесо работает в оптимальном режиме при угловой частоте вращения $\nu = 60$ Гц.

16. Скорость воздушного потока перед ветроколесом $V_0 = 15$ м/с. Угловая скорость вращения четырехлопастного ветроколеса $\omega = 6$ рад/с. Определить радиус R ветроколеса.

17. Максимальная лобовое давление $F_{\max} = 400$ Н действует на ветроколесо радиусом $R = 2,5$ м. Плотность воздуха $\rho = 1,18$ кг/м³. Найти скорость V_0 набегающего потока.

18. Воздушный поток плотностью $\rho = 1,25$ кг/м³ со скоростью $V_0 = 10$ м/с проходит через ветроколесо радиусом $R = 4$ м. Найти максимальный крутящий момент T_{\max} .

19. Воздушный поток плотностью $\rho = 1,2$ кг/м³ со скоростью $V_0 = 8$ м/с проходит через ветроколесо с ометаемой площадью $S = 9$ м². Найти максимальный крутящий момент ветроколеса T_{\max} .

20. Воздушный поток плотностью $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ со скоростью $V_0 = 15 \text{ м/с}$ проходит через ветроколесо радиусом $R = 3 \text{ м}$. Найти максимальный крутящий момент ветроколеса T_{\max} .

21. Воздушный поток плотностью $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ со скоростью $V_0 = 12 \text{ м/с}$ проходит через ветроколесо радиусом $R = 5 \text{ м}$. Найти максимальную силу лобового давления F_{\max} , действующего на ветроколесо.

22. Ветроколесо имеет параметры: ометаемая площадь $S = 12 \text{ м}^2$, угловая скорость $\omega = 6 \text{ рад/с}$, максимальный крутящий момент $T_{\max} = 800 \text{ Н}$. Скорость набегающего потока воздуха $V_0 = 18 \text{ м/с}$. Плотность воздуха $\rho = 1,12 \text{ кг/м}^3$. Определить коэффициент быстроходности ветроколеса Z .

23. Ветроэнергетическая установка имеет ветроколесо с параметрами: коэффициент быстроходности $Z = 0,4$, период полного оборота $t = 0,4 \text{ с}$, радиус $R = 6 \text{ м}$. Определить скорость набегающего воздушного потока V_0 .

24. Ветроэнергетическая установка имеет ветроколесо диаметром 60 м . Скорость конца лопасти $V = 300 \text{ м/с}$. Определить угловую скорость вращения ω ветроколеса.

25. Ветроэнергетическая установка имеет ветроколесо радиусом $R = 8 \text{ м}$. Коэффициент быстроходности $Z = 8$, угловая скорость вращения ветроколеса $\omega = 13 \text{ рад/с}$. Определить скорость V_0 набегающего на ветроколесо потока.

26. Ветроэнергетическая установка имеет ветроколесо радиусом $R = 10 \text{ м}$. Угловая скорость вращения ветроколеса $\omega = 6 \text{ рад/с}$. Скорость воздушного потока $V_0 = 22 \text{ м/с}$. Определить коэффициент быстроходности ветроколеса Z .

27. На ветроколесо набегают ветровой поток мощностью $P_0 = 5000 \text{ Вт}$. Коэффициент торможения потока воздуха $a = 0,2$. Плотность воздуха $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$. Определить мощность P , передаваемую ветроколесу.

28. Вырабатываемая ветроэнергетической установкой мощность $P = 15\,000 \text{ Вт}$. Коэффициент торможения потока воздуха равен $a = 0,3$. Плотность воздуха $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$. Определить мощность P_0 ветрового потока.

29. Скорость воздушного потока, набегающего на ветроколесо, $V_0 = 12$ м/с. Концы лопастей ветроколеса движутся со скоростью $V_r = 40$ м/с. Плотность воздуха $\rho = 1,1$ кг/м³. Найти максимальное значение крутящего момента T_{\max} .

30. Скорость набегающего на ветроколесо потока $V_0 = 14$ м/с. Радиус ветроколеса $R = 5$ м. Коэффициент быстроходности ветроколеса $Z = 2$. Найти угловую скорость вращения ω ветроколеса ветроэнергетической установки.

31. Ветроэнергетическая установка имеет коэффициент быстроходности $Z = 6$. Найти скорость ветра, при которой скорость концов лопастей достигнет скорости $V_r = 200$ м/с.

32. Концы лопастей ветроколеса диаметром $D = 20$ м имеют скорость $V_r = 150$ м/с. Определите угловую скорость вращения ω ветроколеса.

33. Диаметр ветроколеса ветроэнергетической установки $D = 6$ м. Сила лобового давления на ветроколесо $F_{\max} = 300$ Н. Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³. Определить скорость ветра V_0 .

34. Скорость ветра $V_0 = 12$ м/с, мощность ветроколеса $P = 800$ Вт, ометаемая площадь $S = 8$ м². Определить мощность набегающего потока воздуха P_0 .

35. Ветроэнергетическая установка работает при скорости ветрового потока $V_0 = 15$ м/с и выдает мощность $P = 8000$ Вт. Коэффициент мощности ветроколеса составляет $C_p = 0,42$. Определить диаметр D ветроколеса.

36. Ветроэнергетическая установка с диаметром ветроколеса $D = 3,8$ м развивает максимальную мощность $P = 3500$ Вт. Коэффициент мощности ветроколеса составляет $C_p = 0,4$. Определить мощность 1 м² площади поперечного сечения ветрового потока P_0 .

37. Начальная скорость набегающего воздушного потока $V_0 = 10$ м/с. Лобовое давление F_{\max} выросло с 500 до 600 Н. Как изменилась скорость ветра?

38. Как изменится максимальный крутящий момент T_{\max} ветроколеса, если диаметр ветроколеса увеличить в 2 раза?

39. Трехлопастное ветроколесо ветроэнергетической установки радиусом 2 м вращается при скорости воздушного потока $V_0 = 12$ м/с. Определить оптимальную частоту вращения ν ветроколеса.

40. Мощность ветроэнергетической установки $P = 4$ кВт, радиус ветроколеса $R = 2$ м. Лобовое давление на ветроколесо $F_{\max} = 400$ Н. Определить частоту вращения ν ветроколеса.

2. РАСЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

2.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

Солнце является основным источником энергии, обеспечивающим существование жизни на Земле. Поверхность Солнца имеет температуру примерно 6000 К. Солнечная энергия в виде электромагнитного излучения уходит в космическое пространство. Часть этого излучения достигает поверхности Земли.

Солнечное излучение характеризуется следующими величинами.

Поток излучения – энергия, переносимая электромагнитными волнами за одну секунду через произвольную область. Единица измерения потока излучения – Дж/с = Вт.

Плотность потока излучения (энергетическая освещенность) – отношение потока излучения к площади равномерно облучаемой этим потоком поверхности. Единица измерения – Вт/м². Плотность потока излучения от Солнца, падающего на перпендикулярную ему площадку вне земной атмосферы, называется солнечной константой S , которая равна 1367 Вт/м².

Часть солнечного излучения рассеивается атмосферой Земли. До поверхности Земли доходит поток солнечного излучения с плотностью не более 1000 Вт/м².

Световым потоком называется поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз. Человеческий глаз неодинаково чувствителен к потокам света с различными длинами волн. Обычно при дневном освещении человеческий глаз наиболее чувствителен к свету с длиной волны, равной 555 нм. Одинаковые по мощности потоки излучения, имеющие разные длины волн, вызывают разное световое ощущение у человека. С учетом восприятия светового потока человеческим глазом (яркости) единицей измерения светового потока является люмен (лм).

Освещенность – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности. Освещенность измеряется в люксах (лк). $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$. Для белого света $1 \text{ лк} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ ($1 \text{ Вт/м}^2 = 217 \text{ лк}$). Приборы, предназначенные для измерения освещенности, называются люксметрами.

Солнечная энергия имеет большой потенциал. Весьма заманчиво непосредственное использование солнечной энергии для нужд людей. Наиболее эффективными способами использования солнечной энергии являются освещение помещений с помощью «световых колодцев» и преобразование солнечной энергии в тепловую энергию. Самыми оптимальными способами использования солнечной энергии являются преобразование солнечной энергии непосредственно в электрическую энергию. Это возможно при использовании фотоэффекта.

Фотоэффект – физический процесс, происходящий при освещении материала светом, при котором происходит выход электронов из металлов (внешний фотоэффект); перемещение электрического заряда через границу раздела полупроводниковых материалов с разными типами проводимости (вентильный фотоэффект); изменение электрической проводимости (фотопроводимость).

При попадании света на границу раздела полупроводников различной проводимости (р–n) между полупроводниками возникает разность потенциалов (фотоЭДС). Этот процесс называется вентильным фотоэффектом. На использовании фотоэффекта основана работа фотоэлектрических преобразователей энергии (солнечных батарей). В настоящее время чаще всего для создания солнечных батарей применяется монокристаллический и поликристаллический кремний.

Солнечные батареи имеют коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую. Он представляет отношение падающего на поверхность солнечного элемента потока излучения к мощности вырабатываемой фотоэлементом электрической энергии.

Коэффициент преобразования кремниевых солнечных фотоэлементов доходит до 25%.

Существует несколько разновидностей кремниевых фотоэлементов.

Поликристаллические фотоэлементы более дешевые, но менее эффективные, так как кристаллы кремния расположены беспорядочно.

Монокристаллические фотоэлементы отличаются высоким КПД. Стоимость таких батарей выше. Однако они занимают меньшую площадь, так как имеют форму восьмиугольника.

Из аморфного кремния изготавливают гибкие фотоэлементы, но их КПД самый низкий и составляет 4...10%.

Преимуществом солнечных фотоэлементов является отсутствие движущихся частей, высокая надежность и стабильность работы. При этом у них большой срок службы. Солнечные батареи обладают малым весом, отличаются простотой обслуживания, могут использовать прямое и рассеянное солнечное излучение. Простота компоновки позволяет легко собрать установку любой мощности.

Для того, чтобы солнечная установка была надежным источником электроэнергии, необходимо подобрать дополнительные элементы системы: кабели, поворотную раму, инвертор, контроллер заряда, аккумуляторную батарею. Такая система называется солнечной фотоэлектрической системой, или солнечной электростанцией.

Солнечная батарея вырабатывает постоянный ток низкого напряжения, который с помощью инвертора преобразуется в напряжение, нужное для зарядки аккумуляторных батарей. Перераспределение энергии между солнечной батареей, аккумулятором и потребителем осуществляется контроллером.

В настоящее время промышленностью выпускаются специальные аккумуляторные батареи, разработанные именно для работы с солнечными батареями. В отличие от обычных свинцовых аккумуляторов, они имеют низкий показатель саморазряда, низкую чувствительность к зарядам и разрядам. Эффективность их работы и продолжительность службы заметно выше.

Солнечные батареи устанавливаются на земле или на крыше здания под оптимальным углом наклона с помощью металлической рамы. Существуют различные виды компоновки солнечных батарей. В некоторых вариантах инвертор может находиться на задней части солнечной батареи.

Солнечные фотоэлектрические системы, содержащие в своем составе аккумуляторы, должны иметь средства контроля заряда и разряда аккумуляторных батарей. Контроллеры заряда используются для правильного заряда аккумуляторных батарей, для защиты от перезаряда батареи (аккумуляторная батарея полностью заряжена, а солнечная панель продолжает вырабатывать электричество). Некоторые модели контроллеров имеют разъемы для подключения низковольтной нагрузки постоянного тока и имеют блок защиты аккумуляторов от глубокого разряда. Контроллеры заряда конструктивно могут быть встроены в инверторы или блоки бесперебойного питания.

Наилучшие характеристики дает солнечная установка при использовании устройств регулировки нагрузки по максимальной мощности. Их использование позволяет отдавать нагрузке до 95% максимальной выходной мощности при различных уровнях освещения солнечной батареи.

При нагревании солнечного элемента происходит снижение напряжения V холостого хода и повышение тока I короткого замыкания. Повышение температуры в итоге приводит к изменению вольтамперной характеристики и снижению максимальной мощности P . Эмпирические соотношения, описывающие влияние нагрева кремниевого элемента при облученности $G = 1 \text{ кВт/м}^2$, имеют вид:

$$V_{\text{xx}}(T) = V_{\text{xx}}(T_1)[1 - a(T - T_1)],$$

$$I_{\text{кз}}(T) = I_{\text{кз}}(T_1)[1 + b(T - T_1)],$$

$$P(T) = P(T_1)[1 - c(T - T_1)],$$

где $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ – исходная температура; T – рабочая температура солнечного элемента; $a = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $b = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $c = 4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ – температурные коэффициенты.

2.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Маленькая энергетическая система имеет кислотную аккумуляторную батарею номинальным напряжением $V = 12$ В, емкостью $E = 60$ А·ч. Потребитель электроэнергии включается на $t = 6$ ч в сутки, потребляемый ток $I = 3$ А. Световой поток, падающий на батарею, $G = 1$ кВт/м². Какой должна быть компоновка энергетической системы, чтобы заряжать аккумуляторную батарею?

Решение.

Напряжение полного заряда свинцового аккумулятора 14,4 В. Для полной зарядки аккумуляторной батареи солнечная батарея должна выдавать напряжение не менее $V = 16$ В. Запас по напряжению необходим для того, чтобы компенсировать потери. Плотность тока фотоэлемента $i = 0,02$ А/см².

Напряжение на одном кремниевом фотоэлементе при максимальной мощности составляет примерно $V_0 = 0,5 \dots 0,6$ В. Таким образом, чтобы обеспечить напряжение $V = 16$ В, необходимо соединить последовательно

$$n = \frac{V}{V_0} = \frac{16}{0,5} = 32 \text{ элемента.}$$

Так как каждый день потребляется

$$E_1 = It = 3 \cdot 6 = 18 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

электроэнергии, то при КПД зарядки аккумулятора $\eta = 0,8$ необходимо ежедневно

$$E_2 = \frac{E_1}{\eta} = \frac{18}{0,8} = 22,5 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

Пусть элементы освещены каждый день в течение $t = 5$ ч, тогда требуемый ток составляет

$$I = \frac{E_2}{t} = \frac{22,5}{5} = 4,5 \text{ А.}$$

Кислотные аккумуляторы могут заряжаться током, значение которого составляет не более 10...12% от номинальной емкости. По условиям задачи

этот ток составляет $6,0 \dots 6,5$ А. Зарядка аккумулятора током большего значения снижает срок службы аккумулятора.

При последовательном соединении солнечных элементов (СЭ) необходимый ток может быть получен с площади

$$S = \frac{I}{i} = \frac{4,5}{0,02} = 225 \text{ см}^2.$$

Таким образом, для зарядки аккумуляторной батареи в условиях заданной освещенности достаточно 32 последовательно соединенных фотоэлемента площадью не менее $S = 225 \text{ см}^2$ каждый.

2.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. 360 солнечных элементов мощностью $P = 1,5$ Вт каждый, соединены в солнечную батарею. Площадь солнечной батареи $S = 600 \text{ см}^2$. Плотность потока $G = 500 \text{ Вт/м}^2$. Найти КПД η солнечной батареи.

2. Площадь солнечной батареи $S = 0,6 \text{ м}^2$, плотность тока $i = 0,02 \text{ А/см}^2$, КПД $\eta = 18\%$. Плотность потока излучения $G = 800 \text{ Вт/м}^2$. Найти ЭДС V_0 солнечной батареи.

3. Небольшая домашняя осветительная система содержит аккумуляторную батарею напряжением $V = 12$ В. Освещение работает каждый день $t = 2$ ч, потребляемый ток составляет $I = 5,5$ А. Солнечная батарея состоит из кремниевых элементов с ЭДС $V_0 = 0,5$ В и током $I = 0,5$ А. Напряжение заряда аккумуляторной батареи $V \geq 15$ В. Потери энергии на заряд аккумуляторной батареи составляют 10% от емкости батареи. Подберите компоновку солнечной батареи и емкость аккумуляторной батареи.

4. На крыше ангара установлены солнечные батареи. Длина крыши $L = 20$ м, ширина $A = 6$ м, ЭДС солнечных элементов $V_0 = 0,5$ В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$. Определить выработку электроэнергии при времени освещения $t = 6$ ч.

5. Аккумуляторная батарея напряжением $V = 12$ В и КПД 80% ежедневно заряжается до $E = 40$ А·ч от солнечной батареи. ЭДС солнечных элементов $V_0 = 0,3$ В, время работы 5 ч. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻². Подберите компоновку и размеры солнечной батареи для зарядки аккумуляторной батареи.

6. Здание потребляет $E = 3$ кВт·ч энергии в сутки. Площадь солнечной батареи $S = 80$ м², $V_0 = 0,5$ В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А/см². Определить необходимое время освещения солнечной батареи в сутки.

7. Предприятие потребляет 1000 кВт·ч электроэнергии в сутки от СЭС. ЭДС солнечных элементов $V_0 = 0,5$ В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А/см². Какая площадь солнечной батареи необходима, если время освещения солнечной батареи составляет $t = 5$ ч в сутки?

8. Среднегодовая мощность светового потока $P = 0,8$ кВт на 1 м². Среднесуточное время освещения солнечных элементов $t = 4$ ч, площадь солнечных элементов $S = 50$ м². КПД СЭС $\eta = 8\%$. Какую энергию дает СЭС за год работы.

9. Уличная видеокамера работает на солнечной батарее, которая имеет параметры: $V = 5$ В, $I = 0,60$ А. Определить схему соединения солнечных элементов ($V_0 = 0,5$ В, $\gamma = 2 \cdot 10^{-2}$ А/см², $S = 18$ см²), которые содержатся в этой батарее. Найти площадь батареи.

10. Светильник дежурного освещения используется в течение $t = 8$ ч, $V = 12$ В, $P = 18$ Вт. Какую площадь должна иметь солнечная батарея при суточном освещении $t = 4$ ч, если площадь солнечных элементов $S = 240$ см², $V_0 = 0,5$ В, $\gamma = 2,5 \cdot 10^{-2}$ А/см²?

11. Светильник работает от аккумуляторной батареи напряжением $V = 12$ В, емкостью $E = 120$ А·ч, $\eta_{\text{акк}} = 80\%$. Светильник работает ежедневно $t = 5$ ч. Потребляемый ток $I = 4$ А. ЭДС солнечных элементов $V_0 = 0,5$ В, суточное время освещения солнечных элементов $t = 4$ ч. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А/см². Определить количество солнечных элементов и способ соединения их в батарею.

12. Солнечная батарея площадью $S = 10 \text{ м}^2$, напряжением $V = 12 \text{ В}$ состоит из солнечных элементов с характеристиками: $V_0 = 0,45 \text{ В}$, площадь $S_{\text{СЭ}} = 20 \text{ см}^2$. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Определить параметры солнечной батареи.

13. Солнечная батарея составлена из солнечных элементов площадью $S_{\text{СЭ}} = 16 \text{ см}^2$, ЭДС $V_0 = 0,6 \text{ В}$, плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$. Время освещения солнечных элементов $t = 6 \text{ ч}$. Напряжение аккумулятора $V = 18 \text{ В}$, КПД $\eta = 75\%$, емкость аккумулятора $E = 60 \text{ А} \cdot \text{ч}$. Определить количество солнечных элементов, необходимое для зарядки аккумулятора.

14. При $25 \text{ }^\circ\text{C}$ мощность солнечной батареи составляет 800 Вт , ЭДС равна $V = 32 \text{ В}$. Батарея составлена из солнечных элементов: $V_0 = 0,5 \text{ В}$, $S = 16 \text{ см}^2$. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$. Определить параметры солнечной батареи, если она эксплуатируется при $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

15. При $25 \text{ }^\circ\text{C}$ мощность солнечной батареи $P = 250 \text{ Вт}$, ЭДС $V = 40 \text{ В}$. Батарея составлена из солнечных элементов: $V_0 = 0,5 \text{ В}$, $S = 125 \text{ см}^2$. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$. Определить параметры батареи, если она эксплуатируется при $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

16. ЭДС солнечной батареи $V = 24 \text{ В}$. Батарея содержит $N = 60$ элементов, площадь каждого из солнечных элементов $S_{\text{СЭ}} = 160 \text{ см}^2$. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, $V_0 = 0,5 \text{ В}$. Найти мощность солнечной батареи и ее площадь.

17. Определить энергию, получаемую от солнечной батареи за сутки. Батарея составлена из $N = 600$ элементов, площадь каждого $S_{\text{СЭ}} = 16 \text{ см}^2$, $V_0 = 0,5 \text{ В}$. Плотность тока $i = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Суточное время освещения $t = 4 \text{ ч}$.

18. Солнечная батарея площадью $S = 2 \text{ м}^2$ составлена из элементов с ЭДС $0,5 \text{ В}$. Плотность тока $i = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Определить мощность солнечной батареи.

19. Солнечная батарея с ЭДС $V = 300 \text{ В}$. Мощность $P = 450 \text{ Вт}$. ЭДС солнечных элементов $V_0 = 0,45 \text{ В}$. Плотность тока $i = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Определить вид соединения и количество солнечных элементов в батарее.

20. Аккумуляторная батарея напряжением $V = 14$ В и КПД $\eta = 75\%$ каждый день заряжается до 60 А·ч от солнечной батареи в течение $t = 6$ ч. ЭДС солнечных элементов $V_0 = 0,5$ В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻². Определить параметры солнечной батареи для зарядки аккумулятора.

21. Солнечная электростанция мощностью $P = 100$ Вт и напряжением $V = 110$ В состоит из 5 параллельно соединенных солнечных панелей. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А/см², $S_{СЭ} = 20$ см², $V_0 = 0,5$ В. Определить общее число солнечных элементов в панели и схему их соединения.

22. Солнечная батарея мощностью $P = 180$ Вт и напряжением $V = 30$ В состоит из шести параллельно соединенных солнечных панелей. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻², $S_{СЭ} = 10$ см², $V_0 = 0,5$ В. Определить общее число солнечных элементов в панели и схему их соединения.

23. Аккумулятор заряжается от солнечной батареи. Время зарядки 5 ч. Напряжение зарядки аккумулятора $V = 16$ В. КПД $\eta = 85\%$. Емкость аккумулятора $E = 55$ А·ч. Солнечная батарея составлена из солнечных элементов с $V_0 = 0,5$ В, $S_{СЭ} = 8$ см². Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻². Определить параметры солнечной батареи.

24. Солнечная батарея ($V = 30$ В, $P = 8000$ Вт) составлена из солнечных элементов площадью $S_{СЭ} = 25$ см². Определить вид соединения солнечных элементов в солнечную батарею, если ЭДС одного солнечного элемента $V_0 = 0,45$ В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻².

25. ЭДС батареи $V = 250$ В, мощность $P = 20$ кВт. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻². ЭДС одного солнечного элемента $V_0 = 0,5$ В. Найти размеры солнечной батареи. Определить количество и размеры солнечных элементов.

26. Солнечная батарея ($V = 120$ В, $P = 2$ кВт) составлена из квадратных солнечных элементов, площадью 25 см². ЭДС одного солнечного элемента равна 0,5 В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2}$ А·см⁻². Определить схему соединения солнечных элементов.

27. ЭДС солнечной батареи $V = 60$ В составлена из $N = 1200$ элементов, площадь каждого солнечного элемента равна 180 см^2 . Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, $V_0 = 0,5$ В. Определить мощность солнечной батареи.

28. ЭДС солнечной батареи $V = 360$ В. Мощность $P = 6$ кВт. Определить вид соединения солнечных элементов в батарею, если ЭДС солнечного элемента $V_0 = 0,5$ В. Плотность тока $i = 2 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$.

29. При температуре $T = 30$ °С мощность кремниевой солнечной батареи составляет $P_1 = 10$ кВт. Определить температуру солнечной батареи, если ее мощность снизилась до $P_2 = 9,5$ кВт. Облученность солнечной батареи $G = 0,8 \text{ кВт/м}^2$.

30. Первоначальная температура батареи $T_1 = 25$ °С. Во сколько раз изменится ток $I_{\text{кз}}$ солнечной батареи при нагревании этой батареи до 150 °С? Облученность батареи $G = 0,8 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

31. Определить температуру солнечной батареи, если произошло понижение ЭДС V_0 в 2 раза. Облученность кремниевого элемента $G = 0,8 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Первоначальная температура солнечной батареи $T_1 = 25$ °С.

32. Определить температуру кремниевого солнечного элемента, $I_{\text{кз}}$ которого увеличился в 1,1 раза. Облученность солнечного элемента $G = 1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^2$. Начальная температура солнечного элемента $T_1 = 25$ °С.

33. Мощность солнечной батареи для энергоснабжения небольшого здания $P = 5$ кВт при температуре 20 °С. Облученность кремниевой солнечной батареи $G = 0,8 \text{ кВт/м}^2$. Найти мощность батареи при температурах $T_1 = 60$ и $T_1 = 120$ °С.

34. Во сколько раз изменится мощность кремниевого солнечного элемента, если собственная температура материала солнечного элемента изменилась от $T_1 = 25$ °С до $T_2 = 115$ °С? Облученность солнечного элемента $G = 0,5 \text{ кВт/м}^2$.

35. Мощность кремниевого солнечного элемента уменьшилась в 1,2 раза. Облученность солнечного элемента $G = 0,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^2$. Первоначальная температура солнечного элемента $T_1 = 25$ °С. Определить температуру кремниевого солнечного элемента.

36. Во сколько раз уменьшится ЭДС кремниевой батареи при увеличении температуры от $T_1 = 25$ до $T_2 = 125$ °С при облученности $G = 0,75$ кВт/м².

37. Во сколько раз увеличится ток короткого замыкания кремниевой солнечной батареи при облученности $G = 0,75$ кВт/м², если температура ее изменяется от $T_1 = 25$ до $T_2 = 175$ °С?

38. Вычислить мощность солнечной батареи при изменении температуры от $T_1 = 25$ до $T_2 = 160$ °С, если при температуре $T_1 = 25$ °С ее мощность была $P = 200$ Вт. Облученность $G = 0,6$ кВт/м².

39. Определить мощность солнечной батареи при облученности 800 Вт/м² при температурах $T_2 = 50$ и $T_3 = 100$ °С, если мощность, отдаваемая ею в нагрузку при $T_1 = 25$ °С, равна $P = 750$ Вт.

40. При $T_1 = 25$ °С мощность солнечной батареи $P = 250$ Вт. Облученность $G = 1$ кВт/м². Определить, во сколько раз изменится ЭДС V_0 кремниевое солнечного элемента, если он нагрелся до температуры $T_2 = 80$ °С.

41. Первоначальная температура кремниевой солнечной батареи $T_1 = 30$ °С. Во сколько раз изменится ток $I_{кз}$ солнечной батареи, при нагревании ее до температуры $T_2 = 100$ °С, если облученность батареи $G = 1$ кВт/м²?

42. Солнечная батарея при $T_1 = 25$ °С вырабатывала мощность $P_1 = 16$ Вт. При длительной работе батарея нагрелась, при этом мощность составила $P_2 = 15$ Вт. Определить рабочую температуру батареи.

43. Первоначальная температура кремниевое солнечного элемента $T_1 = 30$ °С. Облученность $G = 1$ кВт/м². Определить собственную температуру солнечного элемента, если произошло понижение ЭДС V_0 в 1,5 раза.

44. Осветительная система включается каждый день на $t = 5$ ч, потребляемый ток составляет $I = 4$ А. Система питается от аккумулятора напряжением $V_0 = 12$ В, емкостью $E = 30$ А·ч. ЭДС каждого элемента $V_0 = 0,5$ В. Какой должна быть схема соединения солнечных элементов, чтобы заряжать аккумуляторную батарею?

45. КПД солнечного элемента равен 12%, площадь солнечного элемента 16 см^2 , интенсивность солнечного излучения $G = 0,6 \text{ кВт/м}^2$. Определить: мощность P , вырабатываемую батареей из этих элементов, количество солнечных элементов, размещенных на поверхности площадью $S = 10 \text{ м}^2$.

46. На площадку $S = 15 \text{ м}^2$ приходит излучение мощностью $P = 6 \text{ кВт}$. На площадке размещено 300 солнечных элементов, площадь каждого СЭ равна $S_{\text{СЭ}} = 400 \text{ см}^2$. Определить КПД солнечных элементов, если известно, что выходная мощность установки $P = 900 \text{ Вт}$.

47. Найти плотность тока i солнечного элемента при облученности $G = 1 \text{ кВт/м}^2$. КПД солнечного элемента равен 17%, $V_0 = 0,5 \text{ В}$, площадь солнечного элемента равна $S_{\text{СЭ}} = 400 \text{ см}^2$.

48. Площадь солнечных батарей $S = 14 \text{ м}^2$. Найдите мощность батареи при облученности $G = 1 \text{ кВт/м}^2$, если КПД равен 12%.

3. РАСЧЕТ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

3.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

В настоящее время многие российские предприятия активно разрабатывают и осваивают производство биогазовых установок различной мощности и назначения. В большинстве стран мира биогазовые технологии стали стандартом очистки и утилизации муниципальных и промышленных сточных вод и переработки сельскохозяйственных и твердых бытовых отходов в целях получения биогаза для производства тепловой и электрической энергии и высокоэффективного органического удобрения.

Россия обладает огромными запасами биоресурсов, включая сельскохозяйственные и лесные отходы, которые потенциально могут быть использованы для получения биогаза. В данном процессе можно переработать самое разнообразное сырье – растительную биомассу, включая отходы древесины и несъедобные части сельскохозяйственных растений, отходы перерабатывающей промышленности, специально выращенные культуры (водяной гиацинт, гигантские бурые водоросли), отходы сельскохозяйственных ферм, промышленные и бытовые стоки, ил очистных сооружений, а также мусор городских свалок. Анаэробное сбраживание отходов сельскохозяйственных ферм дополнительно к получению биогаза обеспечивает дегельминтизацию, потерю всхожести семян сорняков, подавление патогенных форм микроорганизмов, повышение удобрительной ценности обрабатываемого продукта.

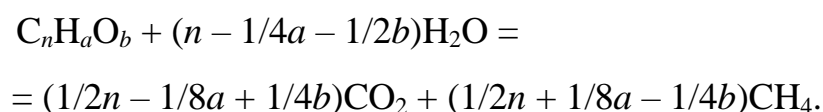
Получение биогаза из органических отходов основано на биохимическом превращении – анаэробном сбраживании биомассы с участием микроорганизмов. Свойства биогаза: плотность $1,22 \text{ кг/м}^3$; теплотворная способность $4,5...6,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$; содержание метана $55...65\%$; содержание углекислого газа $35...45\%$. Выход и состав биогаза зависит от состава исходного органического

сырья. Жидкие и твердые продукты анаэробного сбраживания биомассы называются эффлюент. Эффлюент может быть применен в качестве органического удобрения, богатого азотом и фосфором.

Анаэробное превращение сложного органического вещества в биогаз протекает в несколько последовательных стадий:

- стадия гидролиза метанового брожения, на которой происходит расщепление сложных биополимерных молекул на более простые олиго- и мономеры, например аминокислоты, углеводы, жирные кислоты;
- стадия ферментации, на которой происходит ферментативное брожение образовавшихся мономеров до их разложения на еще более простые вещества – низшие кислоты и спирты с образованием углекислоты и водорода;
- кислотообразующая стадия метанового брожения, на которой происходит образование непосредственных предшественников метана: ацетата, водорода, углекислоты;
- стадия метанообразования, на которой происходит образование конечного продукта деградации сложных органических веществ.

Расщепление органических веществ на CH_4 и CO_2 при анаэробном сбраживании происходит при совместном действии следующих основных групп бактерий: ферментативных, облигатных ацетогенных, метаногенных бактерий. В общем виде уравнение реакции анаэробного сбраживания имеет вид



Биогазовая установка (рис. 3.1) представляет собой комплекс оборудования и устройств, предназначенный для подготовки и переработки биоотходов в биогаз и эффлюент, включающий в себя метантенк и агрегаты для переработки биоотходов.

Метантенк (ферментер, биореактор) представляет собой герметичный резервуар, в котором осуществляется метановое брожение органических отходов. Внутри метантенка поддерживается фиксированная для микроорганизмов тем-

пература. Существует несколько температурных режимов работы метантенков: психрофильный режим при температуре от 20 до 25 °С; мезофильный при температуре от 25 до 40 °С; термофильный режим при температуре от 40 до 60 °С. Наибольшее применение на практике получили мезофильный и термофильный режимы, при этом термофильное сбраживание отличается более высокой интенсивностью деградации органических веществ, что позволяет сократить требуемый объем сооружений вдвое. Для поддержания требуемой температуры осуществляется подогрев реактора, как правило, с использованием теплой воды. Система подогрева – это сеть трубок, находящихся внутри стенки реактора, либо на ее внутренней поверхности.

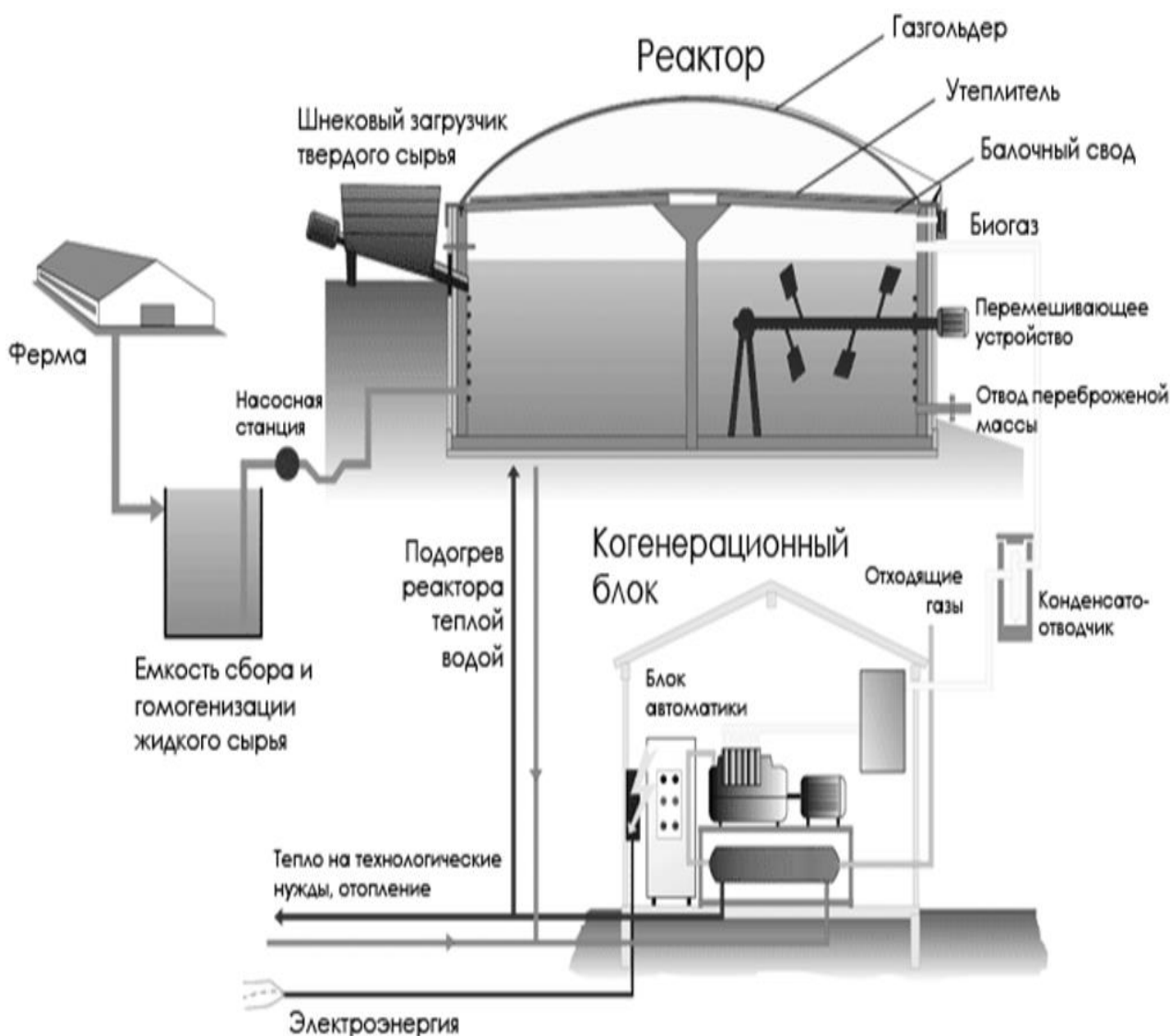


Рис. 3.1. Схема биогазовой установки

Оптимальное значение рН реакционной массы колеблется от 6,5 до 8,5 в зависимости от сырья.

В метантенке необходимо периодическое перемешивание сбраживаемой массы, поддерживающее эффективную и стабильную работу биогазовой установки в целях высвобождения образованного биогаза, перемешивания свежего субстрата и бактерий, предотвращения образования корки и осадка, обеспечения равномерного распределения тепла и поддержания температуры внутри метантенка, обеспечения равномерного распределения популяции бактерий. Перемешивание биомассы внутри метантенка производится, как правило, специальными перемешивающими устройствами – наклонными миксерами, погружными мешалками. В отдельных случаях осуществляется не механическое, а гидравлическое перемешивание, когда органическая масса подается насосами по трубкам в слой, где живут колонии бактерий. Способ перемешивания выбирается в зависимости от типа сырья, влажности и других параметров.

Образующийся в процессе биохимического превращения биогаз хранится в специальной емкости – газгольдере. Переброженная масса – это биоудобрения, готовые к использованию. Жидкие биоудобрения отделяются от твердых с помощью сепаратора и сохраняются в емкости для хранения биоудобрения. Твердые удобрения хранятся на специальном участке.

Биогазовая установка может дополнительно комплектоваться системой очистки биогаза, представляющей собой устройство по разделению CO_2 и CH_4 .

Определение вместимости метантенков производят в зависимости от фактической влажности осадка по суточной дозе загрузки, принимаемой по табл. 3.1 [5], а для осадков производственных сточных вод – на основании экспериментальных данных. Оптимальная суточная доза загрузки массы при влажности навоза 90...95% составляет в среднем 15%, что соответствует продолжительности сбраживания в течение 7 сут.

3.1. Суточная доза загружаемого в метантенк осадка

Режим сбраживания	Суточная доза загружаемого в метантенк осадка D_{mt} , %, при влажности загружаемого осадка, %, не более				
	93	94	95	96	97
Мезофильный	7	8	8	9	10
Термофильный	14	16	17	18	19

При наличии в сточных водах поверхностно-активных веществ (ПАВ) величину суточной дозы загрузки D_{mt} , %, проверяют по формуле

$$D_{mt} = \frac{10D_{lim}}{C_{dt}(100 - p_{mud})}, \quad (3.1)$$

где D_{lim} – предельно допустимая загрузка рабочего объема метантенка в сутки, $D_{lim} = 40 \text{ г/м}^3$ – для алкилбензолсульфонатов с прямой алкильной цепью; $D_{lim} = 85 \text{ г/м}^3$ – для других «мягких» и промежуточных анионных ПАВ; $D_{lim} = 65 \text{ г/м}^3$ – для анионных ПАВ в бытовых сточных водах; C_{dt} – содержание ПАВ в осадке, мг/г, сухого вещества осадка, принимаемое по экспериментальным данным или по табл. 3.2; p_{mud} – влажность загружаемого осадка, %.

3.2. Содержание ПАВ в осадке сточных вод

Исходная концентрация ПАВ в сточной воде, мг/л	Содержание ПАВ, мг/г, сухого вещества осадка	
	Осадок из первичных отстойников	Избыточный активный ил
5	5	5
10	9	5
15	13	7
20	17	7
25	20	12
30	24	12

Распад беззольного вещества загружаемого осадка R_r , %, в зависимости от дозы загрузки определяют по формуле

$$R_r = R_{\text{lim}} - K_r D_{\text{mt}}, \quad (3.2)$$

где R_{lim} – максимально возможное сбраживание беззольного вещества загружаемого осадка, %, определяемое по формуле (3.3); K_r – коэффициент, зависящий от влажности осадка и принимаемый по табл. 3.3.

$$R_{\text{lim}} = (0,92C_{\text{fat}} + 0,62C_{\text{gl}} + 0,34C_{\text{prt}}) \cdot 100, \quad (3.3)$$

где C_{fat} , C_{gl} , C_{prt} – соответственно содержание жиров, углеводов и белков, г, на 1 г беззольного вещества осадка.

При отсутствии данных о химическом составе осадка принимают $R_{\text{lim}} = 53\%$ для осадков из первичных отстойников; $R_{\text{lim}} = 44\%$ – для избыточного активного ила; для смеси осадка с активным илом – по среднеарифметическому соотношению смешиваемых компонентов по беззольному веществу.

Влажность осадка, удаляемого из метантенков второй ступени, следует принимать, %, при сбраживании: осадка из первичных отстойников – 92; осадка совместно с избыточным активным илом – 94.

Весовое количество биогаза, получаемого при сбраживании, следует принимать $0,9 \text{ дм}^3$ на 1 г распавшегося беззольного вещества осадка, теплотворная способность – 5500 ккал/м^3 .

При анаэробном разложении навоза из 1 г сухого органического вещества получается до $1,25 \text{ дм}^3$ биогаза плотностью от 0,8 до $1,2 \text{ кг/м}^3$, содержащего до 65...80% метана.

3.3. Значение коэффициента K_r

Режим сбраживания	Значение коэффициента K_r при влажности загружаемого осадка, %				
	93	94	95	96	97
Мезофильный	1,05	0,89	0,72	0,56	0,40
Термофильный	0,455	0,385	0,31	0,24	0,17

3.4. Качественные и количественные характеристики навоза

Группа с/х животных	Среднесуточное количество навоза на 1 голову, кг	Влажность, %	Зольность, %
Свины	4,5	88	15
Коровы	55	88,4	16
Куры	0,189	72	20
Индейки	0,460	65	17

Количество образуемого биогаза зависит от вида и состава навоза и помета, продолжительности сбраживания, степени распада органического вещества и других факторов. При расчете дозу загрузки метантенков принимают 15%, степень разложения органического вещества 40%.

Расчетное среднесуточное количество, влажность, зольность навоза представлены в табл. 3.4.

При проектировании метантенков предусматривают: число рабочих метантенков – не менее двух; отношение диаметра метантенка к его высоте – не более 0,8...1,0; герметичность резервуаров метантенков, рассчитанных на избыточное давление до 5 кПа (500 мм вод. ст.).

Газ, получаемый в результате сбраживания осадков в метантенках, надлежит использовать в теплоэнергетическом хозяйстве очистной станции и близрасположенных объектов. Для регулирования давления и хранения газа следует предусматривать мокрые газгольдеры, вместимость которых рассчитывается на 2 – 4-часовой выход газа, давление газа под колпаком 1,5...2,5 кПа (150...250 мм вод. ст.).

3.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Рассчитать объем метантенков для сбраживания осадка сточных вод из первичных отстойников, образующихся в количестве 7500 м³/сут плотностью 1,1 т/м³, определить выход газа из метантенков. В сточных водах содержится 5 мг/л анионных ПАВ. Осадок имеет влажность 94 мас. %, содер-

жит 2,1 мас. % жиров, 1,8 мас. % углеводов и 1,8 мас. % белков. Условия сбраживания – мезофильные.

Решение.

1. По формуле (1) определим величину суточной дозы загрузки

$$D_{mt} = \frac{10D_{lim}}{c_{dt}(100 - p_{mud})} = \frac{10 \cdot 65}{5 \cdot (100 - 94)} = 21,7\%,$$

где $c_{dt} = 5$ мг/г определяем по табл. 3.2 для сточной воды, содержащей 5 мг/л ПАВ.

2. Объем метантенков V_M , м³, рассчитываем по формуле

$$V_M = \frac{V_{oc} \cdot 100}{D_{mt}} = \frac{7500 \cdot 100}{21,7} = 34\,562 \text{ м}^3,$$

где V_{oc} – объем осадка сточных вод, образующегося в сутки, м³/сут.

Принимает 4 аппарата объемом по 9000 м³ каждый.

3. Максимально возможное сбраживание беззольного вещества загружаемого осадка R_{lim} , %, определяем по формуле (3):

$$\begin{aligned} R_{lim} &= (0,92C_{fat} + 0,62C_{gl} + 0,34C_{prt}) \cdot 100 = \\ &= (0,92 \cdot 0,37 + 0,62 \cdot 0,32 + 0,34 \cdot 0,32) \cdot 100 = 65\%, \end{aligned}$$

где

$$C_{fat} = \frac{2,1}{2,1 + 1,8 + 1,8} = 0,37 \text{ г/г};$$

$$C_{gl} = \frac{1,8}{2,1 + 1,8 + 1,8} = 0,32 \text{ г/г};$$

$$C_{prt} = \frac{1,8}{2,1 + 1,8 + 1,8} = 0,32 \text{ г/г}.$$

4. Распад беззольного вещества загружаемого осадка R_r , %, рассчитываем по формуле (2):

$$R_r = R_{lim} - K_r D_{mt} = 65 - 0,89 \cdot 21,7 = 45,69\%,$$

где $K_r = 0,89$ определяем по табл. 3.3 при влажности осадка 94% для мезофильного режима.

5. Найдем массу образующихся осадков:

$$M = 7500 \cdot 1,1 = 8250 \text{ т/сут};$$

массу беззольного вещества:

$$M_{\text{БВ}} = 8250 \cdot (2,1 + 1,8 + 1,8) / 100 = 387,75 \text{ т/сут};$$

массу распавшегося беззольного вещества:

$$M_{\text{РБВ}} = 387,75 \cdot 45,69 / 100 = 177,16 \text{ т/сут}.$$

С учетом того, что из 1 г распавшегося беззольного вещества осадка при сбраживании получается 0,9 дм³ биогаза, выход газа из метантенков составит

$$V = 177,16 \cdot 10^6 \cdot 0,9 = 159,44 \cdot 10^6 \text{ дм}^3/\text{сут}.$$

Задача 2. Рассчитать объем метантенка для сбраживания навоза, образующегося на свиноферме поголовьем 50 000 голов, определить выход газа из метантенков. Плотность навоза принять равной 1,2 т/м³.

Решение.

1. Найдем среднесуточное количество навоза, образующегося на ферме, исходя из данных табл. 3.4:

$$M = 50\,000 \cdot 4,5 = 225 \cdot 10^3 \text{ кг/сут} = 225 \text{ т/сут}.$$

С учетом плотности среднесуточный объем образующегося навоза составит

$$V_{\text{ос}} = \frac{M}{\rho} = \frac{225}{1,2} = 187,5 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

2. С учетом того, что оптимальная суточная доза загрузки навоза составляет в среднем 15%, рассчитываем объем метантенков

$$V_{\text{м}} = \frac{V_{\text{ос}} \cdot 100}{D_{\text{mt}}} = \frac{187,5 \cdot 100}{15} = 1250 \text{ м}^3.$$

Принимает 2 аппарата объемом не менее 625 м³ каждый.

3. Найдем массу сухого образующегося навоза с учетом данных табл. 3.4:

$$M = 225 \cdot (100 - 88) / 100 = 27 \text{ т/сут};$$

массу беззольного вещества:

$$M_{\text{БВ}} = 27 \cdot (100 - 15) / 100 = 22,95 \text{ т/сут};$$

массу распавшегося беззольного вещества (примем степень разложения органического вещества 40%):

$$M_{\text{РБВ}} = 22,95 \cdot 40 / 100 = 9,18 \text{ т/сут}.$$

С учетом того, что при анаэробном разложении навоза из 1 г сухого органического вещества получается до 1,25 дм³ биогаза:

$$V = 9,18 \cdot 10^6 \cdot 1,25 = 11,48 \cdot 10^6 \text{ дм}^3/\text{сут}.$$

3.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Рассчитать объем метантенка для сбраживания избыточного активного ила, образующегося в количестве 5200 м³/сут, плотностью 1,2 т/м³, определить выход газа из метантенков. В сточных водах содержится 20 мг/л ПАВ (алкилбензолсульфонатов с прямой алкильной цепью). Осадок имеет влажность 97 мас. %, зольность 25%. Условия сбраживания – термофильные.

2. Рассчитать объем метантенка для сбраживания осадка сточных вод из первичных отстойников, образующихся в количестве 800 м³/сут, плотностью 1120 кг/м³, определить выход газа из метантенков. Осадок имеет влажность 93 мас. %, зольность 16%. Условия сбраживания – мезофильные.

3. Рассчитать объем метантенка для сбраживания избыточного активного ила, образующегося в количестве 1200 м³/сут, плотностью 1,0 кг/дм³, определить выход газа из метантенков. В сточных водах содержится 5 мг/л анионных ПАВ. Осадок имеет влажность 97 мас. %, зольность 28%. Условия сбраживания – мезофильные.

4. Рассчитать, какое количество теплоты можно получить при анаэробном сбраживании 2000 м³/сут осадка сточных вод из первичных отстойников влажностью 96%, плотностью 1,1 т/м³, зольностью 17% (условия сбраживания – термофильные).

5. Рассчитать, какое количество теплоты можно получить при анаэробном сбраживании 2200 м³/сут избыточного активного ила влажностью 94%, плотностью 1,2 т/м³, зольностью 26% (условия сбраживания – мезофильные).

6. Рассчитать объем метантенка для сбраживания куриного помета, образующегося на птицефабрике поголовьем 3 млн голов, определить выход газа из метантенков. Плотность помета принять равной 1,2 т/м³.

7. Рассчитать объем метантенка для сбраживания навоза, образующегося на молочной ферме поголовьем 24 000 коров, определить выход газа из метантенков. Плотность навоза принять равной 1,3 т/м³.

8. Рассчитать объем метантенка для сбраживания помета, образующегося на индюшиной птицеферме поголовьем 1000 голов, определить выход газа из метантенков. Плотность помета принять равной 1,2 т/м³.

4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

4.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

Применение качественной тепловой изоляции позволяет существенно снижать потери тепловой энергии в высокотемпературных технологических процессах, а также при ее транспортировании.

В энергетике объектами тепловой изоляции являются паровые котлы, паровые и газовые турбины, теплообменники, баки-аккумуляторы горячей воды, дымовые трубы.

В промышленности тепловой изоляции подлежат вертикальные и горизонтальные технологические аппараты, насосы, теплообменники, резервуары для хранения воды, нефти и нефтепродуктов. Особенно высокие требования предъявляются к эффективности тепловой изоляции низкотемпературного и криогенного оборудования.

Тепловая изоляция обеспечивает возможность проведения технологических процессов при заданных параметрах, позволяет создать безопасные условия труда на производстве, снижает потери легко испаряющихся нефтепродуктов в резервуарах, дает возможность хранить сжиженные и природные газы в изотермических хранилищах.

К теплоизоляционным материалам относятся строительные материалы или изделия, имеющие коэффициент теплопроводности при средней температуре изоляционного слоя 25 °С не более 0,175 Вт/(м·К) и предназначенные для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду.

В теплоизоляционной конструкции они являются основным термическим сопротивлением.

Теплопроводность – способность материала передавать через свою толщину тепловой поток, возникающий вследствие разности температур на противоположных поверхностях. Численной характеристикой теплопроводности является

коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К), характеризующийся количеством теплоты (Дж), проходящей за единицу времени через образец материала толщиной 1 м, площадью 1 м² при разности температур на противоположных плоскопараллельных поверхностях в 1 К.

С увеличением средней плотности теплоизоляционных материалов теплопроводность возрастает. Чем выше пористость материала, тем ниже теплопроводность. Резко возрастает теплопроводность при увеличении влажности материала, при этом понижаются его теплоизоляционные свойства. Это связано с тем, что коэффициент теплопроводности воды существенно выше коэффициента теплопроводности воздуха ($\lambda = 0,5984$ Вт/(м·К) у воды и $\lambda = 0,0259$ Вт/(м·К) у воздуха при 20 °С). Поэтому в теплоизоляционной конструкции материалы защищают от попадания влаги покровным слоем.

Основными требованиями к теплоизоляционным материалам являются:

- низкая теплопроводность (не более 0,175 Вт/(м·К) при 25 °С);
- малая плотность (не более 500 кг/м³) и высокое содержание воздушных пор;
- стабильность физико-механических и теплотехнических свойств (при монтаже и в процессе эксплуатации);
- полное отсутствие или выделение в количествах, не превышающих предельно допустимые концентрации в процессе эксплуатации, вредных, пожароопасных и взрывоопасных, неприятно пахнущих веществ;
- низкие гигроскопичность и водопоглощение;
- термостойкость и морозостойкость (в пределах температур эксплуатации);
- негорючесть;
- химическая инертность по отношению к материалам, с которыми возможен контакт в изоляционной конструкции;
- приемлемые экономические показатели.

Теплоизоляционные материалы по природе их происхождения подразделяют на минеральные (на основе асбеста, керамзита, полученные из расплавов

шлаков, горных пород и др.) и органические (полученные из волокнистого сырья с добавлением органических клеев).

По предельным температурам применения теплоизоляционные материалы делят на три класса: низкотемпературные (до 150 °С – торфоплиты, строительный войлок и др.); среднетемпературные (до 450 °С – асбозурит, стекловата и др.); высокотемпературные (выше 450 °С – шлаковата, асботермит, асбест и др.)

Номенклатура волокнистых теплоизоляционных материалов, предназначенных для тепловой изоляции оборудования, представлена матами, плитами теплоизоляционными минераловатными, изделиями из супертонкого стеклянного и базальтового волокна с применением различных связующих и без них и др.

Из пенопластов наибольшее применение в конструкциях тепловой изоляции оборудования, преимущественно низкотемпературного, находит пенополиуретан заливочный. Для изоляции трубопроводов и оборудования с положительными и отрицательными температурами (от –70 до +150 °С) применяются изделия из вспененного синтетического каучука. Эффективным материалом для изоляции оборудования и резервуаров является пеностекло с температурой применения от –260 до +485 °С.

В таблице 4.1 приведены технические характеристики некоторых теплоизоляционных материалов и изделий.

На открытом воздухе в летнее время, в помещении, в каналах, тоннелях, технических подпольях, на чердаках и в подвалах зданий средняя температура теплоизоляционного слоя рассчитывается по формуле

$$t_{из} = (t_{в} + 40) / 2, \quad (4.1)$$

на открытом воздухе, воздухе в зимнее время – по формуле

$$t_{из} = t_{в} / 2, \quad (4.2)$$

где $t_{в}$ – температура среды внутри изолируемого оборудования (трубопровода).

В основе расчета тепловой изоляции лежат формулы для расчета теплопередачи.

4.1. Технические характеристики теплоизоляционных материалов и изделий

Материал, изделие	Средняя плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С) (при 20 °С и выше)	Максимальная температура применения, °С
Плиты минераловатные прошивные	120	$0,045 + 0,00021t_{из}$	450 – для матов, на ткани, сетке, холсте из стекловолокна до 700 – на металлической сетке
	150	$0,049 + 0,0002t_{из}$	
Теплоизоляционные изделия из вспененного этиленполипропиленового каучука «Аэрофлекс»	60	$0,034 + 0,0002t_{из}$	125
Маты и вата из супер-тонкого стеклянного волокна	70	$0,033 + 0,00014t_{из}$	400
Маты и вата из супертонкого базальтового волокна	80	$0,032 + 0,00019t_{из}$	600
Теплоизоляционные изделия из пенополистирола	30	$0,033 + 0,00018t_{из}$	70
	50	$0,036 + 0,00018t_{из}$	
	100	$0,041 + 0,00018t_{из}$	
Теплоизоляционные изделия из пенополиуретана	40	$0,030 + 0,00015t_{из}$	130
	50	$0,032 + 0,00015t_{из}$	
	70	$0,037 + 0,00015t_{из}$	
Теплоизоляционные изделия из пенополиэтилена	50	$0,035 + 0,00018t_{из}$	70

Примечание: $t_{из}$ – средняя температура теплоизоляционного слоя, °С.

Поверхностная плотность теплового потока q_F , Вт/м², через плоскую теплоизоляционную конструкцию рассчитывается по формуле

$$q_F = \frac{t_B - t_H}{R_{BH} + R_{CT} + \sum_{i=1}^n R_i + R_H}; \quad (4.3)$$

$$R_{BH} = \frac{1}{\alpha_{BH}}; \quad R_H = \frac{1}{\alpha_H}; \quad (4.4)$$

$$R_{CT} = \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}}; \quad R_{ИЗ} = \frac{\delta_{ИЗ}}{\lambda_{ИЗ}}; \quad R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.5)$$

где t_B – температура среды внутри изолируемого оборудования, °С; t_H – температура окружающей среды, °С; R_{BH} – термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стенки изолируемого объекта, м²·°С/Вт, рассчитывается по формуле (4.4); R_H – то же, на наружной поверхности теплоизоляции, м²·°С/Вт, рассчитывается по формуле (4.4); R_{CT} – термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты стенки изолируемого объекта, м²·°С/Вт, рассчитывается по формуле (4.5); $R_{ИЗ}$ – то же, для плоского слоя изоляции, м²·°С/Вт, рассчитывается по формуле (4.5); $\sum_{i=1}^n R_i$ – полное термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты n -слойной плоской изоляции; R_i – термическое сопротивление i -го слоя изоляции, м²·°С/Вт, рассчитывается по формуле (4.5), $R_i = R_{ИЗ}$ для однослойной теплоизоляционной конструкции; α_{BH} , α_H – коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности стенки изолируемого объекта и наружной поверхности изоляции, Вт/(м²·°С); δ_{CT} , $\delta_{ИЗ}$, δ_i – толщина соответственно стенки изолируемого объекта, однослойной изоляции, изоляции i -го слоя n -слойной изоляции, Вт/(м·°С); λ_{CT} , $\lambda_{ИЗ}$, λ_i – коэффициенты теплопроводности соответственно материала стенки изолируемого объекта однослойной изоляции, изоляции i -го слоя n -слойной изоляции, Вт/(м·°С).

Линейная плотность теплового потока q_L , Вт/м, через цилиндрическую теплоизоляционную конструкцию рассчитывается по формуле

$$q_L = \frac{t_B - t_H}{R_{BH}^L + R_{CT}^L + \sum_{i=1}^n R_i^L + R_H^L}; \quad (4.6)$$

$$R_{BH}^L = \frac{1}{\pi d_{BH}^{CT} \alpha_{BH}}; \quad R_H^L = \frac{1}{\pi d_{BH}^{ИЗ} \alpha_H}; \quad (4.7)$$

$$R_{CT}^L = \frac{\delta_{CT}}{2\pi\lambda_{CT}} \ln \frac{d_H^{CT}}{d_{BH}^{CT}}; \quad R_{ИЗ}^L = \frac{\delta_{ИЗ}}{2\pi\lambda_{ИЗ}} \ln \frac{d_H^{ИЗ}}{d_H^{CT}}; \quad R_i^L = \frac{\delta_i}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_H^i}{d_{BH}^i}, \quad (4.8)$$

где R_{BH}^L – линейное термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стенки изолируемого объекта, м⁰С/Вт, рассчитывается по формуле (4.7); R_H^L – то же, на наружной теплоизоляции, м⁰С/Вт, рассчитывается по формуле (4.7); R_{CT}^L – линейное термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты цилиндрической стенки изолируемого объекта, м⁰С/Вт, рассчитывается по формуле (4.8); $R_{ИЗ}^L$ – то же, для цилиндрического слоя изоляции, м⁰С/Вт, рассчитывается по формуле (4.8); $\sum_{i=1}^n R_i^L$ – полное линейное термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты n -слойной цилиндрической изоляции; R_i^L – линейное термическое сопротивление i -го слоя изоляции, м⁰С/Вт, рассчитывается по формуле (4.8), $R_i^L = R_{ИЗ}^L$ для однослойной цилиндрической теплоизоляционной конструкции; d_{BH}^{CT} , d_H^{CT} – внутренний и наружный диаметры стенки изолируемого объекта, м; $d_H^{ИЗ}$ – наружный диаметр изоляции, м; d_H^i , d_{BH}^i – наружный и внутренний диаметры i -го слоя n -слойной изоляции, м.

4.2. Рекомендуемая температура поверхности теплоизолируемых объектов

Признак объекта	Температура поверхности, не более, °С
Для изолируемых объектов, расположенных в рабочей или обслуживаемой зоне помещений и содержащих вещества:	
температурой выше 100 °С	45
температурой 100 °С и ниже	35
температурой вспышки паров не выше 45 °С	35
Для изолируемых объектов, расположенных на открытом воздухе, в рабочей или обслуживаемой зоне, при:	
металлическом покровном слое	45
для других видов покровного слоя	60

Помимо снижения потерь тепловой энергии при транспортировании, тепловая изоляция предохраняет обслуживающий персонал от ожогов. При этом температура на поверхности теплоизолируемых объектов ($t_{п}$, °С) по рекомендациям [1] должна приниматься в соответствии с табл. 4.2.

Температура на поверхности тепловой изоляции трубопроводов, расположенных за пределами рабочей или обслуживаемой зоны, не должна превышать температурных пределов применения материалов покровного слоя, но не выше 75 °С.

Допустимые тепловые потери при расчете тепловой изоляции составляют 3...5% от тепловой нагрузки аппарата.

Плотность теплового потока в стационарном процессе теплопередачи через плоскую теплоизоляционную конструкцию (q_F , Вт/м²), рассчитываемая по формуле (4.3), равна плотности теплового потока, проходящего через слой

теплоизоляции, рассчитываемой по формуле (4.9) и плотности теплового потока при теплоотдачи в среде, рассчитываемой по формуле (4.10):

$$q_F = \frac{(t_c - t_{\Pi})}{\sum_{i=1}^n R_i}; \quad (4.9)$$

$$q_F = \alpha_{\text{вн}}(t_c - t_{\Pi}), \quad q_F = \alpha_{\text{общ}}(t_{\Pi} - t_{\text{н}}), \quad (4.10)$$

где t_c – температура внутренней поверхности стенки теплоизолируемого аппарата (при расчетах принимаем ее условно равной температуре внутренней поверхности тепловой изоляции); $\alpha_{\text{общ}}$ – общий коэффициент теплоотдачи в окружающую среду конвекцией и излучением, Вт/(м²·°С). Его можно определить по формуле Линчевского в интервале температур 30...350 °С:

$$\alpha_{\text{общ}} = 9,74 + 0,07(t_{\Pi} - t_{\text{н}}). \quad (4.11)$$

Для удобства расчета процесса теплопередачи строят схему профилей температур (рис. 4.1).

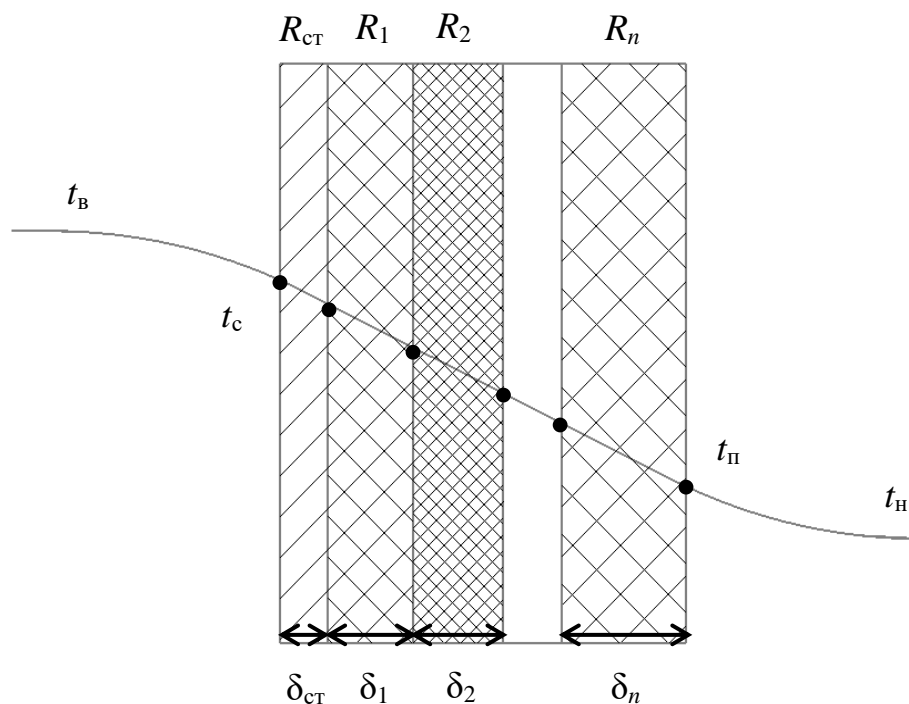


Рис. 4.1. Схема профилей температур в процессе теплопередачи через плоскую многослойную теплоизоляционную конструкцию

4.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Рассчитать термическое сопротивление двухслойной плоской изоляции, первый слой которой толщиной 60 мм состоит из супертонкого стеклянного волокна, второй слой толщиной 20 мм состоит из вспененного этиленполипропиленового каучука «Аэрофлекс». Расчет провести для аппарата, находящегося в помещении с температурой среды внутри изолируемого оборудования 250 °С.

Решение.

1. По формуле (4.1) рассчитываем среднюю температуру теплоизоляционного слоя аппарата, находящегося в помещении:

$$t_{\text{из}} = (250 + 40)/2 = 145 \text{ °С.}$$

2. По таблице (4.1) определяем коэффициент теплопроводности для первого слоя теплоизоляции, состоящего из супертонкого стеклянного волокна $\lambda_{\text{из}}^1 = 0,033 + 0,00014 \cdot 145 = 0,053 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$. Коэффициент теплопроводности для второго слоя теплоизоляции, состоящего из вспененного этиленполипропиленового каучука «Аэрофлекс», $\lambda_{\text{из}}^2 = 0,034 + 0,0002 \cdot 145 = 0,063 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$.

3. Для расчета термического сопротивления каждого слоя плоской изоляции используем формулу (4.5):

$$R_{\text{из}}^1 = \frac{0,06}{0,053} = 1,13 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot \text{°С}};$$

$$R_{\text{из}}^2 = \frac{0,02}{0,063} = 1,32 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot \text{°С}}.$$

Термическое сопротивление двухслойной плоской изоляции составит $1,13 + 0,32 = 1,45 \text{ м}^2/(\text{Вт} \cdot \text{°С})$.

Задача 2. Определить необходимую толщину слоя изоляции реактора, внутри которого температура 300 °С. В качестве теплоизоляционного материала использовать вату из супертонкого стеклянного волокна. Аппарат расположен в рабочей зоне помещений. Коэффициент теплоотдачи от реакционного раствора к стенке реактора равен 150 Вт/(м²·°С).

Решение.

1. По таблице 4.2 определяем температуру поверхности теплоизолируемых объектов для аппарата, расположенного в рабочей зоне помещений: $t_{\Pi} = 45$ °С. Температуру окружающей среды примем равной $t_{\text{н}} = 23$ °С.

2. По формуле Линчевского (4.11) рассчитываем общий коэффициент теплоотдачи в окружающую среду конвекцией и излучением:

$$\alpha_{\text{общ}} = 9,74 + 0,07 \cdot (45 - 23) = 11,28 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

3. По формуле (4.10) рассчитаем тепловой поток:

$$q = 11,28 \cdot (45 - 23) = 248,16 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Плотность теплового потока в установившемся процессе теплопередачи через плоскую теплоизоляционную конструкцию $q = \text{const}$.

4. Из уравнения теплоотдачи от реакционного раствора (4.10) выражаем и находим температуру внутренней поверхности тепловой изоляции:

$$t_{\text{с}} = t_{\text{в}} - \frac{q}{\alpha_{\text{вн}}} = 300 - \frac{248,16}{150} = 298,35 \text{ °С}.$$

5. Из уравнения (4.9) выражаем и находим термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты однослойной изоляции:

$$R_{\text{из}} = \frac{(t_{\text{с}} - t_{\text{п}})}{q} = \frac{(298,35 - 45)}{248,16} = 1,02 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot \text{°С}}.$$

6. По формуле (4.1) рассчитываем среднюю температуру теплоизоляционного слоя аппарата, находящегося в рабочей зоне помещений:

$$t_{\text{из}} = (300 + 40) / 2 = 170 \text{ }^\circ\text{C}.$$

7. По таблице (4.1) определяем коэффициент теплопроводности для теплоизоляции на основе ваты из супертонкого стеклянного волокна:

$$\lambda_{\text{из}} = 0,033 + 0,00014 \cdot 170 = 0,057 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}.$$

8. Из уравнения (4.5) выражаем и находим толщину слоя изоляции:

$$\delta_{\text{из}} = R_{\text{из}} \lambda_{\text{из}} = 1,02 \cdot 0,057 = 0,058 \text{ м}.$$

Задача 3. Определить потери теплоты (тепловой поток через теплоизоляцию). Аппарат диаметром 1,5 м высотой 3 м со слоем теплоизоляции из пенополиуретана плотностью 50 кг/м³, толщиной 40 мм. Температура стенки аппарата 115 °С, температура наружной поверхности изоляции 45 °С.

Решение.

1. По формуле (4.1) приняв в качестве допущения равенство $t_{\text{в}} = t_{\text{с}}$, рассчитываем среднюю температуру теплоизоляционного слоя аппарата, находящегося в помещении:

$$t_{\text{из}} = (115 + 40) / 2 = 77,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. По таблице (4.1) определяем коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции:

$$\lambda_{\text{из}} = 0,032 + 0,00015 \cdot 77,5 = 0,044 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}.$$

3. Для расчета термического сопротивления слоя плоской изоляции используем формулу (4.5):

$$R_{\text{из}} = \frac{0,04}{0,044} = 0,91 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт}\cdot\text{}^\circ\text{C}}.$$

4. Плотность теплового потока через однослойную теплоизоляционную конструкцию рассчитываем по формуле (4.9):

$$q = \frac{(t_c - t_n)}{R_{из}} = \frac{(115 - 45)}{0,91} = 79,92 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

5. Для расчета теплового потока через слой теплоизоляции рассчитаем среднюю площадь, через которую проходит теплота:

$$F = \pi \left(DH + 2 \cdot \frac{D^2}{4} \right) = \pi \left(1,58 \cdot 3 + 2 \cdot \frac{1,58^2}{4} \right) = 18,81 \text{ м}^2.$$

где $D = 1,5 + 2 \cdot 0,04 = 1,58$ м – наружный диаметр аппарата; $H = 3$ м – высота аппарата.

6. Тепловой поток через теплоизоляцию:

$$Q = qF = 79,92 \cdot 18,81 = 1447 \text{ Вт}.$$

Задача 4. Определить необходимую толщину слоя изоляции трубопровода, по которому транспортируется горячая вода температурой 90°C . Трубопровод установлен в помещении. В качестве теплоизоляционного материала использовать пенополиуретан плотностью 70 кг/м^3 . Трубопровод изготовлен из стали (Ст3) с наружным диаметром 114 мм и толщиной стенки 4 мм . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубопровода равен $3000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

Решение.

1. По таблице 4.2 определяем температуру поверхности теплоизолируемых объектов для трубопровода, расположенного в помещении: $t_n = 35^\circ\text{C}$. Температуру окружающей среды примем равной $t_n = 23^\circ\text{C}$.

2. По формуле Линчевского (4.11) рассчитываем общий коэффициент теплоотдачи в окружающую среду конвекцией и излучением:

$$\alpha_{\text{общ}} = 9,74 + 0,07 \cdot (35 - 23) = 10,58 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

3. Внутренний диаметр стальной трубы:

$$d_{\text{ВН}}^{\text{СТ}} = 114 \text{ мм} - 2 \cdot 4 \text{ мм} = 106 \text{ мм} = 0,106 \text{ м}.$$

4. По формуле (4.7) находим линейное термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стенки изолируемого объекта:

$$R_{\text{ВН}}^L = \frac{1}{\pi d_{\text{ВН}}^{\text{СТ}} \alpha_{\text{ВН}}} = \frac{1}{\pi \cdot 0,106 \cdot 3000} = 0,001 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

5. По формуле (4.8) находим линейное термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты цилиндрической стенки трубопровода:

$$R_{\text{СТ}}^L = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{СТ}}} \ln \frac{d_{\text{Н}}^{\text{СТ}}}{d_{\text{ВН}}^{\text{СТ}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 55} \ln \frac{0,114}{0,106} = 0,00021 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}},$$

где $\lambda_{\text{СТ}} = 55 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубопровода (сталь Ст3).

6. По формуле (4.1) рассчитываем среднюю температуру теплоизоляционного слоя аппарата, находящегося в рабочей зоне помещений:

$$t_{\text{ИЗ}} = (90 + 40) / 2 = 65 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

7. По таблице (4.1) определяем коэффициент теплопроводности для теплоизоляции на основе пенополиуретана плотностью $70 \text{ кг}/\text{м}^3$:

$$\lambda_{\text{ИЗ}} = 0,037 + 0,00015 \cdot 65 = 0,047 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}).$$

Задаваясь начальным значением толщины изоляции $\delta_{\text{ИЗ}}^0$, м, производим с помощью последовательных шагов: 1, 2, ..., i для толщины изоляции: $\delta_{\text{ИЗ}}^1 = 1 \cdot \delta_{\text{ИЗ}}^0$, $\delta_{\text{ИЗ}}^2 = 2 \cdot \delta_{\text{ИЗ}}^0$, $\delta_{\text{ИЗ}}^i = i \cdot \delta_{\text{ИЗ}}^0$, вычисление линейной плотности теплового потока и сравнением с нормами [3].

Первое приближение.

8. В качестве начального приближения зададимся толщиной однослойной теплоизоляции $\delta_{\text{из}}^1 = 10$ мм, тогда наружный диаметр изоляции

$$d_{\text{н}}^{\text{из}} = 114 \text{ мм} + 2 \cdot 10 \text{ мм} = 134 \text{ мм} = 0,134 \text{ м},$$

и линейное термическое сопротивление теплоотдаче на наружной теплоизоляции

$$R_{\text{н}}^L = \frac{1}{\pi d_{\text{н}}^{\text{из}} \alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{\pi \cdot 0,134 \cdot 10,58} = 0,23 \frac{\text{м}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

9. По формуле (4.8) находим линейное термическое сопротивление цилиндрического слоя изоляции:

$$R_{\text{из}}^L = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{н}}^{\text{из}}}{d_{\text{н}}^{\text{ст}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,047} \ln \frac{0,134}{0,114} = 0,55 \frac{\text{м}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

10. По формуле (4.6) находим линейную плотность теплового потока q_L , Вт/м, через цилиндрическую однослойную теплоизоляционную конструкцию:

$$q_L = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{вн}}^L + R_{\text{ст}}^L + R_{\text{из}}^L + R_{\text{н}}^L} = \frac{90 - 23}{0,001 + 0,00021 + 0,55 + 0,23} = 86 \text{ Вт/м}.$$

В соответствии с работой [3, табл. 2] норма линейной плотности теплового потока при заданном диаметре трубопровода и температуре теплоносителя составляет 34 Вт/м.

86 Вт/м > 34 Вт/м, продолжаем расчет.

Второе приближение.

8. В качестве приближения зададимся толщиной однослойной теплоизоляции $\delta_{\text{из}}^2 = 20$ мм, тогда наружный диаметр изоляции

$$d_{\text{н}}^{\text{из}} = 114 \text{ мм} + 2 \cdot 20 \text{ мм} = 154 \text{ мм} = 0,154 \text{ м},$$

и линейное термическое сопротивление теплоотдаче на наружной теплоизоляции

$$R_{\text{H}}^L = \frac{1}{\pi d_{\text{H}}^{\text{CT}} \alpha_{\text{H}}} = \frac{1}{\pi \cdot 0,154 \cdot 10,58} = 0,20 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

9. По формуле (4.8) находим линейное термическое сопротивление цилиндрического слоя изоляции:

$$R_{\text{ИЗ}}^L = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{ИЗ}}} \ln \frac{d_{\text{H}}^{\text{ИЗ}}}{d_{\text{H}}^{\text{CT}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,047} \ln \frac{0,154}{0,114} = 1,02 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

10. По формуле (4.6) находим линейную плотность теплового потока q_L , Вт/м, через цилиндрическую однослойную теплоизоляционную конструкцию:

$$q_L = \frac{t_{\text{В}} - t_{\text{Н}}}{R_{\text{ВН}}^L + R_{\text{СТ}}^L + R_{\text{ИЗ}}^L + R_{\text{H}}^L} = \frac{90 - 23}{0,001 + 0,00021 + 1,02 + 0,20} = 55 \text{ Вт/м}.$$

55 Вт/м > 34 Вт/м, продолжаем расчет.

Третье приближение.

8. В качестве приближения зададимся толщиной однослойной теплоизоляции $\delta_{\text{ИЗ}}^3 = 30$ мм, тогда наружный диаметр изоляции

$$d_{\text{H}}^{\text{ИЗ}} = 114 \text{ мм} + 2 \cdot 30 \text{ мм} = 174 \text{ мм} = 0,174 \text{ м},$$

и линейное термическое сопротивление теплоотдаче на наружной теплоизоляции

$$R_{\text{H}}^L = \frac{1}{\pi d_{\text{H}}^{\text{ИЗ}} \alpha_{\text{H}}} = \frac{1}{\pi \cdot 0,174 \cdot 10,58} = 0,17 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

9. По формуле (4.8) находим линейное термическое сопротивление цилиндрического слоя изоляции:

$$R_{\text{ИЗ}}^L = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{ИЗ}}} \ln \frac{d_{\text{H}}^{\text{ИЗ}}}{d_{\text{H}}^{\text{CT}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,047} \ln \frac{0,174}{0,114} = 1,43 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

10. По формуле (4.6) находим линейную плотность теплового потока q_L , Вт/м, через цилиндрическую однослойную теплоизоляционную конструкцию:

$$q_L = \frac{t_B - t_H}{R_{BH}^L + R_{CT}^L + R_{ИЗ}^L + R_H^L} = \frac{90 - 23}{0,001 + 0,00021 + 1,43 + 0,17} = 42 \text{ Вт/м.}$$

42 Вт/м > 34 Вт/м, продолжаем расчет.

Четвертое приближение.

8. В качестве приближения зададимся толщиной однослойной теплоизоляции $\delta_{ИЗ}^4 = 40$ мм, тогда наружный диаметр изоляции

$$d_H^{ИЗ} = 114 \text{ мм} + 2 \cdot 40 \text{ мм} = 194 \text{ мм} = 0,194 \text{ м.}$$

и линейное термическое сопротивление теплоотдаче на наружной теплоизоляции

$$R_H^L = \frac{1}{\pi d_H^{ИЗ} \alpha_H} = \frac{1}{\pi \cdot 0,194 \cdot 10,58} = 0,16 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

9. По формуле (4.8) находим линейное термическое сопротивление цилиндрического слоя изоляции:

$$R_{ИЗ}^L = \frac{1}{2\pi\lambda_{ИЗ}} \ln \frac{d_H^{ИЗ}}{d_H^{СТ}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,047} \ln \frac{0,194}{0,114} = 1,80 \frac{\text{М}}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

10. По формуле (4.6) находим линейную плотность теплового потока q_L , Вт/м, через цилиндрическую однослойную теплоизоляционную конструкцию:

$$q_L = \frac{t_B - t_H}{R_{BH}^L + R_{CT}^L + R_{ИЗ}^L + R_H^L} = \frac{90 - 23}{0,001 + 0,00021 + 1,80 + 0,16} = 34 \text{ Вт/м.}$$

34 Вт/м = 34 Вт/м.

Найденная толщина тепловой изоляции – 40 мм.

Задача 5. Определить тепловые потери через стенки аппарата диаметром 2 м, высотой 4,5 м, изготовленного из стали (Ст3) толщиной 4 мм, внутри которого происходит синтез при температуре 70 °С. На сколько уменьшатся тепловые потери, если аппарат теплоизолировать пенополиэтиленом толщиной 50 мм? Аппарат находится в помещении, коэффициент теплоотдачи от реакционного раствора к стенке аппарата равен 300 Вт/(м²·°С), коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата в окружающую среду 15 Вт/(м²·К), температура окружающей среды 20 °С.

Решение.

1. Термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней и наружной поверхностях стенки изолируемого объекта, м²·°С/Вт, рассчитываем по формуле (4.4)

$$R_{\text{вн}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} = \frac{1}{300} = 0,0033 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{15} = 0,067 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

2. Термическое сопротивление стенки аппарата рассчитываем по формуле (4.5):

$$R_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0,004}{55} = 0,000073 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{С}},$$

где $\lambda_{\text{ст}} = 55 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубопровода (сталь Ст3).

3. Поверхностную плотность теплового потока q_F , Вт/м², через плоскую не теплоизолированную стенку рассчитываем по формуле (4.9):

$$q_F = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{н}}} = \frac{70 - 20}{0,0033 + 0,000073 + 0,067} = 710,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

4. Для расчета теплового потока через слой стенки рассчитаем среднюю площадь, через которую проходит теплота:

$$F = \pi \left(DH + 2 \cdot \frac{D^2}{4} \right) = \pi \left(2 \cdot 4,5 + 2 \cdot \frac{2^2}{4} \right) = 34,56 \text{ м}^2.$$

5. Тепловой поток через стенки аппарата:

$$Q = qF = 710,5 \cdot 34,56 = 24\,554 \text{ Вт} = 24,554 \text{ кВт}.$$

6. Рассчитаем тепловые потери теплоизолированного аппарата.

По формуле (4.1) рассчитываем среднюю температуру теплоизоляционного слоя аппарата, находящегося в помещении:

$$t_{\text{из}} = (70 + 40) / 2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}.$$

7. По таблице (4.1) определяем коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции

$$\lambda_{\text{из}} = 0,035 + 0,00018 \cdot 55 = 0,045 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

8. Для расчета термического сопротивления слоя плоской изоляции используем формулу (4.5):

$$R_{\text{из}} = \frac{0,05}{0,045} = 1,11 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

9. По таблице 4.2 определяем температуру поверхности теплоизолируемых объектов для аппарата, расположенного в рабочей зоне помещений: $t_{\text{п}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

10. По формуле Линчевского (4.11) рассчитываем общий коэффициент теплоотдачи в окружающую среду конвекцией и излучением:

$$\alpha_{\text{общ}} = 9,74 + 0,07 \cdot (45 - 20) = 11,49 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

11. Термическое сопротивление теплоотдаче на наружной поверхности теплоизоляции рассчитываем по формуле (4.4)

$$R_H = \frac{1}{11,49} = 0,087 \frac{\text{м}^2}{\text{Вт} \cdot \text{°C}}.$$

12. Плотность теплового потока через однослойную теплоизоляционную конструкцию рассчитываем по формуле (4.3):

$$q_F^{\text{из}} = \frac{t_B - t_H}{R_{\text{вн}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{из}} + R_H} = \frac{70 - 20}{0,0033 + 0,000073 + 1,11 + 0,067} = 41,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

13. Для расчета теплового потока через слой теплоизоляции рассчитаем среднюю площадь, через которую проходит теплота:

$$F_{\text{из}} = \pi \left(DH + 2 \cdot \frac{D^2}{4} \right) = \pi \left(2,1 \cdot 4,5 + 2 \cdot \frac{2,1^2}{4} \right) = 36,62 \text{ м}^2,$$

где $D = 2 + 2 \cdot 0,05 = 2,1$ м – наружный диаметр теплоизолированного аппарата.

6. Тепловой поток через теплоизоляцию:

$$Q_{\text{из}} = qF = 41,7 \cdot 36,62 = 1524 \text{ Вт} = 1,5247 \text{ кВт}.$$

7. После теплоизоляции тепловые потери уменьшились на

$$\Delta = \frac{Q - Q_{\text{из}}}{Q} \cdot 100\% = \frac{24,554 - 1,5247}{24,554} \cdot 100\% = 94\%.$$

4.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Рассчитать термическое сопротивление двухслойной плоской изоляции, первый слой которой толщиной 120 мм состоит из супертонкого базальтового волокна, второй слой толщиной 60 мм состоит из пенополиуретана. Расчет провести для аппарата, находящегося в помещении с температурой среды внутри изолируемого оборудования 500 °С.

2. Рассчитать термическое сопротивление двухслойной цилиндрической изоляции, первый слой которой толщиной 100 мм состоит из плит минераловатных плотностью 120 кг/м^3 , второй слой толщиной 60 мм состоит из вспененного этиленполипропиленового каучука «Аэрофлекс». Наружный диаметр трубопровода составляет 133 мм. Расчет провести для трубопровода, находящегося на открытом воздухе с температурой среды внутри изолируемого оборудования $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Рассчитать термическое сопротивление двухслойной цилиндрической изоляции, первый слой которой толщиной 30 мм состоит из пенополиуретана плотностью 70 кг/м^3 , второй слой толщиной 20 мм состоит из пенополиэтилена. Наружный диаметр трубопровода составляет 89 мм. Расчет провести для трубопровода, находящегося в помещении с температурой среды внутри изолируемого оборудования $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Определить необходимую толщину слоя изоляции аппарата, внутри которого температура $450 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве теплоизоляционного материала использовать плиты минераловатные плотностью 120 кг/м^3 . Аппарат расположен в рабочей зоне помещений. Коэффициент теплоотдачи от среды внутри аппарата к стенке аппарата равен $100 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$.

5. Определить необходимую толщину слоя изоляции аппарата, внутри которого температура $120 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве теплоизоляционного материала использовать вспененный этиленполипропиленовый каучук «Аэрофлекс». Аппарат расположен в рабочей зоне помещений. Коэффициент теплоотдачи от среды внутри аппарата к стенке аппарата равен $300 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$.

6. Определить необходимую толщину слоя изоляции аппарата, внутри которого температура $70 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве теплоизоляционного материала использовать пенополистирол плотностью 100 кг/м^3 . Аппарат расположен в рабочей зоне помещений. Коэффициент теплоотдачи от среды внутри аппарата к стенке аппарата равен $250 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$.

7. Определить необходимую толщину слоя изоляции аппарата, внутри которого температура $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве теплоизоляционного материала использовать вату из супертонкого базальтового волокна. Аппарат расположен в рабочей зоне помещений. Коэффициент теплоотдачи от среды аппарата к стенке аппарата равен $120\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

8. Определить потери теплоты (тепловой поток через теплоизоляцию). Аппарат диаметром $2,8\text{ м}$ высотой $4,5\text{ м}$ со слоем теплоизоляции на основе ваты из супертонкого базальтового волокна толщиной 80 мм . Температура стенки аппарата $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура наружной поверхности изоляции $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. Определить потери теплоты (тепловой поток через теплоизоляцию). Аппарат диаметром $1,2\text{ м}$, высотой $2,0\text{ м}$ со слоем теплоизоляции из пенополистирола плотностью $100\text{ кг}/\text{м}^3$, толщиной 60 мм . Температура стенки аппарата $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура наружной поверхности изоляции $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

10. Определить потери теплоты (тепловой поток через теплоизоляцию). Аппарат диаметром $4,0\text{ м}$, высотой 8 м со слоем теплоизоляции из ваты из супертонкого стеклянного волокна толщиной 120 мм . Температура стенки аппарата $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура наружной поверхности изоляции $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

11. Определить необходимую толщину слоя изоляции паропровода, по которому транспортируется водяной пар температурой $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Паропровод установлен на улице. В качестве теплоизоляционного материала использовать маты минераловатные прошивные плотностью $150\text{ кг}/\text{м}^3$. Паропровод изготовлен из стали (Ст3) с наружным диаметром 140 мм и толщиной стенки $5,5\text{ мм}$. Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке паропровода равен $10\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

12. Определить необходимую толщину слоя изоляции трубопровода, по которому транспортируется горячая вода температурой $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Трубопровод установлен в помещении. В качестве теплоизоляционного материала использовать маты из супертонкого стекловолокна. Трубопровод изготовлен из стали (Ст3) с наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 3 мм . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубопровода равен $2000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

13. Определить необходимую толщину слоя изоляции паропровода, по которому транспортируется водяной пар температурой $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Паропровод установлен в помещении. В качестве теплоизоляционного материала использовать вспененный этиленпропиленовый каучук «Аэрофлекс». Паропровод изготовлен из стали (Ст3) с наружным диаметром $88,5\text{ мм}$ и толщиной стенки $4,5\text{ мм}$. Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке паропровода равен $8,5\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

14. Определить необходимую толщину слоя изоляции трубопровода, по которому транспортируется теплоноситель температурой $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Трубопровод установлен в помещении. В качестве теплоизоляционного материала использовать пенополиэтилен. Трубопровод изготовлен из стали (Ст3) с наружным диаметром $48,0\text{ мм}$ и толщиной стенки 3 мм . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубопровода равен $2,5\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

15. Определить тепловые потери через стенки аппарата диаметром $1,6\text{ м}$, высотой $2,2\text{ м}$, изготовленного из стали (Ст3) толщиной 10 мм , внутри которого находится раствор температурой $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. На сколько уменьшатся тепловые потери, если аппарат теплоизолировать вспененным этиленпропиленовым каучуком «Аэрофлекс» толщиной 40 мм ? Аппарат находится в помещении, коэффициент теплоотдачи от реакционного раствора к стенке аппарата равен $200\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$, коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата в окружающую среду $10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, температура окружающей среды $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

16. Определить тепловые потери через стенки аппарата диаметром $1,2\text{ м}$, высотой $1,8\text{ м}$, изготовленного из стали (Ст3) толщиной 10 мм , внутри которого находится раствор температурой $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. На сколько уменьшатся тепловые потери, если аппарат теплоизолировать матами из супертонкого стеклянного волокна 80 мм ? Аппарат находится в помещении, коэффициент теплоотдачи от реакционного раствора к стенке аппарата равен $400\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$, коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата в окружающую среду $12\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, температура окружающей среды $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

17. Определить тепловые потери через стенки аппарата диаметром 1,8 м, высотой 3,2 м, изготовленного из стали (Ст3) толщиной 8 мм, внутри которого происходит синтез при температуре 120 °С. На сколько уменьшатся тепловые потери, если аппарат теплоизолировать пенополиуретаном толщиной 80 мм. Аппарат находится в помещении, коэффициент теплоотдачи от реакционного раствора к стенке аппарата равен 350 Вт/(м²·°С), коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата в окружающую среду 12 Вт/(м²·К), температура окружающей среды 25 °С.

5. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ И ТЕПЛООБМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

5.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

Одной из основных энергосберегающих проблем при эксплуатации теплообменного оборудования, котлоагрегатов и транспортировании тепла является снижение тепловой производительности, связанное с падением коэффициентов теплопередачи из-за накопления отложений, в результате чего возрастают потери тепловой энергии и теплоносителя, а также электрической энергии, затрачиваемой на циркуляцию теплоносителя. В процессе эксплуатации теплообменного оборудования его трубки с внутренней, а иногда и с внешней стороны, загрязняются различными видами отложений, в том числе железистыми и карбонатными (накипь), что связано с неудовлетворительным качеством исходной воды (повышенная жесткость, сниженное рН, превышение содержания растворенного кислорода), а также с коррозией трубопроводов.

С ростом толщины отложений на стенках теплопередающего оборудования и труб величина тепловых потерь постепенно повышается.

Для расчета тепловых потерь при образовании отложений используют следующие формулы. Коэффициент теплопередачи K , Вт/(м²·°С) через n -слойную плоскую стенку рассчитывается по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}}; \quad (5.1)$$

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (5.2)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхности n -слойной плоской стенки, Вт/(м²·°C); $\sum_{i=1}^n R_i$ – полное термическое сопротивление n -слойной плоской стенки, сумма термических сопротивлений всех слоев, из которых состоит стенка, включая слой загрязнений (м²·°C/Вт), R_i рассчитывается по формуле (5.2); δ_i – толщина n -го слоя стенки, слоя загрязнений, м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала n -го слоя стенки, загрязнений, Вт/(м·°C) (табл. 5.1).

Поверхностная плотность теплового потока q_F , Вт/м², через n -слойную плоскую стенку рассчитывается по формуле

$$q_F = K(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (5.3)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура среды внутри оборудования, °C; $t_{\text{н}}$ – температура окружающей среды, °C.

Коэффициент теплопередачи K_L , Вт/(м·°C) через n -слойную цилиндрическую стенку рассчитывается по формуле

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_{\text{н}} \alpha_{\text{н}}} + \sum_{i=1}^n R_i^L + \frac{1}{\pi d_{\text{вн}} \alpha_{\text{вн}}}}; \quad (5.4)$$

$$R_i^L = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{\text{н}}^i}{d_{\text{вн}}^i}, \quad (5.5)$$

где $d_{\text{вн}}$, $d_{\text{н}}$ – внутренний и наружный диаметр n -слойной стенки, м; $\sum_{i=1}^n R_i^L$ – полное линейное термическое сопротивление n -слойной цилиндрической стенки, сумма линейных термических сопротивлений всех слоев, из которых состоит стенка, включая слой загрязнений, (м·°C/Вт), R_i^L рассчитывается по формуле (5.5); $d_{\text{н}}^i$, $d_{\text{вн}}^i$ – внутренний и наружный диаметр n -го слоя стенки, м;

Линейная плотность теплового потока q_L , Вт/м, через n -слойную цилиндрическую стенку рассчитывается по формуле

$$q_L = K_L(t_B - t_H), \quad (5.6)$$

где t_B – температура среды внутри оборудования, °С; t_H – температура окружающей среды, °С.

Для расчета процесса теплоотдачи между плоской поверхностью стенки аппарата или слоя отложения и средой используется уравнение

$$q_F = \alpha \Delta t, \quad \Delta t = |t_{ст} - t_{ср}|, \quad (5.7)$$

где $t_{ст}$ – температура внутренней или наружной стенки аппарата / слоя отложений ($t_{ст}^{BH}$, $t_{ст}^H$); $t_{ср}$ – температура среды внутри оборудования или температура окружающей среды соответственно (t_B или t_H).

Для расчета процесса теплопроводности через плоскую стенку аппарата или слоя отложения используется уравнение

$$q_F = \frac{\Delta t}{R_i}, \quad \Delta t = |t_i^{BH} - t_i^H|, \quad (5.8)$$

где t_i^{BH} – температура внутренней стенки аппарата / слоя отложений; t_i^H – температура наружной стенки аппарата / слоя отложений, °С.

Плотность теплового потока в стационарном процессе теплопередачи через n -слойную плоскую стенку (q_F , Вт/м²) равна плотности теплового потока, проходящего через слой плоской стенки, рассчитываемой по формуле (5.8) и плотности теплового потока при теплоотдаче в среде, рассчитываемой по формуле (5.7).

Трубопроводы систем отопления в зданиях, где не проводятся профилактические работы более 10 лет, на 40...50% забиты оксидами и солями металлов. Накипь создает термическое сопротивление теплоносителю. Поскольку теплопроводность накипи в 40 – 50 раз ниже теплопроводности металла (табл. 5.1)

в системах отопления, отложения толщиной всего 1 мм снижают теплопередачу на 15%. Если процесс не остановить вовремя, произойдет выход из строя теплообменников, трубопроводов, отопительных приборов.

Для нормальной и эффективной работы теплообменного оборудования требуется периодическая очистка их теплообменных поверхностей. Из всех существующих методов, связанных с профилактическими работами по поддержанию теплового оборудования в рабочем состоянии, применяются:

- механическая очистка;
- химическая промывка;
- гидравлическая промывка.

В настоящее время накипь удаляется, как правило, с помощью химической промывки с использованием кислотных и щелочных реагентов. Данные реагенты негативно влияют на трубы, так как вступают в реакцию с металлом, что приводит к его разрушению. Кроме того, метод имеет недостатки, связанные со значительным расходом дорогостоящих реагентов, а также с необходимостью нейтрализации сточных вод после очистки. В связи с этим использование химической промывки оправдано в трубопроводах, доступ к которым ограничен, когда невозможно применить гидродинамические средства или добраться до отложений с помощью механических инструментов.

Сущность механической очистки состоит в том, что отложения в трубе очищаются с помощью специальных механических инструментов (ершей, сверл и др.). Данный метод очистки связан с большой трудоемкостью и высокой вероятностью повреждения трубы при чистке.

5.1. Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Накипь, водяной камень	1,163...3,490
Ржавчина (окалина)	1,16
Сталь	47,0...58,0
Чугун	46,5...93,0

В процессе гидравлической промывки поток, подаваемый в оборудование (трубу) под высоким давлением, отрывает отложения от внутренней поверхности трубки.

Менее распространены такие методы очистки оборудования от отложений, как ультразвуковая, электрогидроимпульсная очистка. В основе ультразвуковой очистки лежит возбуждение ультразвуковых колебаний на поверхности трубок и отложений, что приводит к появлению трещин в отложениях и последующему их отделению от металла. Принцип электрогидроимпульсной очистки основан на преобразовании электрической энергии в механическую при высоковольтном разряде в жидкости. Образующиеся ударные волны, скоростные гидротоки, упругие колебания высокой интенсивности, электрическая дуга раскалывают и размельчают отложения.

5.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Рассчитать линейное термическое сопротивление слоя накипи толщиной 2 мм, образовавшейся на внутренней поверхности трубопровода с наружным диаметром 114 мм и толщиной стенки 4 мм. Коэффициент теплопроводности накипи 1,8 Вт/(м·°С). Насколько увеличится линейное термическое сопротивление слоя накипи при увеличении толщины ее слоя на 1 мм.

Решение.

1. Линейное термическое сопротивление слоя накипи толщиной 2 мм, образовавшейся на цилиндрической стенке, рассчитываем по формуле (5.5):

$$R^L = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_H}{d_{BH}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,8} \ln \frac{0,106}{0,102} = 0,0034 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}},$$

где $d_H = 114 - 4 \cdot 2 = 106$ мм = 0,106 м – наружный диаметр слоя накипи;
 $d_{BH} = 106 - 2 \cdot 2 = 102$ мм = 0,102 м – внутренний диаметр слоя накипи.

2. Аналогично рассчитываем линейное термическое сопротивление слоя накипи толщиной 3 мм:

$$R^L = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,8} \ln \frac{0,106}{0,1} = 0,0052 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}},$$

где $d_{\text{н}} = 114 - 4 \cdot 2 = 106$ мм = 0,106 м – наружный диаметр слоя накипи;
 $d_{\text{вн}} = 106 - 2 \cdot 3 = 100$ мм = 0,1 м – внутренний диаметр слоя накипи.

3. Рассчитываем, насколько увеличится линейное термическое сопротивление слоя накипи при увеличении толщины ее слоя на 1 мм (с 2 до 3 мм):

$$\Delta = \frac{0,0052 - 0,0034}{0,0034} \cdot 100\% = 53\%.$$

Задача 2. В котле происходит нагрев воды дымовыми газами, толщина стенки котла 10 мм, температура дымовых газов 1200 °С, температура воды 100 °С. Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке котла 100 Вт/(м²·°С), от стенки к воде 2000 Вт/(м²·°С), коэффициент теплопроводности материала стенки 50 Вт/(м·°С). В процессе эксплуатации поверхность нагрева со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной 2 мм с коэффициентом теплопроводности 0,1 Вт/(м·°С) и со стороны воды – слоем накипи толщиной 4 мм и коэффициентом теплопроводности 1,5 Вт/(м·°С). Определить, насколько уменьшилась тепловая нагрузка котла при образовании отложений на его стенках. Найти температуры на поверхностях стенки чистого котла, а также поверхностях стенки котла и отложений после их образования.

Решение.

1. Коэффициент теплопередачи через плоскую незагрязненную отложениями стенку котла рассчитываем по формуле (5.1):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + R_{CT} + \frac{1}{\alpha_{BH}}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + 0,0002 + \frac{1}{2000}} = 93,46 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}};$$

$$R_{CT} = \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} = \frac{0,01}{50} = 0,0002 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}},$$

где R_{CT} – термическое сопротивление стенки котла.

2. Поверхностную плотность теплового потока q_F , Вт/м², через плоскую незагрязненную отложениями стенку котла рассчитываем по формуле (5.3)

$$q_F = K(t_H - t_B) = 93,46 \cdot (1200 - 100) = 102\,804 \text{ Вт}.$$

3. Коэффициент теплопередачи через плоскую загрязненную отложениями стенку котла рассчитываем по формуле (5.1):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + R_{CT} + R_C + R_H + \frac{1}{\alpha_{BH}}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + 0,0002 + 0,02 + 0,0027 + \frac{1}{2000}} =$$

$$= 29,94 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}};$$

$$R_C = \frac{\delta_C}{\lambda_C} = \frac{0,002}{0,1} = 0,02 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}};$$

$$R_H = \frac{\delta_H}{\lambda_H} = \frac{0,004}{1,5} = 0,0027 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}},$$

где R_C – термическое сопротивление слоя сажи; R_H – термическое сопротивление слоя накипи.

4. Поверхностную плотность теплового потока q_F^* , Вт/м², через плоскую загрязненную отложениями стенку котла рассчитываем по формуле (5.3):

$$q_F^* = K(t_H - t_B) = 29,94 \cdot (1200 - 100) = 32\,934 \text{ Вт}.$$

5. Рассчитываем снижение тепловой нагрузки котла при образовании отложений на его стенках:

$$\Delta = \frac{102\,804 - 32\,934}{102\,804} \cdot 100\% = 68\%.$$

6. Рассчитаем температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки чистого котла.

Температуру наружной поверхности стенки котла (рис. 5.1, а) выразим из уравнения (5.7):

$$q_F = \alpha_H (t_H - t_{CT}^H);$$

$$t_{CT}^H = t_H - \frac{q_F}{\alpha_H} = 1200 - \frac{102\,804}{100} = 172 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

7. Температуру внутренней поверхности стенки котла (рис. 5.1, а) выразим из уравнения (5.8)

$$q_F = \frac{t_{CT}^H - t_{CT}^{BH}}{R_{CT}},$$

$$t_{CT}^{BH} - t_{CT}^B - q_F R_{CT} = 172 - 102\,804 \cdot 0,0002 = 151 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ИЛИ:

Температуру внутренней поверхности стенки котла (рис. 1, а) выразим из уравнения (5.7)

$$q_F = \alpha_{BH} (t_{CT}^{BH} - t_B);$$

$$t_{CT}^{BH} = t_B + \frac{q_F}{\alpha_{BH}} = 100 + \frac{102\,804}{2000} = 151 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Рассчитаем температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки котла и отложений (сажи, накипи) после их образования (рис. 5.1, б).

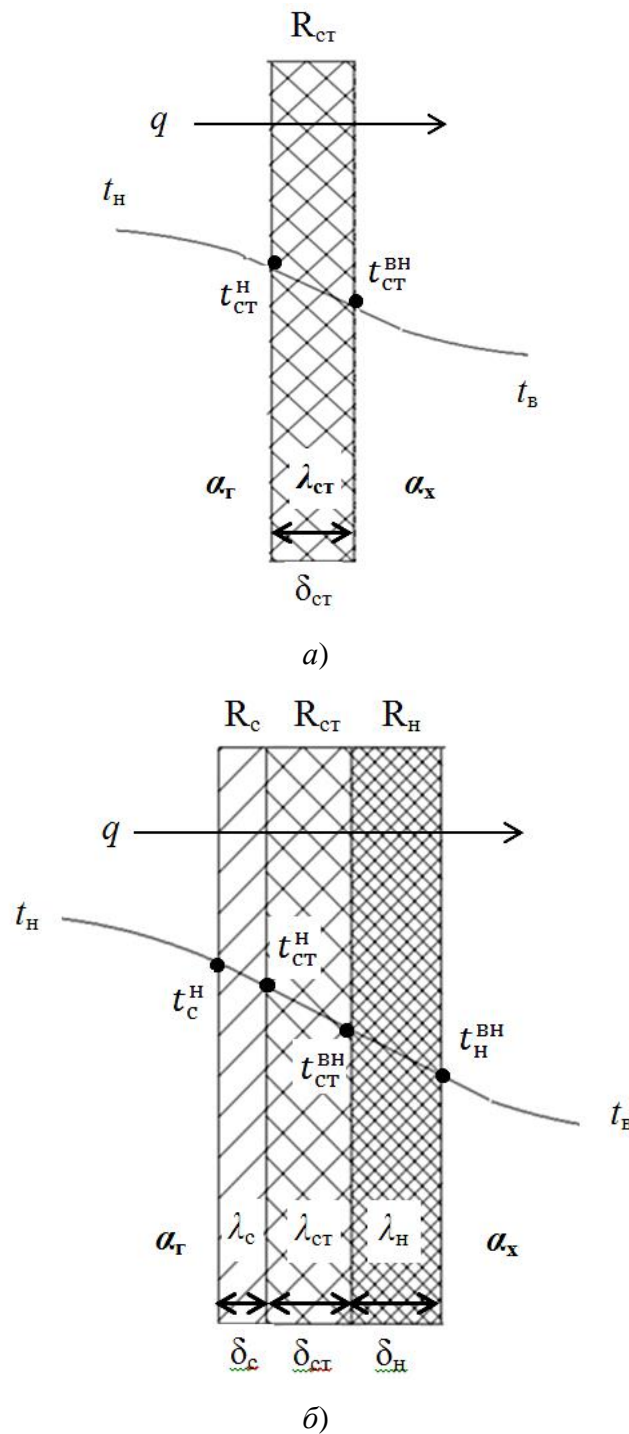


Рис. 5.1. Схема профилей температур к задаче № 2:
a – для чистого котла; *б* – для котла с отложениями

Температуру наружной поверхности слоя сажи t_c^H выразим из уравнения (5.7):

$$q_F = \alpha_H (t_H - t_c^H);$$

$$t_c^H = t_H - \frac{q_F}{\alpha_H} = 1200 + \frac{32\,934}{100} = 871 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

9. Температуру внутренней поверхности слоя накипи t_{H}^{BH} выразим из уравнения (5.7):

$$q_F = \alpha_{\text{BH}} (t_{\text{H}}^{\text{BH}} - t_{\text{B}});$$

$$t_{\text{H}}^{\text{BH}} = t_{\text{B}} - \frac{q_F}{\alpha_{\text{BH}}} = 100 + \frac{32\,934}{2000} = 116 \text{ }^\circ\text{C}.$$

10. Температуру наружной поверхности слоя накипи, равную температуре внутренней поверхности стенки котла $t_{\text{H}}^{\text{H}} = t_{\text{CT}}^{\text{BH}}$, выразим из уравнения (5.8):

$$q_F = \frac{t_{\text{H}}^{\text{H}} - t_{\text{H}}^{\text{BH}}}{R_{\text{H}}},$$

$$t_{\text{H}}^{\text{H}} = t_{\text{CT}}^{\text{BH}} = t_{\text{H}}^{\text{BH}} + q_F R_{\text{H}} = 116 + 32\,934 \cdot 0,0027 = 205 \text{ }^\circ\text{C}.$$

11. Температуру наружной поверхности стенки котла, равную температуре внутренней поверхности слоя сажи $t_{\text{CT}}^{\text{H}} = t_{\text{C}}^{\text{BH}}$, выразим из уравнения (5.8):

$$q_F = \frac{t_{\text{CT}}^{\text{H}} - t_{\text{CT}}^{\text{BH}}}{R_{\text{CT}}},$$

$$t_{\text{CT}}^{\text{H}} = t_{\text{C}}^{\text{BH}} = t_{\text{CT}}^{\text{BH}} + q_F R_{\text{CT}} = 205 + 32\,934 \cdot 0,0002 = 212 \text{ }^\circ\text{C}$$

ИЛИ:

$$q_F = \frac{t_{\text{C}}^{\text{H}} - t_{\text{C}}^{\text{BH}}}{R_{\text{C}}},$$

$$t_{\text{C}}^{\text{BH}} = t_{\text{CT}}^{\text{H}} = t_{\text{C}}^{\text{H}} - q_F R_{\text{C}} = 871 - 32\,934 \cdot 0,02 = 212 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задача 3. В трубах отопления находится горячая вода температурой $70 \text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Труба изготовлена из чугуна с наружным диаметром 100 мм и толщиной стенки 5 мм . В процессе эксплуатации на внутренних стенках трубы образовались отложения накипи толщиной 7 мм с коэффициентом теплопроводности $2,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$. Коэффициенты теплоотдачи от стенки трубы в окружающую среду $25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{}^\circ\text{C)}$, от воды

к ее стенке – $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, коэффициент теплопроводности чугуна принять равным $46,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$. Определить, насколько уменьшилась линейная плотность теплового потока через стенку трубы при образовании отложений.

Решение.

1. Коэффициент теплопередачи через цилиндрическую незагрязненную отложениями стенку трубы рассчитываем по формуле (5.4):

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_{\text{H}}^{\text{CT}} \alpha_{\text{H}}} + R_{\text{CT}}^L + \frac{1}{\pi d_{\text{BH}}^{\text{CT}} \alpha_{\text{BH}}}} = \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot 0,1 \cdot 25} + 0,00036 + \frac{1}{\pi \cdot 0,09 \cdot 3000}} =$$

$$= 7,85 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}};$$

$$R_{\text{CT}}^L = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{CT}}} \ln \frac{d_{\text{H}}^{\text{CT}}}{d_{\text{BH}}^{\text{CT}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 46,5} \ln \frac{0,1}{0,09} = 0,00036 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}},$$

где R_{CT}^L – линейное термическое сопротивление стенки трубы; $d_{\text{H}}^{\text{CT}} = 100 = 0,1 \text{ м}$; $d_{\text{BH}}^{\text{CT}} = 100 - 2 \cdot 5 = 90 \text{ мм} = 0,09 \text{ м}$ – наружный и внутренний диаметры стенки трубы, м.

2. Линейную плотность теплового потока q_L , Вт/м, через плоскую незагрязненную отложениями стенку трубы рассчитываем по формуле (5.6):

$$q_L = K_L (t_{\text{В}} - t_{\text{H}}) = 7,85 \cdot (70 - 23) = 369 \text{ Вт/м}.$$

3. Коэффициент теплопередачи через цилиндрическую загрязненную накипью стенку трубы рассчитываем по формуле (5.4):

$$K_L^* = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_{\text{H}}^{\text{CT}} \alpha_{\text{H}}} + R_{\text{CT}}^L + R_{\text{H}}^L + \frac{1}{\pi d_{\text{BH}}^{\text{H}} \alpha_{\text{BH}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot 0,1 \cdot 25} + 0,00036 + 0,0128 + \frac{1}{\pi \cdot 0,076 \cdot 3000}} = 7,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}};$$

$$R_H^L = \frac{1}{2\pi\lambda_H} \ln \frac{d_H^H}{d_{BH}^H} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,1} \ln \frac{0,09}{0,076} = 0,0128 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}},$$

где R_H^L – линейное термическое сопротивление слоя накипи; $d_H^H = d_{BH}^{CT} = 0,09$ м; $d_{BH}^H = 90 - 2 \cdot 7 = 76$ мм = 0,076 м – наружный и внутренний диаметры слоя накипи, м.

4. Линейную плотность теплового потока q_L , Вт/м, через плоскую загрязненную отложениями стенку трубы рассчитываем по формуле (5.6):

$$q_L = K_L(t_B - t_H) = 7,06 \cdot (70 - 23) = 332 \text{ Вт/м.}$$

5. Рассчитываем, насколько уменьшилась линейная плотность теплового потока через стенку трубы при образовании отложений:

$$\Delta = \frac{369 - 332}{369} \cdot 100\% = 10\%.$$

Задача 4. Известно, что тепловая нагрузка котла для нагрева воды после образования накипи снизилась на 20%. Рассчитать толщину накипи, приняв ее коэффициент теплопроводности 2,5 Вт/(м·°С). Нагрев воды происходит дымовыми газами температурой 1000 °С, толщина стенки котла 8 мм, температура воды 80 °С. Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке котла 80 Вт/(м²·°С), от стенки к воде – 1500 Вт/(м²·°С), коэффициент теплопроводности материала стенки 50 Вт/(м·°С).

Решение.

1. Коэффициент теплопередачи через плоскую незагрязненную накипью стенку котла рассчитываем по формуле (5.1):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + R_{CT} + \frac{1}{\alpha_{BH}}} = \frac{1}{\frac{1}{80} + 0,00016 + \frac{1}{1500}} = 78,57 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}};$$

$$R_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0,008}{50} = 0,00016 \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}},$$

где $R_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление стенки котла.

2. Поверхностную плотность теплового потока q_F , Вт/м², через плоскую незагрязненную накипью стенку котла рассчитываем по формуле (5.3):

$$q_F = K(t_{\text{н}} - t_{\text{в}}) = 78,57 \cdot (1000 - 80) = 72\,287 \text{ Вт}.$$

3. Рассчитываем поверхностную плотность теплового потока q_F^* , Вт/м², через плоскую загрязненную накипью стенку котла:

$$q_F^* = q - \frac{\Delta q}{100} = 72\,287 - \frac{20 \cdot 72\,287}{100} = 57\,830 \text{ Вт}.$$

4. Из формулы (5.3) выражаем и рассчитываем коэффициент теплопередачи через плоскую загрязненную отложениями стенку котла:

$$K = \frac{q_F}{(t_{\text{н}} - t_{\text{в}})} = \frac{57\,830}{(1000 - 80)} = 62,86 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}.$$

5. Из формулы (5.1) выражаем и рассчитываем термическое сопротивление накипи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{н}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} - R_{\text{ст}} = \frac{1}{62,86} - \frac{1}{80} - \frac{1}{1500} - 0,00016 = 0,0026 \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}.$$

6. Из формулы (5.2) выразим и рассчитаем толщину накипи:

$$\delta_{\text{н}} = R_{\text{н}} \lambda_{\text{н}} = 0,0026 \cdot 2,5 = 0,0065 \text{ м} = 6,5 \text{ мм}.$$

Задача 5. Определить, насколько снизился коэффициент теплопередачи через трубку теплообменника диаметром $40 \times 2,5$ мм при образовании на внутренней поверхности трубки накипи толщиной 1 мм с коэффициентом теплопроводности $1,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Коэффициенты теплоотдачи от стенки трубки в межтрубное пространство $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, от среды внутри трубки к ее стенке – $6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, коэффициент теплопроводности материала стенки трубки $50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Решение.

1. Коэффициент теплопередачи K_L , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, через незагрязненную стенку трубки рассчитываем по формуле (5.4):

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_H^{\text{CT}} \alpha_H} + R_{\text{CT}}^L + \frac{1}{\pi d_{\text{BH}}^{\text{CT}} \alpha_{\text{BH}}}} = \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot 0,04 \cdot 3000} + 0,00043 + \frac{1}{\pi \cdot 0,035 \cdot 6000}} =$$

$$= 217,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$R_{\text{CT}}^L = \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{CT}}} \ln \frac{d_H^{\text{CT}}}{d_{\text{BH}}^{\text{CT}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \ln \frac{0,04}{0,035} = 0,00043 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}},$$

где R_{CT}^L – линейное термическое сопротивление стенки трубки; $d_H^{\text{CT}} = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$; $d_{\text{BH}}^{\text{CT}} = 40 - 2 \cdot 2,5 = 35 \text{ мм} = 0,035 \text{ м}$ – наружный и внутренний диаметры стенки трубки, м.

2. Коэффициент теплопередачи K_L , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, через загрязненную накипью стенку трубки рассчитываем аналогично по формуле (5.4):

$$K_L^* = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_H^{\text{CT}} \alpha_H} + R_{\text{CT}}^L + R_H^L + \frac{1}{\pi d_{\text{BH}}^{\text{CT}} \alpha_{\text{BH}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot 0,04 \cdot 3000} + 0,00043 + 0,0078 + \frac{1}{\pi \cdot 0,033 \cdot 6000}} = 80,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$R_H^L = \frac{1}{2\pi\lambda_H} \ln \frac{d_H^H}{d_{BH}^H} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,2} \ln \frac{0,035}{0,033} = 0,0078 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}},$$

где R_H^L – линейное термическое сопротивление слоя накипи; $d_H^H = d_{BH}^{CT} = 0,035$ м; $d_{BH}^H = 35 - 2 \cdot 1 = 33$ мм = 0,033 м – наружный и внутренний диаметры слоя накипи, м.

3. Рассчитываем, насколько снизился коэффициент теплопередачи через трубку теплообменника при образовании на внутренней поверхности трубки накипи:

$$\Delta = \frac{217,59 - 80,06}{217,59} \cdot 100\% = 63\%.$$

5.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Рассчитать линейное термическое сопротивление двухслойной цилиндрической стенки, состоящей из стального трубопровода с наружным диаметром 60 мм и толщиной 3 мм и слоя накипи толщиной 1,5 мм, образовавшейся на внутренней поверхности трубопровода. Коэффициент теплопроводности накипи 2,5 Вт/(м·°С), коэффициент теплопроводности стенки трубопровода 55 Вт/(м·°С). Насколько увеличится линейное термическое сопротивление при очистке внутренней поверхности трубопровода от накипи.

2. Рассчитать линейное термическое сопротивление слоя накипи толщиной 6 мм, образовавшейся на внутренней поверхности трубопровода с наружным диаметром 140 мм и толщиной стенки 5,5 мм. Коэффициент теплопроводности накипи 1,16 Вт/(м·°С). В процессе дальнейшей эксплуатации трубопровода линейное термическое сопротивление накипи увеличилось еще на 40%. Рассчитать, насколько при этом увеличилась толщина ее слоя.

3. Рассчитать термическое сопротивление трехслойной стенки аппарата, в процессе эксплуатации которого его внешняя поверхность покрылась слоем сажи толщиной 1 мм с коэффициентом теплопроводности 0,08 Вт/(м·°С),

а внутренняя – слоем накипи толщиной 6 мм с коэффициентом теплопроводности $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Толщина стенки аппарата – 10 мм, коэффициент теплопроводности накипи $47,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Насколько увеличится термическое сопротивление при очистке поверхностей аппарата от всех отложений.

4. В котле происходит нагрев воды дымовыми газами, толщина стенки котла 20 мм, температура дымовых газов 1300°C , температура воды 100°C . Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке котла $120 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, от стенки к воде – $2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, коэффициент теплопроводности материала стенки $55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. В процессе эксплуатации поверхность нагрева со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной 3 мм с коэффициентом теплопроводности $0,09 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, и со стороны воды – слоем накипи толщиной 5 мм и коэффициентом теплопроводности $2,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Определить, насколько уменьшилась тепловая нагрузка котла при образовании отложений на его стенках. Найти температуры на поверхностях стенки чистого котла, а также поверхностях стенки котла и отложений после их образования.

5. В котле происходит нагрев воды дымовыми газами, толщина стенки котла 8 мм, температура дымовых газов 800°C , температура воды 90°C . Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке котла $60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, от стенки к воде – $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, коэффициент теплопроводности материала стенки $47 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. В процессе эксплуатации внутренняя поверхность котла покрылась слоем накипи с коэффициентом теплопроводности $3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Известно, что после образования слоя накипи тепловая нагрузка котла уменьшилась на 30%. Рассчитать толщину слоя накипи. Найти температуры на поверхностях стенки чистого котла, а также поверхностях стенки котла и накипи после ее образования.

6. В аппарате с рубашкой происходит нагрев реакционного раствора до температуры 70°C водой температурой 100°C . Толщина стенки аппарата 4 мм. Коэффициенты теплоотдачи от воды к стенке аппарата $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, от стенки к воде – $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, коэффициент теплопроводности материала

стенки $50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. В процессе эксплуатации поверхность нагрева со стороны воды покрылась слоем накипи толщиной 3 мм с коэффициентом теплопроводности $1,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Определить, насколько уменьшилась тепловая нагрузка при образовании накипи. Найти температуры на поверхностях стенки чистого аппарата, а также поверхностях стенки и слоя накипи после ее образования.

7. В трубах отопления находится горячая вода температурой $60 \text{ }^\circ\text{С}$, температура окружающей среды $22 \text{ }^\circ\text{С}$. Труба изготовлена из чугуна с наружным диаметром 250 мм и толщиной стенки 10 мм . В процессе эксплуатации на внутренних стенках трубы образовались отложения накипи толщиной 5 мм с коэффициентом теплопроводности $1,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Коэффициенты теплоотдачи от стенки трубы в окружающую среду $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$, от воды к ее стенке – $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$, коэффициент теплопроводности чугуна принять равным $46,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Определить, насколько уменьшилась линейная плотность теплового потока через стенку трубы при образовании отложений.

8. В трубах отопления находится горячая вода температурой $70 \text{ }^\circ\text{С}$, температура окружающей среды $23 \text{ }^\circ\text{С}$. Труба изготовлена из чугуна с наружным диаметром 75 мм и толщиной стенки 5 мм . В процессе эксплуатации на внутренних стенках трубы образовались отложения накипи толщиной 3 мм с коэффициентом теплопроводности $1,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Коэффициенты теплоотдачи от стенки трубы в окружающую среду $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$, от воды к ее стенке – $2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$, коэффициент теплопроводности чугуна принять равным $46,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Определить, насколько увеличится линейная плотность теплового потока через стенку трубы при очистке ее внутренней поверхности от накипи.

9. Известно, что тепловая нагрузка котла для нагрева воды после образования накипи снизилась на 50% . Рассчитать толщину накипи, приняв ее коэффициент теплопроводности $1,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Нагрев воды происходит дымовыми газами температурой $1200 \text{ }^\circ\text{С}$, толщина стенки котла 10 мм , температура воды $90 \text{ }^\circ\text{С}$. Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке котла

60 Вт/(м²·°С), от стенки к воде – 2000 Вт/(м²·°С), коэффициент теплопроводности материала стенки 55 Вт/(м·°С).

10. Известно, что тепловая нагрузка котла для нагрева воды после очистки от накипи увеличилась на 40%. Рассчитать толщину накипи, приняв ее коэффициент теплопроводности 1,5 Вт/(м·°С). Нагрев воды происходит дымовыми газами температурой 1500 °С, толщина стенки котла 10 мм, температура воды 100 °С. Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке котла 100 Вт/(м²·°С), от стенки к воде – 3000 Вт/(м²·°С), коэффициент теплопроводности материала стенки 50 Вт/(м·°С).

11. Определить, насколько снизился коэффициент теплопередачи через трубку теплообменника диаметром 25×2 мм при образовании на внешней поверхности трубки накипи толщиной 2 мм с коэффициентом теплопроводности 1,8 Вт/(м·°С). Коэффициенты теплоотдачи от стенки трубки в межтрубное пространство 2000 Вт/(м²·°С), от среды внутри трубки к ее стенке – 5000 Вт/(м²·°С), коэффициент теплопроводности материала стенки трубки 55 Вт/(м·°С).

12. Определить, насколько снизился коэффициент теплопередачи через трубку теплообменника диаметром 56×2,5 мм при образовании на внутренней поверхности трубки накипи толщиной 2 мм и на внешней поверхности трубки – толщиной 1,5 мм с коэффициентом теплопроводности 1,2 Вт/(м·°С). Коэффициенты теплоотдачи от стенки трубки в межтрубное пространство 2500 Вт/(м²·°С), от среды внутри трубки к ее стенке – 4000 Вт/(м²·°С), коэффициент теплопроводности материала стенки трубки 58 Вт/(м·°С).

6. РАСЧЕТ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ

6.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

Использование тепловых аккумуляторов в системах теплоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий и сооружений обусловлено несовпадением периодов поступления от источников бросовой теплоты или теплоты возобновляемых источников и ее потреблением. Кроме того, аккумулярование позволяет эффективно использовать теплоту, которая может быть потеряна или использована частично.

Тепловые аккумуляторы разделяются на три группы. Первую группу составляют аккумуляторы явной (физической) теплоты. Аккумулярование физической теплоты обусловлено способностью теплоаккумулирующего материала (ТАМ) повышать температуру при ее подводе. Эффективность аккумулярования определяется удельной теплоемкостью (C , Дж/(кг·°C)) материала и его плотностью (ρ , кг/м³).

Количество накапливаемой аккумулятором $Q_{ак}$, Дж, теплоты при нагреве теплоемкостного ТАМ от t_n до t_k , °C, можно найти по формуле

$$Q_{ак} = Cm(t_k - t_n), \quad Q_{ак} = C_V V(t_k - t_n), \quad (6.1)$$

где m – масса ТАМ, кг; C_V – объемная теплоемкость ТАМ, Дж/(м³·°C); V – объем ТАМ, м³.

В инженерной практике такого типа тепловые аккумуляторы на основе воды являются наиболее распространенными. Вода – наиболее дешевый и повсеместно распространенный ТАМ с высокой удельной теплоемкостью, равной 4,2 кДж/(кг·°C), что почти вдвое выше, чем удельная теплоемкость камня (табл. 6.1). Водяные баки-аккумуляторы из металла или железобетона применяются для создания надземных или заглубленных в землю хранилищ.

6.1. Характеристики теплоемкостных ТАМ

ТАМ	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	Объемная теплоемкость, кДж/(дм ³ ·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
<i>Твердые</i>			
Хлорид натрия	0,92		9
Камень	0,79		2,7
Кирпич	0,84		0,6
Земля (сухая)	0,79		1,0
<i>Жидкие</i>			
Вода	4,2	4,2	
Диэтиленгликоль	2,8	2,9	

К недостаткам всех теплоемкостных теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) можно отнести сравнительно низкую теплоаккумулирующую способность и непостоянство температуры зарядки и разрядки теплового аккумулятора.

Ко второй группе относятся тепловые аккумуляторы фазового перехода, в которых происходят реверсивные фазовые превращения первого и второго рода. Фазовые переходы первого рода – плавление и затвердевание ТАМ, а второго рода – испарение и конденсация ТАМ при подводе и отводе теплоты. Фазовые переходы сопровождаются поглощением и выделением теплоты плавления или парообразования (удельная теплота фазового перехода H , Дж/кг). Кроме того, фазовые переходы могут быть связаны со структурными превращениями (например, переход из одной кристаллической модификации вещества в другую – сульфат лития Li_2SO_4 при 578 °С переходит из моноклинной в гранецентрированную кубическую структуру со скрытой теплотой перехода 214 кДж/кг), а также изменением кристаллически связанной воды.

В фазовых тепловых аккумуляторах накопление энергии происходит в результате плавления и затвердевания, испарения и конденсации ТАМ, сопровождающихся поглощением и выделением скрытой теплоты. В фазовых

аккумуляторах теплоты в качестве ТАМ используются гидраты солей или органические вещества (табл. 6.2).

Количество накапливаемой аккумулятором теплоты $Q_{ак}$, Дж, при нагреве фазопереходного ТАМ от t_n до t_k , включая температуру плавления $t_{фп}$, можно найти по формуле

$$Q_{ак} = m [C_{тв} (t_{фп} - t_n) + H + C_{ж} (t_k - t_{фп})], \quad (6.2)$$

где $C_{тв}$, $C_{ж}$ – теплоемкость ТАМ в твердом и жидком состоянии, Дж/(кг·°C).

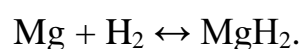
При использовании теплоты плавления ТАМ обеспечиваются высокая плотность запасаемой энергии, небольшие перепады температур и стабильная температура на выходе из теплового аккумулятора. По сравнению с аккумуляторами явной энергии фазовые аккумуляторы имеют меньшие объемы. Недостатком аккумуляторов с фазовым переходом является то, что для каждой задаваемой температуры в них надо использовать новое рабочее вещество с соответствующей температурой фазового перехода.

6.2. Характеристики фазопереходных ТАМ

ТАМ	Температура плавления, °C	Удельная теплота фазового перехода, кДж/кг	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)		Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C)	
				тв.	жидк.	тв.	жидк.
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29,0	174	1634	0,15		1,26	2,14
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,0	251	1458	–	–	1,93	
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	35,5	265	1520	0,51	0,43	1,68	1,93
Лауриновая кислота C ₁₂ H ₂₄ O ₂	44,0	175	910	0,4	0,2	–	–
Парафин 46-48	47,0	209	800	0,23	0,15	2,9	2,1
Парафин 50-52	51,0	189	800	0,15		2,10	
Миристиновая кислота C ₁₄ H ₁₈ O ₂	53,5	195	870	0,14		2,10	
Парафин 54-56	55,0	218	800	0,15		2,10	
Пальмитиновая кислота C ₁₆ H ₃₂ O ₂	61,0	196	880	0,14		2,0	2,26

Третью группу составляют химические тепловые аккумуляторы. В аккумуляторах этой группы происходят реверсивные химические реакции разложения и синтеза, сопровождающиеся поглощением и выделением теплоты. К таким химическим реакциям, например, относятся обратимые реакции гидратации и сольватации солей и кислот, взаимодействия металлов с водородом и др.

Экзотермическая и эндотермическая реакции в химических теплоаккумуляторах, снаряженных твердыми материалами, выглядят, например, следующим образом:



При одинаковом объеме некоторые гидриды способны аккумулировать в 7 – 15 раз большее количество теплоты, чем вода. Одним из преимуществ химического способа аккумулирования теплоты является то, что запасенная энергия хранится длительное время без применения тепловой изоляции и может быть транспортирована на значительные расстояния.

Система аккумулирования теплоты эксплуатируется во взаимодействии с источником энергии и ее потребителем и включает следующие компоненты:

- сосуд или резервуар для ТАМ с теплоизоляцией;
- ТАМ, в котором накапливается и хранится теплота;
- теплообменное оборудование, предназначенное для передачи теплоты от источника энергии к ТАМ при зарядке теплового аккумулятора и от ТАМ к потребителю при разрядке теплового аккумулятора.

6.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором вместимостью 230 л воды при ее нагреве от 15 до 50 °С. Рассчитать, за какое время зарядится тепловой аккумулятор при тепловой мощности источника альтернативной энергии 1200 Вт.

Решение.

1. По таблице 6.1 определяем объемную теплоемкость воды $C_V = 4,2$ кДж/(дм³·°С). Количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором рассчитываем по формуле (6.1):

$$Q_{\text{ак}} = C_V V (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = 4,2 \cdot 230 \cdot (50 - 15) = 33\,810 \text{ кДж},$$

где $V = 230$ л = 230 дм³.

2. Рассчитываем, за какое время зарядится тепловой аккумулятор:

$$\tau = Q_{\text{ак}} / W = 33\,810\,000 / 1200 = 28\,175 \text{ с} = 7,8 \text{ ч}.$$

Задача 2. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой в пруду-аккумуляторе вместимостью 45 тыс. м³, наполненном 20%-ным водным раствором хлорида натрия при его нагреве от 10 до 50 °С.

Решение.

1. Удельную теплоемкость 20% водного раствора хлорида натрия рассчитываем по формуле

$$C = w_1 C_1 + w_2 C_2 = 0,2 \cdot 0,92 + 0,8 \cdot 4,2 = 3,5 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)},$$

где w_1, w_2 – массовая доля хлорида натрия и воды соответственно; C_1, C_2 – удельная теплоемкость хлорида натрия и воды соответственно (табл. 7.1).

2. Рассчитываем массу водного раствора хлорида натрия в пруду-аккумуляторе:

$$m = \rho V = 1147 \cdot 45\,000 = 5\,211\,500 \text{ кг},$$

где $\rho = 1147$ кг/м³ – плотность 20%-ного водного раствора хлорида натрия.

3. Количество теплоты, накапливаемой в пруду-аккумуляторе, рассчитываем по формуле (6.1):

$$Q_{\text{ак}} = C m (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = 3,5 \cdot 5\,211\,500 \cdot (50 - 10) = 802\,900\,000 \text{ кДж} = 802\,900 \text{ МДж}.$$

Задача 3. Рассчитать объем резервуаров теплового аккумулятора для накопления 10 000 кДж тепловой энергии при нагреве ТАМ от 15 до 40 °С.

В качестве ТАМ использовать камни и кирпич. Сравнить полученный объем резервуаров для ТАМ. Насыпная плотность камня 1350 кг/м³, истинная плотность камня – 2620 кг/м³. Насыпная плотность кирпича 1700 кг/м³, истинная плотность кирпича – 2800 кг/м³.

Решение.

1. Рассчитываем объемную долю пустот (заполненных преимущественно воздухом) в камне (П1) и кирпиче (П2)

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \left(1 - \frac{\rho_1^{\text{нас}}}{\rho_1^{\text{ист}}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1350}{2620}\right) \cdot 100 = 48,5\%, \\ \Pi_2 &= \left(1 - \frac{\rho_2^{\text{нас}}}{\rho_2^{\text{ист}}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1700}{2800}\right) \cdot 100 = 39,3\%, \end{aligned}$$

где $\rho_1^{\text{нас}}$ и $\rho_2^{\text{нас}}$ – насыпная плотность камня и кирпича соответственно; $\rho_1^{\text{ист}}$ и $\rho_2^{\text{ист}}$ – истинная плотность камня и кирпича соответственно.

2. Учитывая невысокую массовую долю воздуха в камне и кирпиче (w_{B1} , w_{B2}), удельную теплоемкость камня (C_1) и кирпича (C_2) принимаем равными $C_1 = 0,79$ кДж/(кг·°С), $C_2 = 0,84$ кДж/(кг·°С) (табл. 6.1).

$$\begin{aligned} w_B^1 &= \frac{\frac{\Pi}{100} \rho_B}{\frac{\Pi}{100} \rho_B + \left(1 - \frac{\Pi}{100}\right) \rho_1^{\text{ист}}} \cdot 100 = \frac{\frac{48,5}{100} \cdot 1,2}{\frac{48,5}{100} \cdot 1,2 + \left(1 - \frac{48,5}{100}\right) \cdot 2620} \cdot 100 = 0,04, \\ w_B^2 &= \frac{\frac{\Pi}{100} \rho_B}{\frac{\Pi}{100} \rho_B + \left(1 - \frac{\Pi}{100}\right) \rho_2^{\text{ист}}} \cdot 100 = \frac{\frac{39,3}{100} \cdot 1,2}{\frac{48,5}{100} \cdot 1,2 + \left(1 - \frac{39,3}{100}\right) \cdot 2800} \cdot 100 = 0,02, \end{aligned}$$

ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

3. Выразим из формулы (6.1) и рассчитаем массу камня (m_1) и кирпича (m_2), необходимую для аккумуляирования 100 000 кДж тепловой энергии при нагреве

$$m_1 = \frac{Q_{\text{ак}}}{C_1(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})} = \frac{100\,000}{0,79 \cdot (40 - 15)} = 5064 \text{ кг},$$

$$m_2 = \frac{Q_{\text{ак}}}{C_2(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})} = \frac{100\,000}{0,84 \cdot (40 - 15)} = 4762 \text{ кг}.$$

4. Рассчитываем объем резервуаров для камня (V1) и кирпича (V2)

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho_1^{\text{нас}}} = \frac{5064}{1350} = 3,8 \text{ м}^3, \quad V_2 = \frac{m_2}{\rho_2^{\text{нас}}} = \frac{4762}{1700} = 2,8 \text{ м}^3.$$

При использовании в качестве ТАМ кирпича резервуар теплового аккумулятора будет меньшего объема.

Задача 4. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором в виде теплоаккумулирующего блока, состоящего из цилиндров, заполненных кристаллогидратом хлористого кальция $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (см. рис.). Габаритные размеры резервуара теплоаккумулирующего блока $L \times B \times H$: $1800 \times 1000 \times 2000$ мм, степень заполнения резервуара ТАМ – 40%. Нагрев ТАМ происходит в интервале температур от $+10$ до $+35$ °С.

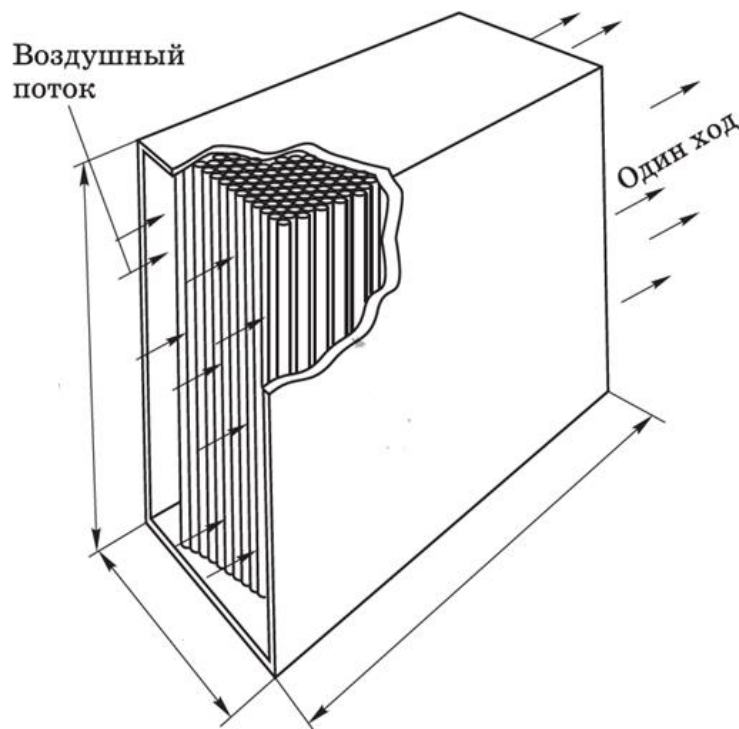


Рисунок к примеру 4

Решение.

1. Рассчитываем объем, занимаемый ТАМ:

$$V = \varphi LBH = 0,4 \cdot 1,8 \cdot 1 \cdot 2 = 1,44 \text{ м}^3,$$

где φ – степень заполнения резервуара ТАМ.

2. Рассчитываем массу ТАМ

$$m = \rho V = 1634 \cdot 1,44 = 2353 \text{ кг},$$

где ρ определяем по табл. 6.2.

3. Количество теплоты, накапливаемой в теплоаккумулирующем блоке, рассчитываем по формуле (6.2):

$$\begin{aligned} Q_{\text{ак}} &= m[C_{\text{ТВ}}(t_{\text{фп}} - t_{\text{н}}) + H + C_{\text{ж}}(t_{\text{к}} - t_{\text{фп}})] = \\ &= 2353 \cdot [1,26(29,0 - 10) + 174 + 2,14 \cdot (35 - 29)] = 495\,965,34 \text{ кДж}, \end{aligned}$$

где $C_{\text{ТВ}}$, $t_{\text{фп}}$, H , $C_{\text{ж}}$ определяем по табл. 6.2.

Задача 5. Рассчитать объем резервуаров теплового аккумулятора для накопления 100 мДж теплоты в интервале температур от 10 до 50 °С.

В качестве ТАМ использовать воду и парафин 46-48. Сравнить полученный объем резервуаров для ТАМ.

1. Объем резервуара, занимаемого водой (V_1), выразим из формулы (6.1):

$$V_1 = \frac{Q_{\text{ак}}}{C_V^1(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})} = \frac{100\,000}{4,2 \cdot (50 - 10)} = 595 \text{ дм}^3 = 0,595 \text{ м}^3,$$

где объемную теплоемкость воды $C_V = 4,2 \text{ кДж}/(\text{дм}^3 \cdot ^\circ\text{С})$ определяем по табл. 6.1.

2. Массу парафина 46-48 выразим из формулы (6.2):

$$\begin{aligned} m &= \frac{Q_{\text{ак}}}{C_{\text{ТВ}}(t_{\text{ТВ}} - t_{\text{н}}) + H + C_{\text{ж}}(t_{\text{к}} - t_{\text{фп}})} = \\ &= \frac{100\,000}{2,9 \cdot (47 - 10) + 209 + 2,1 \cdot (50 - 47)} = 310 \text{ кг}, \end{aligned}$$

где $C_{\text{ТВ}}$, $t_{\text{фп}}$, H , $C_{\text{ж}}$ определяем по табл. 6.2.

3. Рассчитываем объем резервуаров для парафина 46-48 (V_2):

$$V_1 = \frac{m}{\rho} = \frac{310}{800} = 0,387 \text{ м}^3.$$

4. При использовании в качестве ТАМ парафина 46-48 резервуар теплового аккумулятора будет меньшего объема, чем при использовании воды на

$$\Delta = (0,595 - 0,387)/0,595 \cdot 100\% = 35\%.$$

6.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором вместимостью 2 м^3 при нагреве ТАМ от 10 до $50 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве ТАМ использовать диэтиленгликоль. Рассчитать, за какое время зарядится тепловой аккумулятор при тепловой мощности источника альтернативной энергии 6 кВт .

2. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором вместимостью 5 м^3 воды при ее нагреве от 20 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Рассчитать, за какое время зарядится тепловой аккумулятор при тепловой мощности источника альтернативной энергии 10 кВт .

3. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой в пруду-аккумуляторе вместимостью $10\,000 \text{ м}^3$, наполненном 10% -ным водным раствором хлорида натрия при его нагреве от 15 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой в тепловом аккумуляторе вместимостью 5 м^3 , наполненном землей при ее нагреве от 5 до $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Влажность земли составляет 15% . Рассчитать, за какое время разрядится тепловой аккумулятор при тепловой мощности расходуемой теплоты 5 кВт .

5. Рассчитать время зарядки теплового аккумулятора с объемом резервуара 5 м^3 при тепловой мощности источника альтернативной энергии 4 кВт . В качестве ТАМ использовать камень насыпной плотностью 1200 кг/м^3 .

Как изменится время зарядки теплового аккумулятора, если в его резервуар засыпать землю влажностью 10% и насыпной плотностью 1800 кг/м^3 ? Нагрев материала происходит от $+10$ до $+40$ °С.

6. Рассчитать, насколько большее количество теплоты накопится в тепловом аккумуляторе, емкость которого заполнена водой, по сравнению с тепловым аккумулятором, емкость которого того же объема заполнена камнем насыпной плотностью 1200 кг/м^3 , при нагреве ТАМ от 15 до 40 °С.

7. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором в виде теплоаккумулирующего блока, на 60% заполненного парафином 46-48. Габаритные размеры резервуара теплоаккумулирующего блока $L \times B \times H$: $800 \times 400 \times 4000$ мм. Нагрев ТАМ происходит в интервале температур от 40 до 50 °С.

8. Рассчитать количество теплоты, накапливаемой тепловым аккумулятором в виде теплоаккумулирующего блока, на 50% заполненного миристиновой кислотой. Аккумулятор имеет цилиндрическую форму, высота цилиндра 1000 мм, диаметр основания 300 мм. Нагрев ТАМ происходит в интервале температур от 40 до 60 °С.

9. Рассчитать объем резервуаров теплового аккумулятора для накопления $5 \cdot 10^8$ Дж теплоты в интервале температур от 10 до 40 °С.

В качестве ТАМ использовать диэтиленгликоль и $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Сравнить полученный объем резервуаров для ТАМ.

10. Рассчитать объем резервуаров теплового аккумулятора для накопления 80 мДж теплоты в интервале температур от 50 до 60 °С.

В качестве ТАМ использовать парафин 54-56 и пальмитиновую кислоту. Сравнить полученный объем резервуаров для ТАМ.

7. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

7.1. ТЕОРИЯ РАСЧЕТА

Для проведения процесса переноса теплоты в парокомпрессионных машинах применяются различные рабочие тела (хладагенты), у которых термодинамические и физические свойства должны удовлетворять ряду требований, зависящих от назначения аппарата, термодинамической схемы, температур горячего и холодного источников тепла, срока службы, бесперебойности работы и сложности ее обслуживания.

Рабочие тела могут быть однородными по составу или представлять собой смесь веществ. В процессе работы парокомпрессионного теплового насоса в хладагенте происходят фазовые превращения.

В качестве рабочих тел в тепловых насосах применяются хладагенты – легкокипящие вещества, которые при атмосферном давлении имеют низкую температуру кипения t_0 . У популярных хладагентов температура кипения составляет от +80 до –130 °С.

При расчетах циклов тепловых насосов для определения параметров хладагента применяются таблицы свойств хладагентов и тепловые диаграммы.

Наиболее удобными для расчетов являются диаграммы: температура–энтропия ($T-s$) и давление–энтальпия ($p-i$).

Диаграмма температура–энтропия (рис. 7.1). В диаграмме $T-s$ по оси абсцисс отложены значения энтропии s . Вертикальные линии постоянной энтропии являются адиабатами. По оси ординат отложены значения температуры T , а горизонтальные линии постоянных T представляют собой изотермы. На сетке из адиабат и изотерм нанесены кривые, характеризующие состояние соответственно жидкости на линии насыщения (степень сухости $x = 0$) и сухого насыщенного пара ($x = 1$).

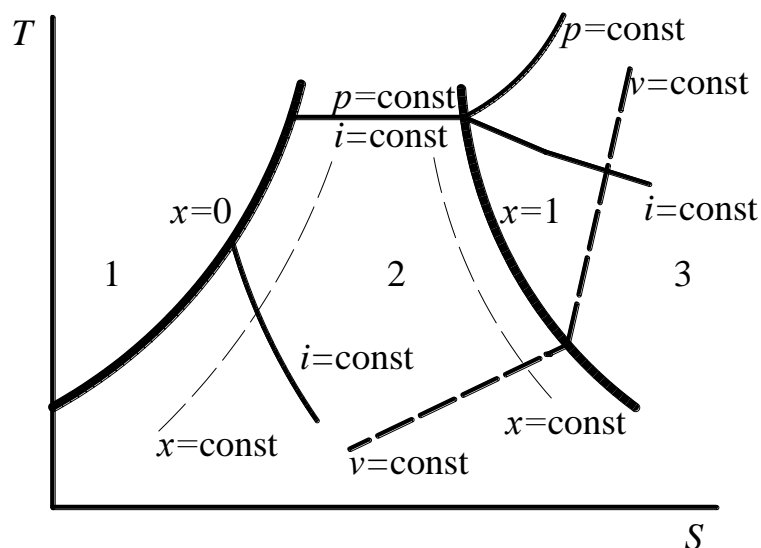


Рис. 7.1. Диаграмма $T-s$

Между этими пограничными кривыми ($0 \leq x \leq 1$) расположена область влажного пара 2. Слева от пограничной кривой $x = 0$ находится область переохлажденной жидкости 1. Справа от пограничной кривой $x = 1$ находится область перегретого пара 3. На диаграмме (рис. 7.1) также нанесены линии постоянных паросодержаний x ; постоянных давлений p (изобары); постоянных удельных объемов v (изохоры); постоянных энтальпий i (изоэнтальпы). В области влажного пара 2 изобара и изотерма проходят по одной линии. В области перегретого пара изобара отделяется от изотермы и резко поднимается вверх.

В диаграмме $T-s$ подведенное и отведенное количество теплоты, затраченная и полученная работа представляют собой площадь под линией процесса.

Диаграмма $\lg p-i$. Сетка диаграммы (рис. 7.2) состоит горизонтальных линий (изобар) и вертикальных линий (изоэнтальп). Для удобства на диаграмме по оси ординат применяется логарифмический масштаб ($\lg p$). На диаграмме нанесены линии постоянных параметров состояния t , s , x и p . Преимуществом диаграммы $\lg p-i$ является то, что теплота и работа для адиабатического процесса изображаются в ней отрезками на оси абсцисс. Теплота, подведенная в изотермическом процессе 1-2, равна разности энтальпий (отрезок 1-2, рис. 7.2).

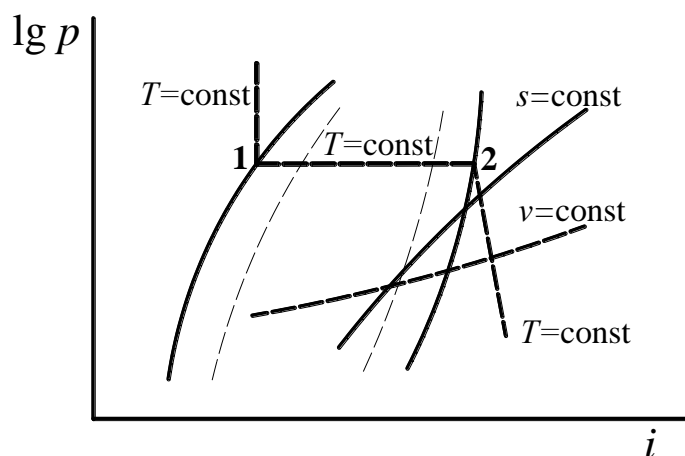


Рис. 7.2. Диаграмма $\lg p-i$

Все процессы в тепловых насосах происходят по обратному термодинамическому циклу. Самым простым и эффективным в термодинамическом отношении циклом теплового насоса с минимальной затратой работы является обратный цикл Карно, который считается идеальным. Считаем, что в процессах теплообмена между рабочим телом и источниками теплоты разности температур бесконечно малы.

На рисунке 7.3 изображена схема идеального теплового насоса, работающего по обратному циклу Карно. На рисунке 7.4 изображен обратный цикл Карно в диаграмме $T-s$, который состоит из следующих процессов.

Изотермический процесс $4-1$. В испарителе (рис. 7.3) к рабочему телу подводится количество теплоты q_H (площадь $4-1-a-b$, рис. 7.4), забираемое у источника теплоты с низкой температурой T_H . Рабочее тело испаряется при низком давлении p_0 и температуре T_0 .

Адиабатический процесс $1-2$. Пары рабочего тела сжимаются компрессором от низкого начального давления p_0 до высокого конечного p_K . При этом температура хладагента повышается от T_0 до температуры источника высокой температуры T_K . На сжатие паров рабочего тела затрачивается работа $l_{сж}$.

Изотермический процесс $2-3$. Из компрессора сжатые пары рабочего тела поступают в конденсатор. Теплота q_K (площадь $2-3-b-a$, рис. 7.4) от рабочего тела отводится источнику высокой температуры T_K , а рабочее тело конденсируется при T_K и p_K .

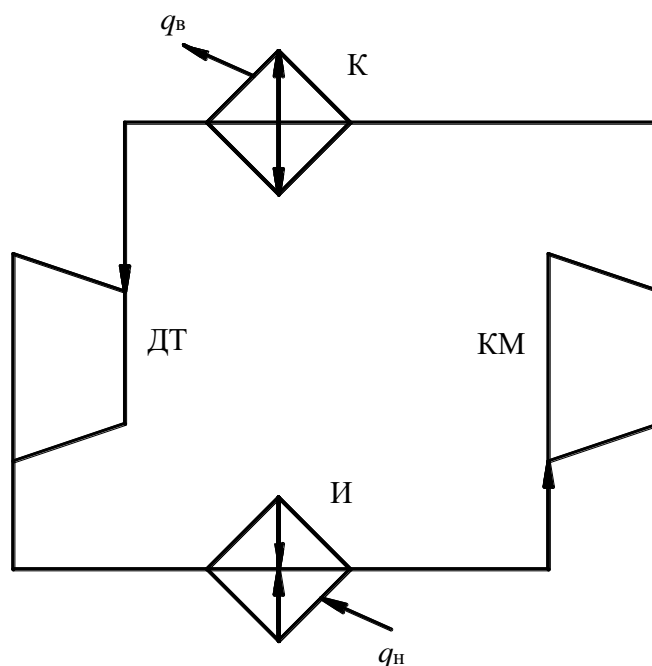


Рис. 7.3. Схема идеального теплового насоса:

И – испаритель; ОЖ – отделитель жидкости; КМ – компрессор;
 К – конденсатор; ДТ – детандер

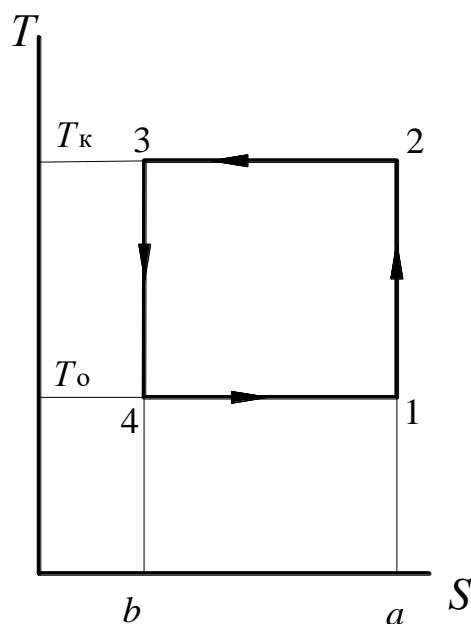


Рис. 7.4. Обратный цикл Карно в диаграмме $T-s$

Адиабатический процесс 3–4. Чтобы рабочее тело вновь могло отнимать теплоту от источника низкой температуры, оно должно адиабатически расширяться в детандере от давления p_k до p_0 . При расширении температура хладагента уменьшается от T_k до T_0 , а хладагент совершает работу расширения l_p .

Таким образом, в результате осуществления обратного цикла Карно теплота q_0 отводится от источника низкой температуры T_0 и передается источнику высокой температуры T_k . Для этого затрачивается удельная работа цикла $l_{ц}$, равная разности затраченной в компрессоре и полученной в детандере работ:

$$l_{ц} = l_{сж} - l_p.$$

По второму закону термодинамики тепловой баланс холодильной машины определяется выражением

$$Q_0 + l_{ц} = q_k.$$

Удельная массовая холодопроизводительность

$$q_0 = i_1 - i_4.$$

Удельная работа сжатия

$$l_{сж} = i_2 - i_1.$$

Удельная теплота, отводимая в конденсаторе:

$$q_k = i_2 - i_3.$$

Удельная работа расширения

$$l_p = i_3 - i_4.$$

Эффективность цикла теплового насоса оценивается отношением полученной теплоты к затраченной работе, называемым коэффициентом преобразования или коэффициентом отопления. Он характеризует затрату работы $l_{ц}$ на получение единицы теплоты в заданных условиях:

$$\mu = \frac{q_k}{l_{ц}}.$$

Коэффициент отопления можно выразить через температуры, подставив в предыдущее уравнение вместо работы $l_{ц}$ разность $q_k - q_0$:

$$\mu = \frac{q_k}{q_k - q_0} = \frac{T_k}{T_k - T_0}.$$

Полученное выражение показывает, что коэффициент отопления не зависит от физических свойств рабочего тела, а зависит только от значений температур. Чем ниже температура нагреваемого тела T_k и выше температура источника тепла с низкой температуры T_0 , тем больше коэффициент преобразования, следовательно, меньше работы затрачивается на получение единицы теплоты.

На рисунке 7.5 представлена схема одноступенчатого парокомпрессионного теплового насоса.

Установка работает следующим образом. Теплота q_0 , отведенная от охлаждаемого тела, подводится к хладагенту в испарителе. В результате подвода теплоты хладагент кипит в изобарно-изотермическом процессе в испарителе при давлении p_0 и температуре T_0 . Получившийся в испарителе пар предварительно проходит отделитель жидкости, где он отделяется от остатков жидкости и поступает в компрессор. В компрессоре совершается работа сжатия, давление хладагента возрастает от p_0 до p_k , температура пара возрастает от T_1 до T_2 .

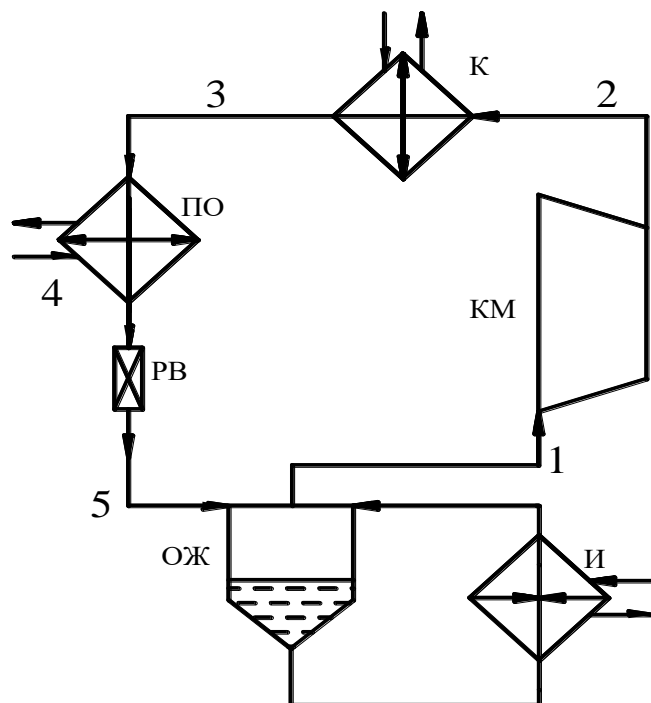


Рис. 7.5. Принципиальная схема одноступенчатого парокомпрессионного теплового насоса:

И – испаритель; ОЖ – отделитель жидкости; КМ – компрессор;
К – конденсатор; ПО – переохладитель; РВ – регулирующий вентиль

Сжатый в компрессоре пар поступает в конденсатор, где от него отводится теплота q_k к верхнему источнику тепла. В конденсаторе происходит изобарное охлаждение перегретого пара до линии насыщения, затем в ходе изобарно-изотермической конденсации пар переходит в жидкую фазу.

Жидкий хладагент при давлении p_k и температуре T_k проходит через охладитель рабочего тела – переохладитель, где в процессе отвода теплоты $q_{по}$ во внешнюю среду (вода или воздух) его температура снижается от T_k до $T_{по} = T_4$.

После переохладителя жидкий хладагент проходит через регулирующий вентиль, где в ходе дросселирования давление хладагента падает от p_k до p_0 , а температура снижается от T_4 до T_0 . При этом рабочий агент вскипает. В отделителе жидкости хладагент разделяется на фазы. Пар уходит во всасывающий патрубок компрессора. Жидкий хладагент из отделителя жидкости возвращается в испаритель, где процесс повторяется.

Для построения цикла одноступенчатого парокомпрессионного теплового насоса на диаграмме $T-s$ или $\lg p-i$ необходимо знать характерные температуры в основных точках: температуру кипения (T_0), температуру конденсации (T_k) и температуру перед регулирующим вентилем.

На рисунке 7.6 приведен реальный цикл парокомпрессионного теплового насоса. Реальный цикл отличается от теоретического тем, что в нем учитываются особенности работы реального теплового насоса: перегрев паров холодильного агента в компрессоре, отличие процесса сжатия в компрессоре от адиабатного – потери мощности.

Перегрев паров холодильного агента перед компрессором обеспечивает безопасные условия работы компрессора. Рекомендуется принимать перегрев паров $\Delta t_{вс} = t_{вс} - t_0 = 10...35$ °С.

При расчете параметров теплового насоса производится определение расхода хладагента, определение тепловых нагрузок отдельных узлов теплового насоса и расхода электрической энергии.

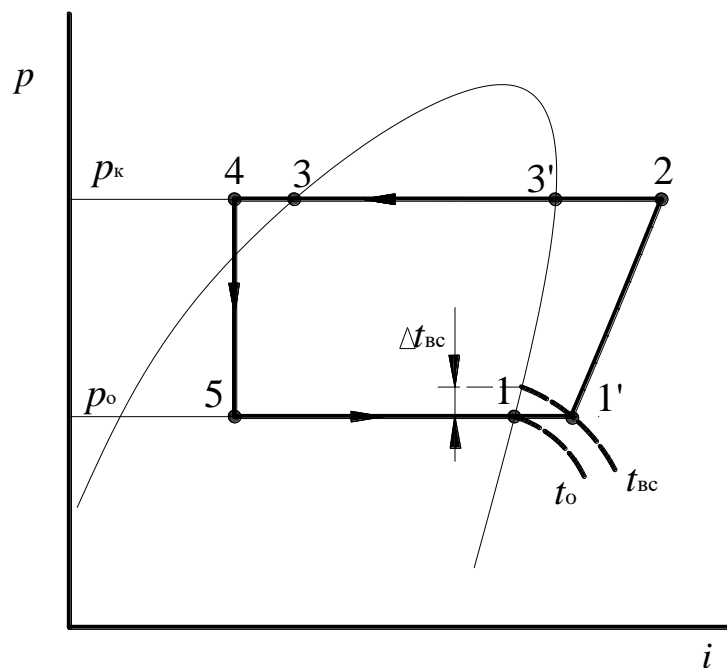


Рис. 7.6. Цикл реального компрессионного теплового насоса

Для расчета теплового насоса необходимы следующие исходные данные:

- тип хладагента;
- схема установки;
- тепловая нагрузка $Q_{\text{ТНУ}}$;
- температура охлаждаемой среды на входе $t_{\text{н1}}$ и выходе из испарителя $t_{\text{н2}}$;
- температура нагреваемой среды на входе $t_{\text{в1}}$ и выходе $t_{\text{в2}}$ из конденсатора;
- температура и расход теплоносителя, поступающего в переохладитель $t_{\text{к2}}$.

Температура хладагента после переохладителя определяется по формуле

$$t_4 = t_{\text{к2}} + \Delta t_{\text{по}}.$$

При расчете выбираются значения меньшей разности температур греющей и нагреваемой сред – в испарителе $\Delta t_{\text{и}}$ и конденсаторе $\Delta t_{\text{к}}$. Величина $\Delta t_{\text{и}}$ выбирается в пределах 3...5 °С, а $\Delta t_{\text{к}} = 4...7$ °С, если охлаждаемым

и охлаждающим теплоносителями являются вода или рассол. Величина $\Delta t_{\text{н}} \approx \Delta t_{\text{к}} = 15 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$, если этими теплоносителями являются газ или воздух.

Температуры испарения и конденсации определяются по формулам:

$$t_0 = t_{\text{н2}} - \Delta t_{\text{н}},$$

$$t_{\text{к}} = t_{\text{в2}} + \Delta t_{\text{к}}.$$

По значениям температур с помощью термодинамических таблиц теплофизических свойств хладагентов и их диаграмм состояния находятся давление испарения $p_0 = f(t_0)$ и давление конденсации $p_{\text{к}} = f(t_{\text{к}})$. Тепловой баланс теплового насоса на единицу расхода хладагента

$$q = l_b + q_0 = q_{\text{кд}} + q_{\text{по}} + q_{\text{км}},$$

где l_b – внутренняя (адиабатная) работа на сжатие паров, кДж/кг; q_0 – тепло, подводимое к испарителю, кДж/кг; $q_{\text{кд}}$ – тепло, отводимое к теплоносителю в конденсаторе, кДж/кг; $q_{\text{по}}$ – тепло, отводимое в переохладителе от рабочего тела, кДж/кг; $q_{\text{км}}$ – тепло, отводимое в компрессоре, кДж/кг, но при отсутствии внешнего охлаждения $q_{\text{км}} = 0$.

Количество тепла, подводимого к испарителю q_0 на единицу расхода:

$$q_0 = i_1 - i_5, \text{ кДж/кг.}$$

Удельная внутренняя работа сжатия в компрессоре

$$l_b = i_2 - i_1 = \frac{l_a}{\eta_i} = \frac{i_2' - i_1}{\eta_i}, \text{ кДж/кг,}$$

где l_a – удельная работа сжатия при изэнтропном процессе сжатия, кДж/кг; η_i – внутренний (индикаторный, адиабатный) КПД компрессора.

Энергетические потери, вызванные конструктивными особенностями компрессора, оцениваются индикаторным КПД η_i , который определяется по эмпирическим формулам:

$$\eta_i = \lambda_w + \beta t_0,$$

где λ_w – коэффициент подогрева паров хладона от стенок компрессора. Нагрев увеличивает объем хладагента, что снижает производительность компрессора;

β – эмпирический коэффициент, для машин на хладоне $\beta = 0,0025$; t_0 – температура испарения хладона в полости испарителя.

Коэффициент подогрева λ_w в первом приближении можно определить как отношение

$$\lambda_w = \frac{T_0}{T_k}.$$

Удельный отвод теплоты в конденсаторе

$$q_{\text{кд}} = i_2 - i_3, \text{ кДж/кг.}$$

Удельный отвод теплоты в охладителе

$$q_{\text{по}} = i_3 - i_4, \text{ кДж/кг.}$$

Суммарный удельный отвод теплоты в конденсаторе и охладителе

$$q = i_2 - i_4, \text{ кДж/кг.}$$

Внешняя удельная работа, отнесенная к выводам электродвигателя компрессора:

$$l = \frac{l_b}{\eta_{\text{эм}}} = \frac{l_a}{\eta_{\text{эм}} \eta_i},$$

где $\eta_{\text{эм}} = \eta_{\text{эд}} \eta_{\text{м}}$ – электромеханический КПД ($\eta_{\text{э}}$ – КПД электродвигателя; $\eta_{\text{м}}$ – механический КПД компрессора), $\eta_{\text{эд}} = 0,9$ – КПД приводного электродвигателя; $\eta_{\text{м}} = 0,97$ – механический КПД компрессора.

Величина удельного расхода работы, отнесенная к единице трансформируемого тепла, зависит от типа теплового насоса.

Для реального теплового насоса удельный расход электрической энергии на единицу полученной теплоты

$$\mathcal{E}_{\text{ТНУ}} = \frac{l}{q} = \frac{l_b}{q \eta_{\text{эм}}} = \frac{l_b}{q \eta_{\text{эм}} \eta_i}.$$

Величина, обратная $\mathcal{E}_{\text{ТНУ}}$, называется коэффициентом трансформации установки

$$\mu = \frac{1}{\mathcal{E}_{\text{ТНУ}}}.$$

Коэффициент трансформации установки численно равен количеству единиц теплоты, получаемой в ТНУ на единицу затраченной электрической энергии. Удельный расход работы в идеальном цикле, отнесенный к единице теплоты q_B , отведенной к теплоприемнику с температурой T_B :

$$\mathfrak{E}_B = \frac{l}{q_B} = \frac{T_B - T_H}{T_B} = 1 - \frac{T_H}{T_B},$$

тогда эксергетический КПД ТНУ равен отношению удельного расхода работы на трансформацию теплоты в идеальной и действительной установках:

$$\eta_{\text{э.ТНУ}} = \frac{\mathfrak{E}_B}{\mathfrak{E}_{\text{ТНУ}}} = \mathfrak{E}_{\text{в}\mu}.$$

Цикл работы установки наносится на термодинамические диаграммы состояния $T-s$ или $\lg p-i$.

После расчета удельных характеристик определяются следующие характеристики теплового насоса:

- массовый расход хладагента, кг/с:

$$G_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_0}{q}$$

- объемная производительность компрессора, м³/с:

$$V_{\text{км}} = G V_1;$$

- тепловая нагрузка конденсатора, кВт:

$$Q_k = G q_k;$$

- тепловая нагрузка испарителя (для ТНУ), кВт:

$$Q_{\text{исп}} = G q_0;$$

- тепловая нагрузка переохладителя (для ТНУ), кВт

$$Q_{\text{по}} = G q_{\text{по}};$$

- электрическая мощность компрессора, кВт:

$$N_{\text{э}} = \mathfrak{E}_{\text{ТНУ}} Q_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{\mu}.$$

7.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Определить термодинамические параметры точек 1, 2 и количество теплоты, которое подводится к фреону R-22 массой 10 кг в процессе его кипения при температуре 0 °С.

Решение.

Параметры точек определяются по таблице или по диаграмме $\lg p-i$ (рис. 7.7).

Точка № 1 (лежит на линии $x = 0$):

$$p_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,5 \text{ МПа}; t_1 = t_0 = 0 \text{ °С}; v_1 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; i_1 = 500 \text{ кДж/кг}; x = 0.$$

Точка № 2 (лежит на линии $x = 1$):

$$p_2 = p_1 = 0,5 \text{ МПа}; t_2 = t_0 = 0 \text{ °С}; v_2 = 47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; i_2 = 705 \text{ кДж/кг}; x = 1.$$

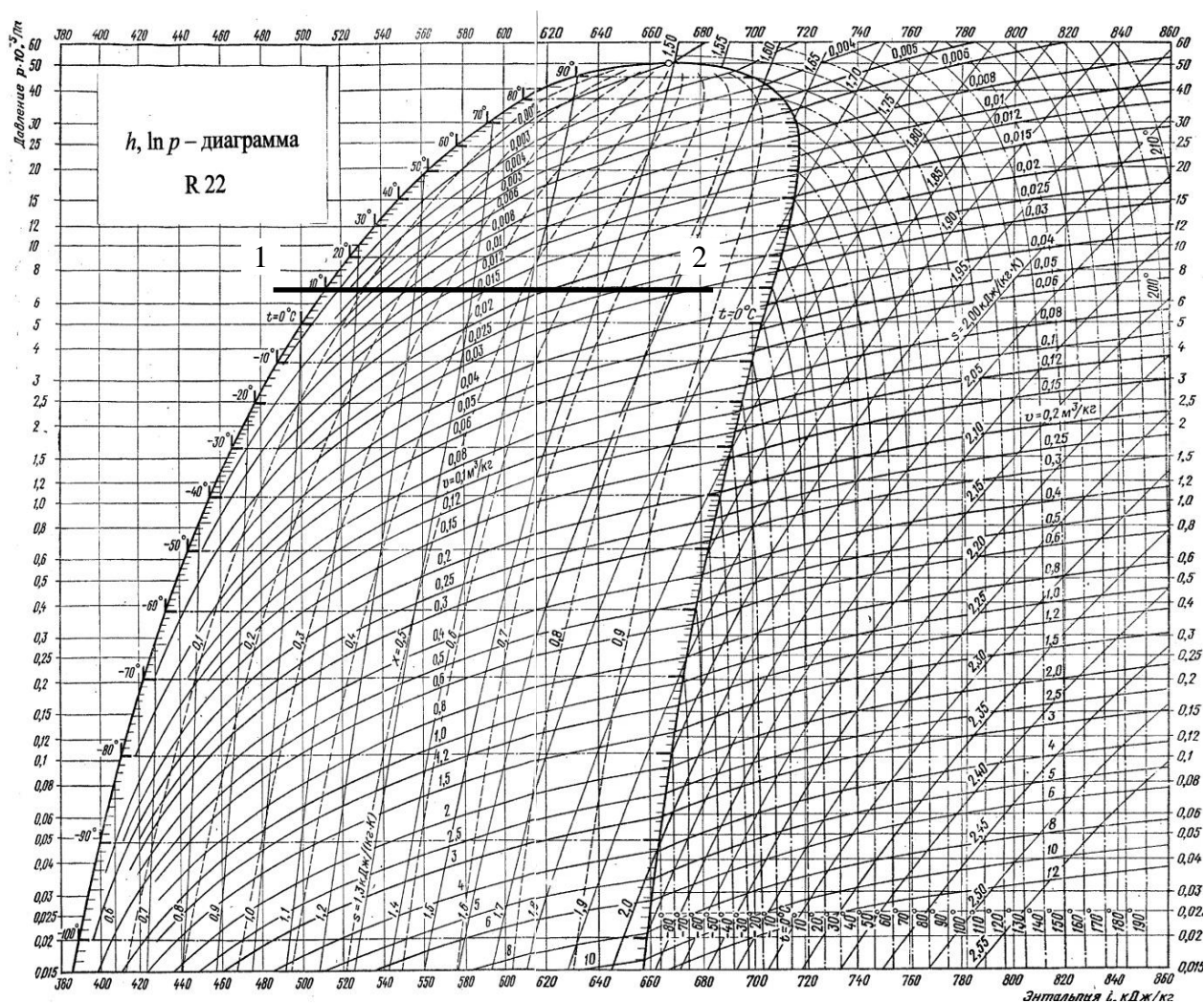


Рис. 7.7. Диаграмма $\lg p-i$ фреона R-22 к задаче 1

Количество теплоты, подведенное к 1 кг фреона R-22:

$$q = i_2 - i_1 = 705 - 500 = 205 \text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты, подведенное к 10 кг фреона R-22:

$$Q = mq = 10 \cdot 205 = 2050 \text{ кДж.}$$

Задача 2. Определить основные параметры теплового насоса, работающего по циклу одноступенчатой холодильной машины. Исходные данные: $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_k = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{вс}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{по}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; теплота, переданная окружающей среде $Q_{\text{ТНУ}} = 250 \text{ кВт}$. Хладагент R-22.

Решение.

Схема теплового насоса приведена на рис. 7.5. Построим цикл теплового насоса в диаграмме $\lg p-i$ хладагента R-22. Определяем параметры точек 1 и 3 по температуре и степени сухости. В точке 1 пар находится на линии насыщения. В точке 3 хладагент – жидкость на линии насыщения. Наносим точки на диаграмму (рис. 7.8). Параметры точек 1 и 3 из диаграммы сводим в табл. 7.1.

Определяем температуры хладагента в точках 4 и 1':

$$t_4 = t_k - \Delta t_{\text{по}} = 40 - 0 = 40 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{1'} = t_0 + \Delta t_{\text{вс}} = 0 + 10 = 10 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По температуре и давлению определяем параметры точек 4 и 1'. Энтальпия точки 5 равна энтальпии точки 4. По энтальпии и давлению определяем параметры точки 5. Наносим точки 4, 5 и 1' на диаграмму (рис. 7.8). Параметры точек из диаграммы сводим в табл. 7.1.

Количество тепла, подводимого к испарителю q_0 на единицу расхода

$$Q_0 = i_{1'} - i_5 = 715 - 550 = 165 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная внутренняя работа сжатия в компрессоре

$$l_b = i_2 - i_{1'} = 745 - 715 = 30 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный отвод теплоты в конденсаторе

$$q = q_{\text{кд}} = i_2 - i_3 = q_0 + l = 745 - 550 = 195 \text{ кДж/кг.}$$

Находим коэффициент преобразования:

$$\mu = \frac{q_{\text{кд}}}{l} = \frac{195}{30} = 6,5$$

Определяем массовый и объемный расходы хладагента:

– массовый расход хладагента

$$G_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{q_{\text{кд}}} = \frac{250}{195} = 1,282 \text{ кг/с;}$$

– объемная производительность компрессора

$$V_{\text{км}} = Gv_1 = 1,282 \cdot 0,047 = 0,0603 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Электрическая мощность компрессора, кВт

$$N_э = \frac{Q_{\text{ТНУ}}}{\mu} = \frac{250}{6,5} = 38,46 \text{ кВт.}$$

7.1. Параметры хладагента в узловых точках теоретического цикла теплового насоса к задаче 2

№ точки	Температура t , °С	Давление p , МПа	Энтальпия i , кДж/кг	Удельный объем V , м ³ /кг
1	0	0,5	705	0,047
1'	10	0,5	715	0,050
2	70	1,5	745	0,018
3	40	1,5	550	0,0009
4	40	1,5	550	0,0009
5	0	0,5	550	0,012

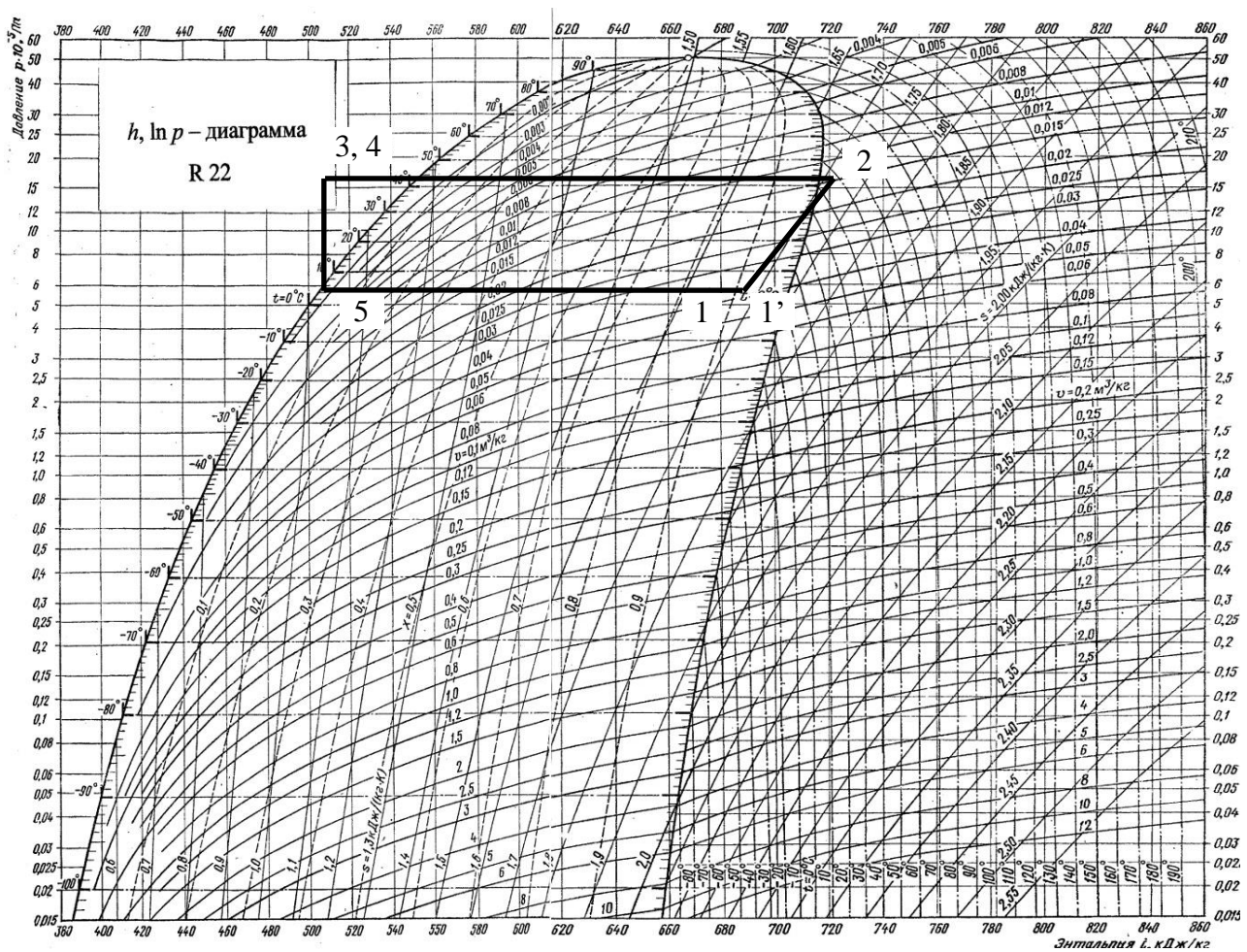


Рис. 7.8. Схема цикла к задаче 2 на диаграмме $lgp-i$ фреона R-22

7.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Определить количество теплоты, которое необходимо затратить на испарение фреона R-22 массой 25 кг при температуре 40 °С. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 0$, $x_2 = 1$.
2. Определить количество теплоты, которое необходимо затратить на испарение фреона R-22 массой 25 кг при температуре -18 °С. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 0$, $x_2 = 1$.
3. Определить количество теплоты, которое необходимо затратить на испарение фреона R-12 массой 1 кг при температуре 0 °С. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 0$, $x_2 = 1$.
4. Определить количество теплоты, которое необходимо затратить на испарение фреона R-12 массой 5 кг при температуре 20 °С. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 0$, $x_2 = 1$.

5. Определить количество теплоты, которое необходимо затратить на испарение фреона R-22 массой 10 кг при давлении 2 МПа. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 0$, $x_2 = 1$.

6. Определить количество теплоты, которое необходимо затратить на испарение фреона R-22 массой 1 кг при давлении 0,6 МПа. Удельный объем в начале процесса $v_1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$. Степень сухости в конце процесса $x_2 = 1$.

7. Определить количество теплоты, которое необходимо отвести при конденсации фреона R-12 массой 1 кг при давлении 0,8 МПа. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 1$, $x_2 = 0$.

8. Определить количество теплоты, которое необходимо отвести при конденсации фреона R-12 массой 1 кг при температуре 10 °С. Степени сухости в начале и конце процесса: $x_1 = 1$, $x_2 = 0$.

9. Определить параметры процесса изоэнтропийного сжатия в компрессоре фреона R-22 массой 1 кг от давления 0,5 МПа до 1,5 МПа. Энтальпия в начале процесса 720 кДж/кг.

10. Определить параметры процесса изоэнтропийного сжатия в компрессоре фреона R-22 массой 1 кг. Начальное давление 0,1 МПа. Энтальпия в начале процесса 680 кДж/кг. Энтальпия в конце процесса сжатия 740 кДж/кг.

11. Определить параметры процесса изоэнтропийного сжатия в компрессоре фреона R-22 массой 15 кг. Начальное давление 0,17 МПа. Энтальпия в начале процесса 700 кДж/кг. В конце процесса сжатия температура равна 100 °С.

12. Определить параметры процесса изотермического расширения фреона R-22 массой 1 кг. Начальное давление 0,5 МПа. Конечное давление 0,2 МПа. Температура равна 50 °С.

13. Определить параметры процесса изотермического расширения фреона R-22 массой 1 кг. Начальное давление 0,5 МПа. Объем фреона увеличился в 2 раза. Степень сухости в начале процесса $x_1 = 1$.

14. Определить параметры процесса изотермического сжатия фреона R-22 массой 1 кг. Начальное давление 0,1 МПа. Конечное давление 1,0 МПа. Температура равна 80 °С.

15. Построить цикл теплового насоса, работающего по обратному циклу Карно при следующих условиях: температура кипения составляет -10 °С, а конденсации – $+40$ °С, хладагент R-22. Степени сухости в начале и конце процесса конденсации: $x_2 = 1$, $x_3 = 0$. Определить основные параметры цикла.

16. Построить цикл теплового насоса, работающего по обратному циклу Карно при следующих условиях: давление кипения составляет 0,5 МПа, а конденсации – 1,5 МПа, хладагент R-22. Степени сухости в начале и конце процесса конденсации: $x_2 = 1$, $x_3 = 0$. Определить основные параметры цикла.

17. Построить цикл теплового насоса, работающего по обратному циклу Карно при следующих условиях: давление кипения составляет 0,5 МПа, а конденсации – 1,5 МПа, хладагент R-12. Степени сухости в начале и конце процесса конденсации: $x_2 = 1$, $x_3 = 0$. Определить основные параметры цикла. Сравнить полученные данные с результатами решения предыдущей задачи.

18. Построить цикл теплового насоса, работающего по циклу одноступенчатой холодильной машины, и определить его основные параметры. Исходные данные: $t_0 = 13$ °С, $t_k = 80$ °С, $\Delta t_{вс} = 7$ °С, $\Delta t_{по} = 5$ °С; теплота, переданная окружающей среде, $Q_{ТНУ} = 100$ кВт. Хладагент R-22.

19. Построить цикл теплового насоса, работающего по циклу одноступенчатой холодильной машины, и определить его основные параметры при следующих условиях: $t_0 = -18$ °С, $t_k = 30$ °С, $\Delta t_{вс} = 7$ °С, $\Delta t_{по} = 5$ °С; теплота, переданная окружающей среде, $Q_{ТНУ} = 20$ кВт. Хладагент R-12.

20. Определить основные параметры теплового насоса, работающего на фреоне R-22, в условиях предыдущей задачи. Сравнить полученные данные с результатами решения предыдущей задачи.

ЧАСТЬ 2. ВОДОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ЗАДАЧИ ПО ОБОРОТНОМУ ВОДОСНАБЖЕНИЮ

Задача 1. Оценить эффективность оборотного водоснабжения. Количество оборотной воды $800 \text{ м}^3/\text{ч}$, количество воды, забираемое из источника водоснабжения, – $165 \text{ м}^3/\text{ч}$, количество воды, сбрасываемое предприятием, – $160 \text{ м}^3/\text{ч}$, количество воды, поступающей из сырья, – $10 \text{ м}^3/\text{ч}$, нормированные величины воды – $0,27...0,87$, процент оборота воды – $54...95\%$, потери воды – $2,5\%$, кратность разбавления – $1,5$.

Дано:

$$Q_{об} = 800 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$Q_{и} = 165 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$Q_{сб} = 160 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$(P_{об}^H = 54...95\%),$$

$$Q_c = 10 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$P_{об}^H = 54...95\%,$$

$$K_{и}^H \geq 0,27...0,87,$$

$$n \geq 1,5;$$

Решение:

Процент оборота воды:

$$P_{об}^H = \frac{Q_{об}}{Q_{об} + Q_{и} + Q_{в}} \cdot 100\%;$$

$$P_{об}^H = \frac{800}{800 + 165 + 10} \cdot 100\% = 82\%;$$

– эффективна.

Коэффициент использования воды:

$$K_{и} = \frac{Q_{и} - Q_{сб} + Q_c}{Q_{и} + Q_c} \leq 1,$$

$$K_{и} = \frac{165 - 160 + 10}{165 + 10} = 0,085 < K_{и}^H = 0,27 - 0,87,$$

– неэффективна.

Кратность использования воды:

$$n = \frac{Q_{сб} + Q_{и} + Q_{с}}{Q_{и} + Q_{с}} > 1,5,$$

$$n = \frac{160 + 165 + 10}{165 + 10} = 1,91 > 1,5, \text{ – неэффективна.}$$

Безвозвратное потребление воды и ее потери в производстве:

$$K_n = \frac{Q_{и} - Q_{сб} + Q_{с}}{Q_{об} + Q_{и} + Q_{с}} \cdot 100\%,$$

$$K_n = \frac{165 - 160 + 10}{800 + 165 + 10} \cdot 100\% = 1,53\% < K_n^{\text{п}} = 2,5\%, \text{ – эффективна.}$$

Вывод: по коэффициенту использования воды данная система оборотного снабжения неэффективна, для повышения коэффициента эффективности использования воды необходимо уменьшить сброс воды и(или) увеличить количество воды, поступающей из сырья.

Ответ: $K_n = 1,53\%$, $K_{и} = 0,085$, $n = 1,91$, $P_{об} = 82\%$.

Задание 2. В оборотную систему водоснабжения поступает 10 л/с минерализованной сточной воды с концентрацией солей 10 000 мг/л. Из этого объема через осмотическую опреснительную установку (имеющую эффективность задержания солей 99%) проходит W_3 и выходит

$W_5 = 0,75W_3$ л/с воды и $W_4 = 0,25W_3$ л/с концентрированного рассола.

Так как питьевая вода должна содержать примерно 500 мг/л солей, то воду из опреснительной установки смешивают в банке-водоприемника с некоторым количеством необработанной минерализованной воды. Определить расходы воды на всех участках и концентрацию рассола, сбрасываемого из опреснительной установки. Принять, что накопления солей в системе не происходит.

Дано:

$$W_1 = 10 \text{ л/с,}$$

$$X_1 = 10\,000 \text{ мг/л,}$$

$$\eta = 99\%,$$

$$W_5 = 0,75 W_3 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$W_4 = 0,25 W_3 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$W_2 = W_1 - W_3, \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

$$X_2 = 10\,000 \frac{\text{мг}}{\text{л}},$$

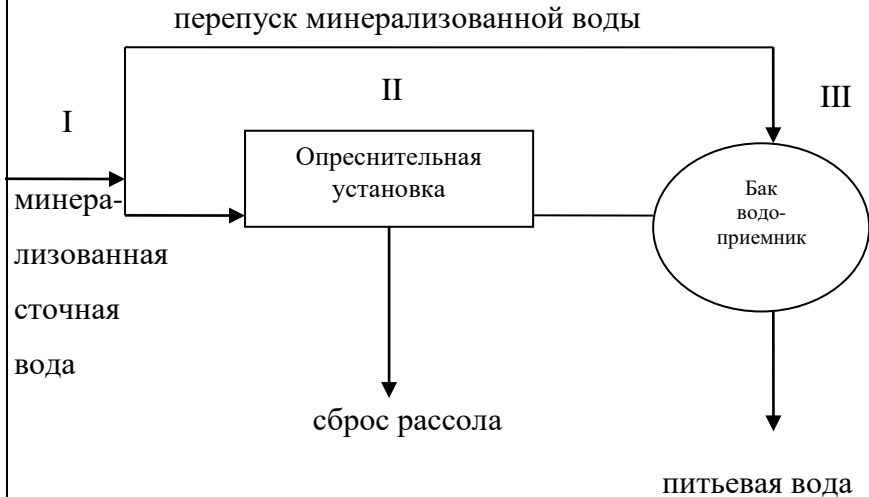
$$X_6 = 500 \frac{\text{мг}}{\text{л}},$$

$$X_2 = 10\,000 \frac{\text{мг}}{\text{л}},$$

$$\mu_{\text{нак}} = 0$$

Решение:

Составим технологическую диаграмму указанной системы, выразив все потоки в единицах W , что определяется самой постановкой задачи.



$$W_1 = 10 \text{ л/с}$$

$$X_1 = 10\,000 \text{ мг/л} \quad W_6 = W_2 + W_5$$

$$W_4 = W_3 - W_5 \quad X_6 = 500 \text{ мг/л}$$

$$W_2; W_3; W_4; W_5; W_6; X_4 - ?$$

Сквозным компонентом в данном случае является соль, поэтому отмечаем на схеме ее концентрации X .

Так как нам неизвестны расходы W_2 ; W_4 ; W_6 , то сразу материальный баланс всей схемы численно решить не удастся. Поэтому составим материальные балансы для отдельных участков схемы (области I, II, III).

Расход W_3 воды определится из уравнения материального баланса области 3:

$$W_2 X_2 + W_5 X_5 - W_6 X_6 = \mu_{\text{накIII}}$$

или

$$(W_1 - W_3) X_2 + 0,75 W_3 X_5 - (W_2 + W_5) X_6 = \mu_{\text{накIII}};$$

$$(W_1 - W_3) X_2 + 0,75 W_3 X_5 = \mu_{\text{накIII}},$$

откуда

$$W_3 = \frac{\mu_{\text{накIII}} - W_1(X_2 - X_6)}{0,75 \cdot X_5 + 0,25 \cdot X_6 - X_2}.$$

Концентрация солей в воде после опреснительной установки:

$$X_5 = X_3 - \frac{\eta_{\text{II}} X_3}{100}; \quad X_5 = 10\,000 - \frac{99 \cdot 10\,000}{100} = 100 \frac{\text{мг}}{\text{л}},$$

тогда

$$W_3 = \frac{0 - 10 \cdot (10000 - 500)}{0,75 \cdot 100 + 0,25 \cdot 500 - 10000} = 9,69 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Расход минерализованной воды на перепуск

$$W_2 = W_1 - W_3; \quad W_2 = 10 - 9,69 = 0,31 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Количество рассола, сбрасываемого из опреснительной установки:

$$W_4 = W_3 - W_5.$$

Количество воды, выходящей из опреснительной установки:

$$W_5 = 0,75 W_3; \quad W_5 = 0,75 \cdot 9,69 = 7,2675 \frac{\text{л}}{\text{с}},$$

тогда

$$W_4 = 9,69 - 7,2675 = 2,4225 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Количество питьевой воды, подаваемой к населению:

$$W_6 = W_2 + W_5; \quad W_6 = 0,31 + 7,2675 = 7,5775 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Концентрация рассола, сбрасываемого из опреснительной установки, определится из уравнения материального баланса опреснительной установки (область II):

$$W_3 X_3 - W_4 X_4 - W_5 X_5 = \mu_{\text{накII}},$$

откуда

$$X_4 = \frac{W_3 X_3 - W_5 X_5 - \mu_{\text{накII}}}{W_4};$$

$$X_4 = \frac{9,69 \cdot 10\,000 - 7,2675 \cdot 100 - 0}{2,4225} = 39\,700 \frac{\text{мг}}{\text{л}}.$$

$$\text{Ответ: } W_2 = 0,31 \frac{\text{л}}{\text{с}}; W_3 = 9,69 \frac{\text{л}}{\text{с}}; W_4 = 2,4225 \frac{\text{л}}{\text{с}}; W_5 = 7,2675 \frac{\text{л}}{\text{с}};$$

$$W_6 = 7,5775 \frac{\text{л}}{\text{с}}; X_4 = 39700 \frac{\text{мг}}{\text{л}}.$$

Задание 3.

Определить расход дымовых газов, содержащих углекислоту, необходимую для предотвращения образований карбонатных отложений рекарбонизации, а также количество оборотной воды, которая должна быть подвергнута рекарбонизации жжения с трубами – охладителям. Фактически величина водородного показателя при нагреве воды на предприятии составляет 8,2, величина водородного показателя при равновесном насыщении воды карбонатом кальция составляет 7,1. Ионная сила раствора оборотной воды 0,3 (г-ион)/л. Коэффициент упаривания 1,7. Щелочность оборотной воды 2,1 (мг·экв)/л. Расход охлаждающей воды $70 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Содержание углекислоты в дымовом газе 8% (по объему). Объемный вес дымовых газов $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$, степень использования углекислоты 50%. Растворимость углекислоты в воде 1690 мг/л.

Дано:

$$pH_{\phi} = 8,2,$$

$$pH_s = 7,1,$$

$$\mu = 0,03 \text{ г} \cdot \text{ион}/\text{л},$$

$$K_y = 1,7,$$

$$\text{Щ}_{\text{об}} = 2,1 \text{ (мг} \cdot \text{экв)/л},$$

$$Q_{\text{охл}} = 70 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{л},$$

$$C_{\text{CO}_2} = 8\% \text{ (об)},$$

$$\gamma = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$\beta = 50\%,$$

Решение:

Расход дымовых газов, содержащих углекислоту, для рекарбонизации воды:

$$Q_{g.r} = \frac{D_{\text{CO}_2} Q_{\text{охл}} \cdot 10\,000}{C_{\text{CO}_2} \gamma \beta}.$$

Доза углекислоты для рекарбонизации оборотной воды в системах с прудами – охладителями:

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{(\text{CO}_2)_{\text{ст}} - (\text{CO}_2)_{\text{исх}}}{2}.$$

$$M = 1690 \text{ мг/л}$$

Концентрация в воде углекислоты, обеспечивающая стабильность воды:

$$(\text{CO}_2)_{\text{ст}} = \frac{44 \cdot \text{Щ}_{\text{об}} \cdot 10^6}{K_y \cdot 10^{\text{PHЗ}+0,5\sqrt{\mu}}},$$

$$(\text{CO}_2)_{\text{ст}} = \frac{44 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 10^{7,1+0,5\sqrt{0,03}}} = 3,53 \text{ мг/л}.$$

Концентрация углекислоты в исходной воде:

$$(\text{CO}_2)_{\text{исх}} = \frac{44 \cdot \text{Щ}_{\text{об}} \cdot 10^6}{K_y \cdot 10^{\text{PHФ}+0,5\sqrt{\mu}}},$$

$$(\text{CO}_2)_{\text{исх}} = \frac{44 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 10^{8,2+0,5\sqrt{0,03}}} = 0,28 \text{ мг/л},$$

тогда

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{3,53 - 0,28}{2} = 1,625 \text{ мг/л},$$

$$Q_{g,r} = \frac{1,625 \cdot 70 \cdot 10^3 \cdot 10\,000}{8 \cdot 50 \cdot 2000} = 1422 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$Q_{\text{карб}} \text{ -? } Q_{g,r} \text{ -?}$$

Количество воды, которое должно быть подвергнуто рекарбонизации:

$$Q_{\text{карб}} = \frac{ZQ_{\text{охл}}}{100}.$$

Доля воды в % общего расхода охлаждающей воды, которая должна быть пропущена через водоструйные электроды для карбонизации:

$$Z = \frac{D_{\text{CO}_2} \cdot 10^6}{M C_{\text{CO}_2} \beta}, \quad Z = \frac{1,625 \cdot 10^6}{1690 \cdot 8 \cdot 50} = 2,4\%.$$

тогда
$$Q_{\text{карб}} = \frac{2,4 \cdot 70 \cdot 10^3}{100} = 1680 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Ответ: $Q_{\text{карб}} = 1680 \text{ м}^3/\text{ч}, Q_{g,r} = 1422 \text{ м}^3/\text{ч}.$

ЗАДАЧИ ПО СБРАЖИВАНИЮ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД И ПОЛУЧЕНИЮ БИОГАЗА

Задача 1. Определить концентрацию взвешенного осадка бытовых сточных вод после вторичного отстаивания, который предназначен для направления на сбраживание в метантенк, если; число радиальных отстойников 4, диаметр радиальных отстойников 23 м, коэффициент использования объема зоны отстаивания 0,4, иловый индекс $80 \text{ см}^3/\text{г}$, глубина отстойника 3 м. Концентрация активного ила в аэротенке 3 мг/л, в осветленной воде 15 мг/л. Концентрация взвешенных частиц перед отстойником 156 мг/л, влажность осадка 99,6%, плотность осадка 1 г/см, продолжительность хранения осадка (отстаивания) 8 ч. Отстойник установлен после аэротенки. Количество задерживаемого осадка $110 \text{ м}^3/\text{сут}$.

ПДК взвешенных частиц в воде 16 мг/л.

Дано:

$$N = 4,$$

$$D = 23 \text{ м},$$

$$K = 0,4$$

$$I = 80 \frac{\text{см}^3}{\text{г}},$$

$$H = 3 \text{ м},$$

$$a_i = 3 \frac{\text{мг}}{\text{л}},$$

$$a_t = 15 \frac{\text{мг}}{\text{л}},$$

$$C_{\text{вх}} = 156 \text{ мг/л},$$

$$\rho = 99,6\%,$$

$$\gamma = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3},$$

Решение:

Концентрация взвешенного осадка после вторичного отстойника

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} - \frac{\eta C_{\text{вх}}}{100}.$$

Эффективность отстаивания

$$\eta = \left(1 - \frac{Q \cdot (100 - \rho) \gamma \cdot 10^4}{1,05 q_w t C_{\text{вх}}} - \frac{\text{ПДК}}{C_{\text{вх}}} \right) \cdot 100\%.$$

Расход сточных вод

$$q_w = F q_0.$$

Общая площадь отстойников

$$F = F_0 N.$$

$$t = 8 \text{ ч,}$$

$$Q = 110 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}},$$

$$\text{ПДК} = 16 \text{ мг/л}$$

Площадь одного отстойника

$$F_0 = \left(\frac{D}{1,13} \right)^2, \quad F_0 = \left(\frac{23}{1,13} \right)^2 = 414 \text{ м}^2,$$

тогда

$$F = 414 \cdot 4 = 1656 \text{ м}^2.$$

Нагрузка на поверхность вторичных радиальных отстойников

$$q_0 = \frac{4,5KH^{0,8}}{(0,1a_i)^{0,5-0,01a_i}},$$

$$q_0 = \frac{4,5 \cdot 0,4 \cdot 3^{0,8}}{(0,1 \cdot 80 \cdot 3)^{0,5-0,01 \cdot 15}} = 1,775 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}},$$

тогда

$$q_w = 1656 \cdot 1,775 = 2939,4 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

$$\eta = \left(1 - \frac{100 \cdot (100 - 99,6) \cdot 1 \cdot 10^4}{1,05 \cdot 2939,4 \cdot 8 \cdot 156} - \frac{16}{156} \right) \cdot 100\% = 78,3\%,$$

$$C_{\text{ВЫХ}} = 156 - \frac{78,3 \cdot 156}{100} = 33,8 \frac{\text{мг}}{\text{л}}.$$

$$C_{\text{ВЫХ}} = ?$$

Ответ: $C_{\text{ВЫХ}} = 33,8 \frac{\text{мг}}{\text{л}}.$

Задача 2. В анаэробном отстойнике-перегнивателе производится сбраживание органической части осадка сточной жидкости, которое сопровождается образованием газов (из которых 72% составляет метан, 28% составляет диоксид углерода). Сточная вода поступает в отстойник-перегниватель в количестве 1000 кг. В процессе сбраживания содержимое отстойника разделяется на три слоя: сбраживаемый осадок, условно чистая жидкость и газы. Поступающая сточная вода содержит 4% (по массе) твердых веществ, 70% из которых органические и 30% инертные. Удаляемый из отстойника продукт со сброженным

осадком содержит 6% (по массе) твердых веществ, из которых 50% органические и 50% инертные вещества. Условно чистая жидкость не содержит твердых веществ. Определить количество условно чистой воды, удаляемой из отстойника, процентное уменьшение количества органических веществ в сброженном осадке, количество образовавшихся метана и диоксида углерода.

Дано:

$$Q_M = 0,72 Q_{\text{ВЫХ}}''',$$

$$Q_D = 0,28 Q_{\text{ВЫХ}}''',$$

$$Q_{\text{ВХ}} = 1000 \text{ кг},$$

$$Q_T = 0,04 Q_{\text{ВХ}},$$

$$y = 0,7 Q_T,$$

$$Z = 0,3 Q_T,$$

$$Q'_T = 0,06 Q'_{\text{ВЫХ}},$$

$$y' = 0,5 Q'_T,$$

$$Z' = 0,5 Q'_T,$$

$$X''' = 0 \text{ кг},$$

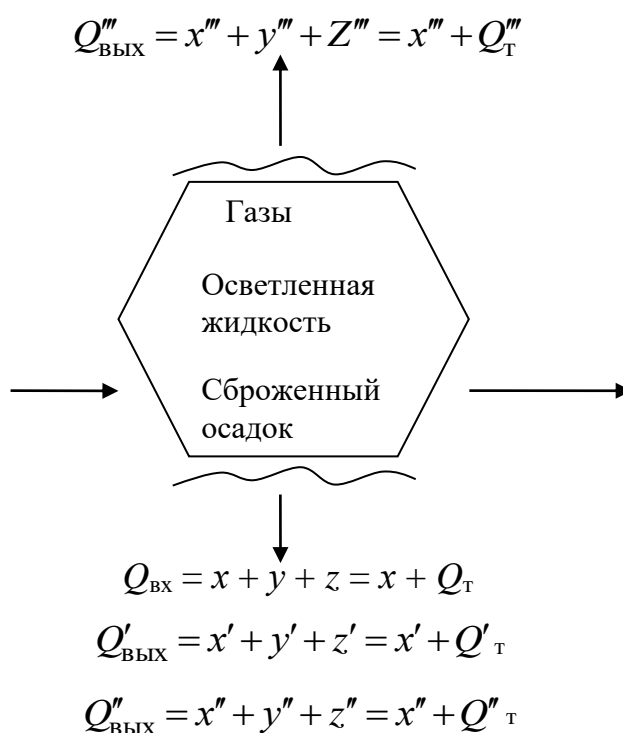
$$Z''' = 0 \text{ кг},$$

$$y'' = 0 \text{ кг},$$

$$Z'' = 0 \text{ кг}$$

Решение:

Составим технологическую схему отстойника-перегнвателя:



$X'', \Delta y, Q_M, Q_D - ?$

Сквозным компонентом являются инертные вещества. Количество условно чистой (отстойной) воды на выходе из отстойника определяется из уравнения материального баланса отстойника по воде

$$x = x' + x'' + x''',$$

откуда

$$x'' = x - x' - x'''.$$

Количество чистой воды в сточной жидкости, поступающей в отстойник, определяется из уравнения

$$Q_{\text{ВХ}} = x + y + z = x + Q_{\text{Т}},$$

откуда

$$x = Q_{\text{ВХ}} - Q_{\text{Т}}.$$

Общее количество твердых веществ в исходной сточной воде

$$Q_{\text{Т}} = 0,04 Q_{\text{ВХ}}, \quad Q_{\text{Т}} = 0,04 \cdot 1000 = 40 \text{ кг},$$

тогда

$$x = 1000 - 40 = 960 \text{ кг}.$$

Количество воды в сброженном осадке определяется из уравнения

$$Q'_{\text{ВЫХ}} = x' + y' + z' = x' + Q'_{\text{Т}},$$

откуда

$$x' = Q'_{\text{ВЫХ}} - Q'_{\text{Т}}.$$

Количество твердого вещества в сброженном осадке (из условия задачи)

$$Q'_{\text{Т}} = y' + z' = 0,06 Q'_{\text{ВЫХ}},$$

тогда

$$x' = Q'_{\text{ВЫХ}} - 0,06 Q'_{\text{ВЫХ}} = 0,94 Q'_{\text{ВЫХ}}.$$

Из пропорции

$$y' + z' = 0,06 Q'_{\text{ВЫХ}}, \quad x' = 0,94 Q'_{\text{ВЫХ}}$$

найдем

$$x' = \frac{(y' + z') 0,94 Q'_{\text{ВЫХ}}}{0,06 Q'_{\text{ВЫХ}}} = \frac{(y' + z') 0,94}{0,06}.$$

Количество органических твердых веществ в сброженном осадке (из условия задачи)

$$y' = 0,5 Q'_{\text{Т}}.$$

Из условия задачи также известно, что количество инертных твердых веществ в сброженном осадке

$$z' = 0,5 Q'_{\text{Т}}.$$

Следовательно: $y' = z'$.

Количество инертных веществ в сброженном осадке определяется из уравнения

$$z = z' + z'' + z''',$$

откуда

$$z' = z - z'' - z'''.$$

Количество инертных веществ в исходной сточной воде

$$z = 0,3 Q_T, \quad z = 0,3 \cdot 40 = 72 \text{ кг},$$

тогда $z' = 12 - 0 - 0 = 12 \text{ кг}, \quad y' = 12 \text{ кг}, \quad x' = \frac{(12+12) \cdot 0,94}{0,06} = 376 \text{ кг},$

$$x'' = 960 - 376 - 0 = 584 \text{ кг}.$$

Процентное снижение количества органических твердых веществ в процессе сбраживания в сброженном осадке

$$\Delta y = \frac{y - y'}{y} \cdot 100\% .$$

Количество органических твердых веществ в исходной сточной воде (из условия задачи)

$$y = 0,7 Q_T; \quad y = 0,7 \cdot 40 = 28 \text{ кг},$$

тогда $\Delta y = \frac{28 - 12}{28} \cdot 100\% = 57,14\% .$

Количество метана, образующегося в процессе сбраживания (из условия задачи):

$$Q_M = 0,72 Q_{\text{ВЫХ}} .$$

Общее количество газов, образующихся в процессе сбраживания:

$$Q_{\text{ВЫХ}}''' = x''' + y''' + z''' = x''' + Q_T''' .$$

Количество твердых веществ, превращающихся в газ в ходе реакции сбраживания, определяется из уравнения материального баланса отстойника по твердым веществам

$$Q_T = Q_T' + Q_T'' + Q_T''' ,$$

откуда $Q_T''' = Q_T - Q_T' - Q_T'' .$

Количество твердого вещества в сброженном осадке

$$Q_T'' = y'' + z'', \quad Q_T'' = 0 + 0 = 0 \text{ кг},$$

тогда $Q_T''' = 40 - 24 - 0 = 16 \text{ кг}, \quad Q_{\text{ВЫХ}} = 0 + 16 = 16 \text{ кг}, \quad Q_M = 0,72 \cdot 16 = 11,52 \text{ кг}.$

Количество диоксида углерода, образующегося в процессе сбраживания (из условия задачи):

$$Q = 0,28Q''', Q = 0,28 \cdot 16 = 4,48 \text{ кг.}$$

Ответ: $x'' = 584 \text{ кг}$; $Q_M = 11,52 \text{ кг}$.

Задача 3. Одним из продуктов анаэробного сбраживания органического осадка сточных вод в перегнивателях-отстойниках является биогаз, содержащий около 70% метана (CH_4) и около 30% двуокиси углерода. После прохождения сероочистки этот биогаз используется в качестве топлива. Сжигание биогаза происходит, как правило, в присутствии 10 %-ного избытка кислорода, что обеспечивает практически полное разложение метана. Источником кислорода является воздух, состоящий на 79,1% (по массе) из азота и 20,9% (по массе) из кислорода. Азот, двуокись углерода и избыточный кислород не претерпевают изменений в процессе сжигания. В результате сжигания образуются двуокись углерода и вода, которые выбрасываются в атмосферу. Определить общее количество веществ, поступающих в установку и выходящих из нее, если количество биогаза, подаваемого на установку из нескольких отстойников-перегнивателей, составляет 1000 кг. Принять, что накопления веществ в системе не происходит.

Дано:

$$Q_M = 0,7 Q_{\text{бг}}$$

$$Q_D = 0,3 Q_{\text{бг}}$$

$$Q_{\text{изб.к}} = 0,1 \cdot Q_K$$

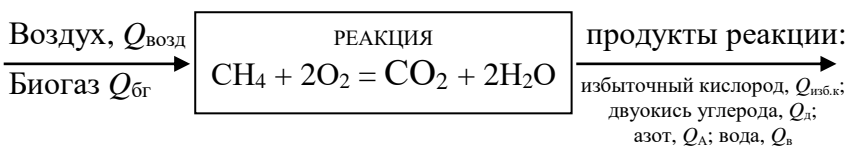
$$Q_K + Q_{\text{изб.к}} = 0,209 \cdot Q_{\text{возд}}$$

$$Q_{\text{бг}} = 1000 \text{ кг}$$

$$\mu_{\text{нак}} = 0$$

Решение:

Составим технологическую схему установки для сжигания биогаза:



$$Q_{\text{возд}} = Q_A + Q_K + Q_{\text{изб.к}}, \text{ кг,}$$

$$\text{где азот } Q_A = 0,791 \cdot Q_{\text{возд}}, \text{ кг,}$$

$$\text{кислород } (Q_K + Q_{\text{изб.к}}) = 0,209 \cdot Q_{\text{возд}}, \text{ кг,}$$

$$\text{Биогаз } Q_{\text{бг}} = Q_M + Q_D = 1000 \text{ кг,}$$

$$Q_D; Q_M \text{ (кг)}$$

$$\text{где метан } Q_M = 0,7 Q_{\text{бг}}, \text{ кг,}$$

$$\text{двуокись углерода } Q_D = 0,3 Q_{\text{бг}}, \text{ кг.}$$

$$Q_{\text{изб.к}}; Q_A; Q_D; Q_M - ?$$

Материальный баланс установки для сжигания биогаза

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}}$$

Общее количество веществ на входе в установку

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{возд}} + Q_{\text{бг}}$$

Количество воздуха, необходимого для сжигания метана:

$$Q_{\text{возд}} = Q_{\text{А}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{изб.к}}$$

Количество азота на входе в установку

$$Q_{\text{А}} = 0,791 \cdot Q_{\text{возд}}$$

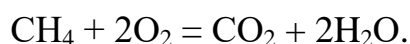
Количество воздуха на входе в установку можно также определить из формулы

$$Q_{\text{к}} + Q_{\text{изб.к}} = 0,209 \cdot Q_{\text{возд}}$$

откуда

$$Q_{\text{возд}} = \frac{Q_{\text{к}} + Q_{\text{изб.к}}}{0,209}$$

Расчет количества кислорода $Q_{\text{к}}$, необходимого для проведения реакции горения, производим с учетом стехиометрического уравнения реакции



Или с указанием массы реагентов на 1 моль:



Следовательно, для сжигания каждых 16 кг метана необходимо 64 кг кислорода и, соответственно, количество кислорода $Q_{\text{к}}$, необходимое для сжигания $Q_{\text{м}}$ метана, определяется из пропорции:

$$\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \rightarrow 2\mu_{\text{O}_2} = 64 \text{ кг}, \quad Q_{\text{м}}, \text{ кг} \rightarrow Q_{\text{к}}, \text{ кг},$$

откуда
$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{м}} \frac{2\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{CH}_4}}$$

Количество метана в биогазе на входе в установку

$$Q_M = 0,7 Q_{\text{бг}}, \quad Q_M = 0,71000 \text{ кг } \text{CH}_4,$$

тогда
$$Q_K = 700 \frac{64}{16} = 2800 \text{ кг } \text{O}_2.$$

10%-ный избыток кислорода, необходимый для полного сжигания метана:

$$Q_{\text{изб.к}} = 0,1 Q_K, \quad Q_{\text{изб.к}} = 0,1 \cdot 2800 = 280 \text{ кг } \text{O}_2,$$

тогда
$$Q_{\text{возд}} = \frac{2800}{0,209} = 14 \, 737 \text{ кг } \text{возд.};$$

$$Q_A = 0,791 Q_{\text{возд}}, \quad Q_A = 0,791 \cdot 14 \, 737 = 11 \, 657 \text{ кг } \text{N}_2,$$

$$Q_{\text{вх}} = 14 \, 737 + 1000 = 15 \, 737 \text{ кг.}$$

Общее количество веществ на выходе из установки

$$Q_{\text{вых}} = Q'_D + Q'_B + Q_{\text{изб.к}} + Q_D + Q_A.$$

Каждые 16 кг сгоревшего метана дают 44 кг образовавшейся двуокиси углерода и, соответственно, количество двуокиси углерода, образовавшейся при сгорании $Q_M = 700$ кг метана, определяется из пропорции:

$$\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \rightarrow \mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг}, \quad Q_M = 700 \text{ кг} \rightarrow Q'_D, \text{ кг},$$

откуда
$$Q'_D = Q_M \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{CH}_4}}; \quad Q'_D = 700 \cdot \frac{44}{16} = 1925 \text{ кг } \text{CO}_2.$$

Каждые 16 кг сгоревшего метана дают 36 кг образовавшейся воды и, соответственно, количество воды, образовавшейся при сгорании $Q_M = 700$ кг метана, определяется из пропорции:

$$\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ кг} \rightarrow 2 \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 36, \quad Q_M = 700 \text{ кг} \rightarrow Q'_B, \text{ кг},$$

откуда
$$Q'_B = Q_M \frac{2 \mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{CH}_4}}; \quad Q'_B = 700 \cdot \frac{36}{16} = 1575 \text{ кг } \text{H}_2\text{O}.$$

Количество двуокиси углерода, поступающей вместе с биогазом в установку:

$$Q_{\text{д}} = 0,3 \cdot Q_{\text{бг}}, \quad Q_{\text{д}} = 0,3 \cdot 1000 = 300 \text{ кг } \text{CO}_2,$$

тогда $Q_{\text{вых}} = 1925 + 1575 + 280 + 300 + 11\,657 = 15\,737 \text{ кг}$.

Проверка:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}}; \quad 15\,737 = 15\,737.$$

Ответ: $Q_{\text{вх}} = 15\,737 \text{ кг}$; $Q_{\text{вых}} = 15\,737 \text{ кг}$; $Q_{\text{м}} = 700 \text{ кг}$; $Q_{\text{д}} = 300 \text{ кг}$;
 $Q_{\text{к}} = 2800 \text{ кг}$; $Q_{\text{изб.к}} = 280 \text{ кг}$; $Q_{\text{а}} = 11\,657 \text{ кг}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практикум включает в себя рассмотрение широкого круга вопросов, касающихся проблем организации современных систем энерго- и ресурсосберегающих технологий в хозяйственной деятельности человека и создания автономных систем энергообеспечения на основе альтернативных источников энергии.

Рассмотрены методики расчета ветроэнергетических установок, солнечной батареи, биогазовых установок, тепловых насосов.

Приведены основные закономерности и формулы, рассмотрены примеры расчета теплоизоляционных конструкций. Наглядно рассмотрена и подкреплена расчетами проблема потерь тепловой энергии в результате образования отложений в трубопроводах и теплообменном оборудовании.

Рассмотрена проблема подбора материалов и расчета аккумуляторов тепловой энергии для более эффективного использования теплоты, полученной от альтернативных источников энергии.

Отдельная глава посвящена водосберегающим технологиям, технологиям оборотного водоснабжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **СП 61.13330.2012.** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов (Источник : ИСС «ТЕХЭКСПЕРТ»).
2. **Процессы** и аппараты химической технологии. Общий курс : учебник в 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов и др. ; под ред. В. Г. Айнштейна. – 8-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2019. – Кн. 1. – 916 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/111193>
3. **СП 41-103–2000.** Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов (Источник : ИСС «ТЕХЭКСПЕРТ»).
4. **Замалеев, З. Х.** Основы гидравлики и теплотехники : учебное пособие для вузов / З. Х. Замалеев, В. Н. Посохин, В. М. Чефанов. – 3-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2021. – 352 с. // Лань : электронно-библиотечная система.– URL : <https://e.lanbook.com/book/169446>
5. **СНиП 2.04.03–85.** Канализация. Наружные сети и сооружения.
6. **ГОСТ Р 52808–2007.** Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения.
7. **ГОСТ Р 53790–2010.** Нетрадиционные технологии. ЭНЕРГЕТИКА БИООТХОДОВ. Общие технические требования к биогазовым установкам.
8. **Дубровский, В.** Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В. Дубровский, У. Виестур. – Рига : Зинатне, 1988.
9. **СП 32.13330.2018.** Канализация. Наружные сети и сооружения.
10. **Методические рекомендации** по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета РД-АПК 1.10.15.02-08.
11. **Процессы** и аппараты химической технологии. Общий курс : учебник : в 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов и др. ; под ред. В. Г. Айнштейна. – 8-е изд., стер. – СПб. : Лань, [б. г.]. – Книга 1 : Книга 1 – 2019. – 916 с. // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/book/111193>
12. **Павлов, К. Ф.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков,

А. А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН России П. Г. Романкова. – 13-е изд., стер. Перепечатка с издания 1987 г. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2006. – 576 с.

13. **Агеев, В. А.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, МРСУ / В. А. Агеев. – 2004. – 174 с.

14. **Нетрадиционные и возобновляемые источники** энергии : учебное пособие / сост. : В. Я. Губарев, А. Г. Арзамасцев. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2014. – 72 с.

15. **Нетрадиционные и возобновляемые источники** энергии : учебное пособие / сост. И. Ю. Чуенкова. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. – 148 с.

16. **Ляшков, В. И.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учебное пособие / В. И. Ляшков, С. Н. Кузьмин. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. – 95 с.

17. **Нетрадиционные и возобновляемые источники** энергии : учебное пособие / сост. : В. Е. Губин и др. – Томск : Томский политехнический университет, 2019. – 152 с.

18. **Нетрадиционные и возобновляемые источники** энергии для получения теплоты в системах теплоснабжения: использование с применением тепловых насосов : методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и 270109.65 Теплогазоснабжения и вентиляция / сост. Г. М. Климов, Е. Н. Цой, М. Г. Климов ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Н. Новгород : ННГАСУ, 2013. – 50 с.

19. **Сухоцкий, А. Б.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : курс лекций для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / А. Б. Сухоцкий, В. Н. Фарафонов. – Минск : БГТУ, 2009. – 246 с.

20. **Хахалева, Л. В.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : пособие для проведения практических занятий / сост. Л. В. Хахалева. – Ульяновск, 2008. – 32 с.

21. **Нетрадиционные и возобновляемые источники** энергии : учебное пособие / Ю. Ц. Бадмаев, М. Б. Балданов, Л. П. Шкедова, А. К. Ондар. – Улан-Удэ : Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В. Р. Филиппова, 2022. – 220 с.

22. **Применение нетрадиционных возобновляемых источников** энергии и топлива в системах теплогазоснабжения и вентиляции : учебное пособие / А. П. Усачев, А. Л. Шурайц, А. В. Рулев, С. С. Кузнецов. – 2-е изд. – Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2022. – 104 с.

23. **Оценки** ресурсов возобновляемых источников энергии в России : справочник-учебное пособие / Ю. С. Васильев, П. П. Безруких, В. В. Елистратов, Г. И. Сидоренко. – СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2008. – 251 с.

24. **Удалов, С. Н.** Возобновляемые источники энергии : учебное пособие / С. Н. Удалов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 460 с.

25. **Стоянов, Н. И.** Использование вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии. Энергоаудит : учебное пособие (курс лекций) / Н. И. Стоянов, С. С. Смирнов, А. В. Смирнова. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. – 121 с.

26. **Возобновляемые источники** энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В. Х. Бердин, А. О. Кокорин, Г. М. Юлкин, М. А. Юлкин. – М. : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 81 с.

27. **Мартюшев, Д. А.** Возобновляемые источники энергии : учебное пособие / Д. А. Мартюшев, П. Ю. Илюшин. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2015. – 136 с.

28. **Нетрадиционные источники** энергии : учебное пособие. Ч. 1 / Н. П. Краснова, И. В. Макаров, А. С. Горшенин, Ю. И. Рахимова. – Самара : Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2019. – 48 с.

29. **Нетрадиционные источники** энергии. : учебное пособие Ч. 2 / Н. П. Краснова, А. С. Горшенин, Ю. И. Рахимова, И. В. Макаров. – Самара : Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2020. – 60 с.

30. **Пархоменко, Ю. Н.** Физика и технология приборов фотоники: солнечная энергетика и нанотехнологии : учебное пособие / Ю. Н. Пархоменко, А. А. Полисан. – 2-е изд. – М. : Издательский Дом МИСиС, 2014. – 183 с.

31. **Мировая энергетика – 2050.** Белая книга / В. В. Бушуев, А. М. Мастепанов, Н. К. Куричев и др. – М. : Энергия, Институт энергетической стратегии, 2011. – 355 с.

32. **Сибикин, М. Ю.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учебное пособие / М. Ю. Сибикин, Ю. Д. Сибикин. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2014. – 229 с.

33. **Безруких, П. П.** Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов / П. П. Безруких. – М. : Институт устойчивого развития, 2014. – 74 с.

34. **Лукутин, Б. В.** Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учебное пособие / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск : Изд-во Томского политех. университета, 2015. – 120 с.

35. **Об энергосбережении** и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 23.11.2009 № 261. – URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 15.05.23).

36. **Энергосбережение и повышение энергетической эффективности** на период до 2020 года [Электронный ресурс] : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.12.2010 № 2446-р. – URL : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55070341/> (дата обращения: 15.05.23)

37. **Кашкаров, А. П.** Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / А. П. Кашкаров. – Саратов : Профобразование, 2017. – 144 с.

38. **Кривцов, В. С.** Неисчерпаемая энергия. Ветроэнергетика. Харьков : ХАИ, 2014. 158 с. 10. Научный журнал Куб ГАУ [Электронный ресурс] / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев // Интернет-сайт. – URL : <http://ej.kubagro.ru/> (дата обращения: 16.05.23).

39. **Безруких, П. П.** Ветроэнергетика : справочное и методическое пособие / П. П. Безруких. – М. : Энергия, Институт энергетической стратегии, 2013. – 315 с.

40. **Бурмистров, А. А.** Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии : учебное пособие для вузов по направлению «Электроэнергетика» / А. А. Бурмистров, В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина. – Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – 144 с.

41. **Применение** ветроколес и генераторов для ветроэнергетических установок малой мощности / А. А. Бубенчиков, Е. Ю. Артамонова, Р. А. Дайчман и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 5–2(36). – С. 35 – 39.

42. **Теплоэнергетические установки** и системы сельского хозяйства / Р. А. Амерханов, А. С. Бессараб, Б. Х. Драганов и др. ; под ред. Б. Х. Драганова. – М. : Колос-Пресс, 2002. – 424 с.

43. **Федоренко, В. Ф.** Инновационное развитие альтернативной энергетики / В. Ф. Федоренко, Н. Т. Сорокин, Д. С. Буклагин. – М. : ФГНУ « Росинфорагротех», 2016. – 348 с.

44. **Елистратов, В. В.** Ветроэнергоустановки. Автономные ветроустановки и комплексы : учебное пособие / В. В. Елистратов, М. В. Кузнецов, С. Е. Лыков. – СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2008. – 101 с.

45. **Удалов, С. Н.** Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики : монография / С. Н. Удалов, В. З. Манусов. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. – 200 с.

46. **Тремясов, В. А.** Теория надежности в энергетике. Надежность систем генерации, использующих ветровую и солнечную энергию : учебное пособие / В. А. Тремясов, Т. В. Кривенко. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2017. – 164 с.

47. **Власов, В. К.** Ветродвигатели. Теория и практика / В. К. Власов. – М. : Техносфера, 2020. – 226 с.

48. **Казакевич, М. И.** Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия : монография / М. И. Казакевич. – 2-е изд. – М. : МИСИ-МГСУ, ЭБС АСВ, 2020. – 190 с.

49. **Тлеуов, А. Х.** Основы использования возобновляемых источников энергии. Кн. 2: Гелио- и ветроэнергетика : учебное пособие для вузов / А. Х. Тлеуов, А. А. Тлеуова, И. А. Пястолова. – Астана : Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, 2018. – 271 с.

50. **Обухов, С. Г.** Ветроэнергетические установки малой мощности. Технические характеристики, моделирование, рациональный выбор / С. Г. Обухов // Saarbrucken: LAP Lambert Academic Publishing. – 2014. – № 3. – 88 с.

51. **Безруких, П. П.** Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких. – СПб. : Наука, 2002. – 314 с.

52. **Янсон, Р. А.** Ветроустановки : учебное пособие / Р. А. Янсон. – М. : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2007. 36 с.

53. **Баринов, А. В.** Ветровая энергия / А. В. Баринов, Н. А. Шкалев // Изобретательство. – 2011. – Т. XI, № 8. – С. 42 – 44.

54. **Комплексное энергоснабжение** обособленных объектов от солнечной энергии : монография / Н. И. Стоянов, А. И. Воронин, А. Г. Стоянов, А. В. Шагров. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2014. – 96 с.

55. **Коркина, Е. В.** Расчет теплопоступлений от солнечной радиации за отопительный период и естественного освещения помещений зданий : учебно-методическое пособие / Е. В. Коркина. – М. : МИСИ-МГСУ, ЭБС АСВ, 2019. – 56 с.

56. **Даффи, Дж.** Основы солнечной теплоэнергетики : учебно-справочное руководство / Дж. Даффи, У. Бекман ; пер. О. С. Попель и др. ; под ред. О. С. Попеля. – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2013. – 887 с.

57. **Сажнев, А. М.** Источники бесперебойного электропитания на основе литий-ионных батарей : учебное пособие / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. –

Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2020. – 91 с.

58. **Карабанов, С. М.** Энергетика будущего. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. Тонкопленочные солнечные элементы и модули (техника, экономика, анализ рынка, перспектива развития) / С. М. Карабанов, П. П. Безруких, Т. А. Шушканова. – М. : Издательский дом «ЭНЕРГИЯ» 2014. – 84 с.

59. **Раушенбах, Г.** Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

60. **Солнечная энергетика** : учебное пособие для вузов / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 317 с.

61. **Исследование** теплового насоса : учебно-методическое пособие / В. В. Шишов, А. В. Борисенко, Н. А. Спасская, А. Г. Беседа. – М. : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2018. – 28 с.

62. **Тепловые насосы.** Теория принятия решений : учебно-методическое пособие / сост. Е. М. Бялецкая. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2022. – 64 с.

63. **Амерханов, Р. А.** Тепловые насосы / Р. А. Амерханов. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 160 с.

64. **Васьков, Е. Т.** Термодинамические основы тепловых насосов : учебное пособие для студ. специальностей 270109, 270105, 190601 / Е. Т. Васьков. – СПб. : СПбГАСУ, 2007. – 127 с.

65. **Дзино, А. А.** Тепловые насосы : учебно-методическое пособие / А. А. Дзино, О. С. Малинина. – СПб. : Университет ИТМО, 2016. – 43 с.

66. **Васильев, Г. П.** Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных установках / Г. П. Васильев, Н. В. Шилкин // АВОК. – 2003. – № 2. – С. 52 – 60.

67. **Лобачев, П. В.** Насосы и насосные станции : учебник / П. В. Лобачев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1983. – 191 с.

68. **Калинин, М. И.** Методы расчета и рекомендации по эффективному использованию приповерхностных геотермальных ресурсов в центральных регионах России / М. И. Калинин, Е. П. Кудрявцев, А. В. Баранов // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 10. – С. 26 – 33.

69. **Делягин, Г. Н.** Теплогенерирующие установки : учебник для вузов / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО «ИД «БАСТЕТ»», 2010. – 622 с.

70. **Тепловые насосы** / Ю. Н. Кропис, С. С. Муравейников, А. А. Никитин, и др. – СПб. : Университет ИТМО, 2022. – 76 с.

71. **Теплонасосные установки** в отраслях агропромышленного комплекса / Б. С. Бабыкин, А. Э. Суслов, Ю. А. Фатыхов, В. Н. Эрлихман. – 2021.

72. **Соколов, Е. Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения : учебное пособие / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 320 с.

73. **Чемяков, В. В.** Система теплоснабжения автономного жилого дома на основе теплового насоса и ветроэлектрической установки / В. В. Чемяков, В. В. Харченко // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 58 – 62.

74. **Сычев, А. О.** Пути повышения технико-экономических показателей теплонасосных установок, использующих теплоту поверхностных вод / А. О. Сычев, В. В. Харченко // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 10–11. – С. 84 – 90.

75. **Перспективы** применения тепловых насосов для повышения энергоэффективности АПК / В. И. Черноиванов, Ю. А. Мазалов, А. А. Захаров, А. Ф. Конов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология : тр. 7 Междунар. науч.-тех. конф., 18–19 мая, 2010 г., г. Москва. – М., 2010. – С. 265 – 269.

76. **Гершкович, В. Ф.** От централизованного теплоснабжения – к тепловым насосам / В. Ф. Гершкович // Энергосбережение. – 2010. – № 3. – С. 24 – 28.

77. **Мартынов, А. В.** Установки для трансформации тепла и охлаждения : Сборник задач : учебное пособие / А. В. Мартынов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.

78. **Власова, Ю. Ю.** Применение тепловых насосов на нужды теплоснабжения в средней полосе России / Ю. Ю. Власова // Новая наука: Практический и теоретический взгляд : Междунар. научное периодическое издание по итогам Междунар. науч.-практ. конф. (14 мая 2016 г, г. Нижний Новгород) : в 2 ч. Ч. 2. – Стерлитамак : АМИ, 2016. – С. 166 – 168.

79. **Трубаев, П. А.** Тепловые насосы : учебное пособие для магистров / П. А. Трубаев, Б. М. Гришко – М. : Изд-во «Белгород», 2009. – 142 с.

80. **Александров, А. А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / А. А. Александров. – М. : Изд-во МЭИ.– 2006. – 157 с.

81. **Горшков, В. Г.** Тепловые насосы. Аналитический обзор // Справочник промышленного оборудования / В. Г. Горшков. – 2010. – № 2. – С. 47 – 80.

82. **Соколов, В. В.** Теплоиспользующие холодильные машины. Тепловые насосы: практикум по дисциплине : учебно-методическое пособие для обучающихся по специальности 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», профиль «Холодильная техника и системы кондиционирования» / В. В. Соколов ; Севастопольский государственный университет. – Севастополь : СевГУ, 2022. – 35 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

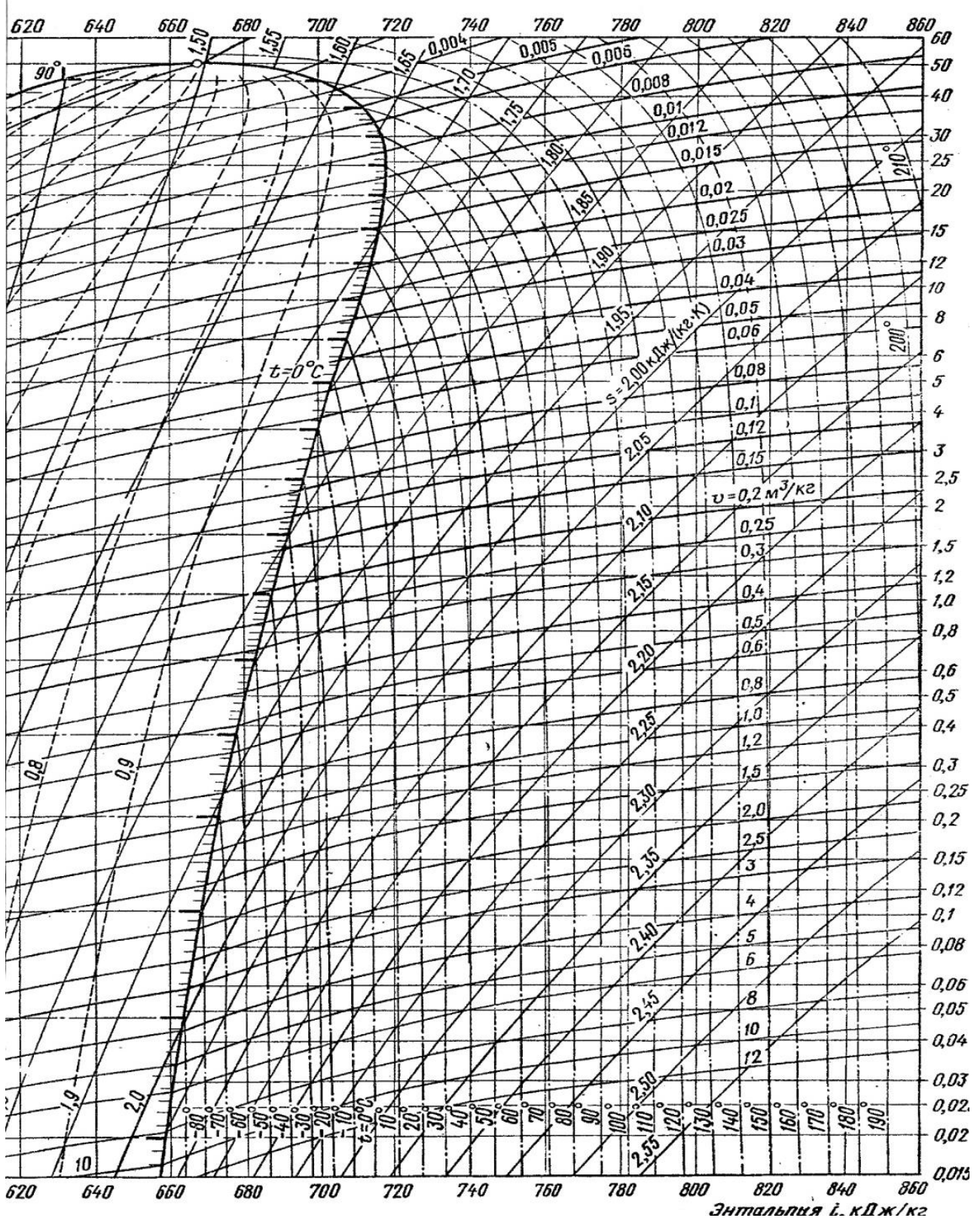
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

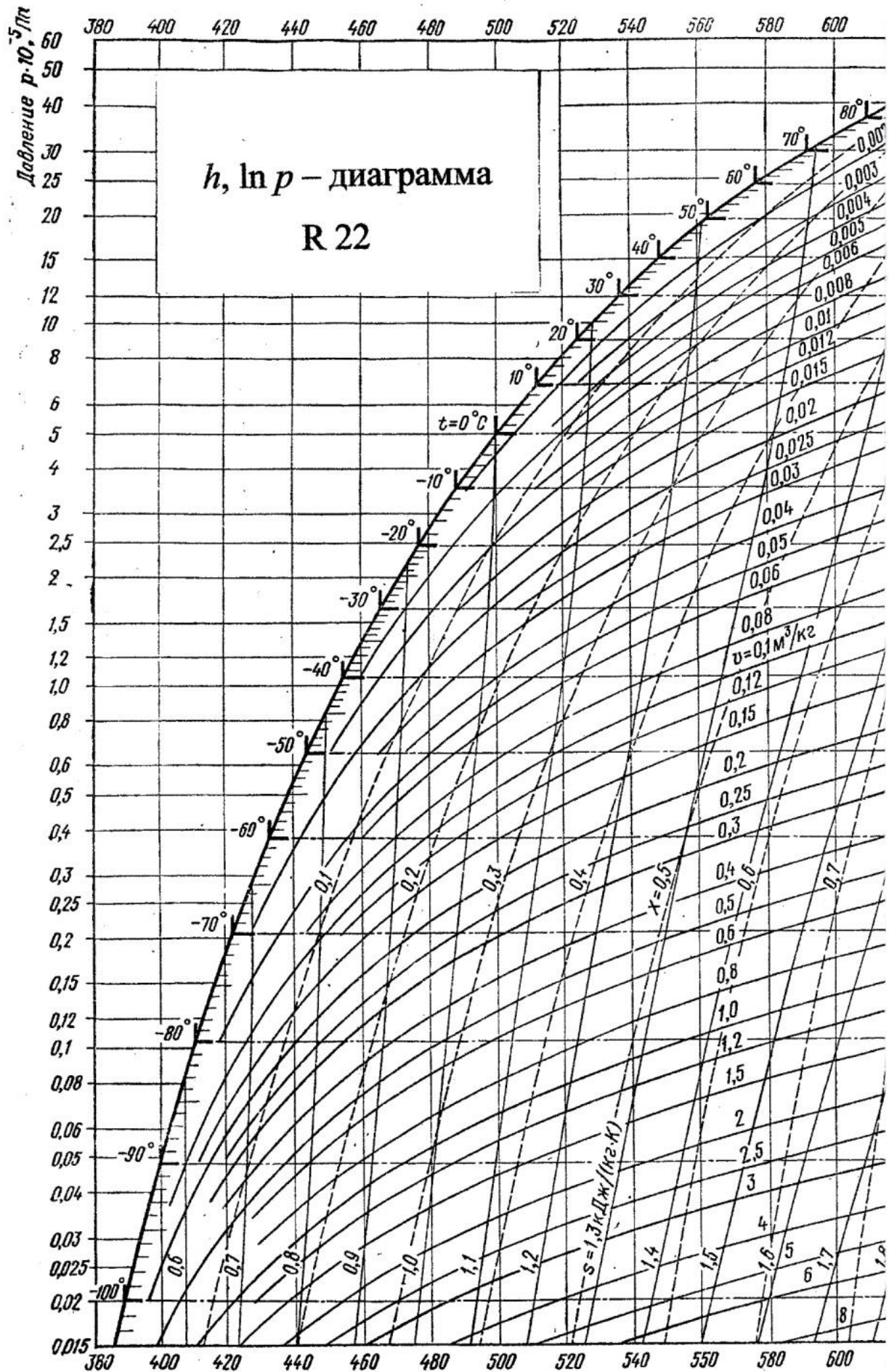
П.1.1. Параметры R-22 при температуре насыщения

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, 10^5 \text{ Па}$	Удельный объем $V, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$		Удельная энтальпия $i, \text{ кДж/кг}$		Удельная энтропия $s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	
		жидкости	пара	жидкости	пара	жидкости	пара
-40	1,053	0,711	204,75	454,60	687,65	0,8216	1,8211
-10	3,550	0,760	65,104	488,4	700,6	0,957	1,764
-8	3,807	0,765	60,864	490,7	701,4	0,966	1,760
-6	4,079	0,768	56,980	493,0	702,2	0,974	1,757
-4	4,365	0,772	53,390	495,3	702,9	0,983	1,754
-2	4,665	0,776	50,075	497,7	703,7	0,992	1,751
0	4,981	0,780	46,992	500,0	704,4	1,000	1,748
2	5,313	0,784	44,150	502,4	705,2	1,009	1,746
4	5,661	0,788	41,494	504,7	705,9	1,017	1,743
6	6,027	0,792	39,047	507,1	706,6	1,025	1,740
8	6,409	0,797	36,765	509,4	707,3	1,034	1,737
10	6,809	0,801	34,638	511,8	707,9	1,042	1,735
12	7,228	0,806	32,584	514,2	708,6	1,050	1,732
14	7,666	0,811	30,798	516,6	709,2	1,059	1,7293
16	8,123	0,816	29,078	519,0	709,8	1,067	1,727
18	8,600	0,820	27,465	521,5	710,5	1,075	1,724
20	9,097	0,826	25,954	523,9	711,0	1,083	1,722
22	9,616	0,831	24,540	526,4	711,6	1,092	1,719

Температура t , °С	Давление p , 10^5 Па	Удельный объем V , 10^{-3} м ³ /кг		Удельная энтальпия i , кДж/кг		Удельная энтропия s , кДж/(кг·К)	
		жидкости	пара	жидкости	пара	жидкости	пара
24	10,156	0,836	23,213	528,9	712,2	1,100	1,717
26	10,719	0,842	21,968	531,4	712,7	1,108	1,714
28	11,304	0,847	20,799	533,9	713,2	1,116	1,712
30	11,913	0,853	19,700	536,4	713,7	1,124	1,709
32	12,546	0,859	18,667	538,0	714,1	1,132	1,707
34	13,203	0,865	17,693	541,5	714,6	1,141	1,704
36	13,885	0,872	16,776	544,1	715,0	1,149	1,702
38	14,593	0,878	15,911	546,7	715,3	1,157	1,699
40	15,327	0,885	15,094	549,3	715,7	1,165	1,697
42	16,089	0,892	14,324	552,0	716,0	1,174	1,694
44	16,878	0,899	13,592	554,6	716,3	1,182	1,692
46	17,695	0,907	12,902	557,4	716,5	1,190	1,689
48	18,542	0,915	12,246	560,1	716,8	1,198	1,686
50	19,418	0,923	11,625	562,8	716,9	1,207	1,684
52	20,324	0,932	11,036	565,6	717,1	1,215	1,681
54	21,261	0,941	10,470	568,5	717,2	1,224	1,678
56	22,230	0,950	9,940	571,4	717,2	1,232	1,675
58	23,232	0,960	9,434	574,3	717,2	1,241	1,672
60	24,267	0,970	8,952	577,2	717,1	1,249	1,669
62	25,336	0,980	8,489	580,2	717,0	1,258	1,666
64	26,440	0,992	8,052	583,3	716,8	1,267	1,663
66	27,580	1,004	7,628	586,4	716,5	1,276	1,659

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, 10^5 \text{ Па}$	Удельный объем $V, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$		Удельная энтальпия $i, \text{ кДж/кг}$		Удельная энтропия $s, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	
		жидкости	пара	жидкости	пара	жидкости	пара
68	28,757	1,017	7,225	589,6	716,1	1,285	1,655
70	29,971	1,031	6,835	592,9	715,7	1,294	1,652
72	31,223	1,045	6,464	596,2	715,1	1,303	1,648
74	32,516	1,061	6,105	599,6	714,5	1,312	1,643
76	33,848	1,079	5,757	603,1	713,7	1,322	1,639
78	35,223	1,098	5,423	606,7	712,7	1,332	1,634
80	36,640	1,118	5,097	610,5	711,6	1,342	1,628
82	38,102	1,142	4,778	614,4	710,2	1,353	1,623
84	39,610	1,169	4,464	618,4	708,6	1,364	1,616
86	41,165	1,199	4,156	622,8	706,6	1,375	1,699
88	42,769	1,236	3,848	627,4	704,2	1,388	1,600
90	44,424	1,282	3,532	632,4	701,2	1,401	1,590
92	46,134	1,342	3,200	638,2	697,2	1,416	1,578
96,13	49,860	512,800		668,6		1,497	





П.3.1. Параметры R-12 при температуре насыщения

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, \text{МПа}$	Удельный объем $V, \text{м}^3/\text{кг}$		Удельная энтальпия $i, \text{кДж/кг}$	
		жидкости	пара	жидкости	пара
-50	0,039	0,000647	0,385	354,55	528,9
-48	0,043	0,000649	0,350	356,29	529,84
-46	0,048	0,000651	0,319	358,05	530,78
-44	0,053	0,000654	0,291	359,81	531,72
-42	0,058	0,000657	0,267	361,57	532,66
-40	0,064	0,000659	0,244	363,34	533,6
-38	0,070	0,000662	0,224	365,12	534,54
-36	0,077	0,000664	0,206	366,9	535,48
-34	0,084	0,000667	0,189	368,69	536,42
-32	0,092	0,000670	0,175	370,49	537,36
-30	0,100	0,000672	0,161	372,29	538,3
-28	0,109	0,000675	0,149	374,1	539,23
-26	0,118	0,000678	0,138	375,91	540,17
-24	0,128	0,000681	0,128	377,73	541,1
-22	0,139	0,000683	0,119	379,56	542,03
-20	0,150	0,000687	0,111	381,38	542,96
-18	0,164	0,000690	0,103	383,22	543,88
-16	0,175	0,000692	0,096	385,06	544,8
-14	0,189	0,000695	0,090	386,91	545,72
-12	0,203	0,000699	0,084	388,76	546,64
-10	0,219	0,000702	0,078	390,63	547,55

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, \text{МПа}$	Удельный объем $V, \text{м}^3/\text{кг}$		Удельная энтальпия $i, \text{кДж/кг}$	
		жидкости	пара	жидкости	пара
-8	0,235	0,000705	0,073	392,48	548,46
-6	0,252	0,000708	0,069	394,36	549,37
-4	0,269	0,000711	0,064	396,23	550,27
-2	0,288	0,000714	0,060	398,12	551,17
0	0,308	0,000717	0,057	400	552,06
2	0,329	0,000720	0,053	401,9	552,95
4	0,351	0,000724	0,050	403,8	553,84
6	0,373	0,000727	0,047	405,7	554,71
8	0,397	0,000731	0,045	407,62	555,59
10	0,423	0,000734	0,042	409,54	556,45
12	0,449	0,000738	0,040	411,46	557,32
14	0,476	0,000741	0,038	413,38	558,17
16	0,505	0,000745	0,035	415,32	559,02
18	0,535	0,000749	0,033	417,27	559,86
20	0,566	0,000752	0,032	419,22	560,69
22	0,599	0,000757	0,030	421,18	561,51
24	0,633	0,000760	0,028	423,14	562,33
26	0,668	0,000764	0,027	425,11	563,13
28	0,705	0,000769	0,026	427,1	563,93
30	0,743	0,000773	0,024	429,08	564,72
32	0,783	0,000778	0,023	431,08	565,49
34	0,824	0,000782	0,022	433,09	566,26

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, \text{МПа}$	Удельный объем $V, \text{м}^3/\text{кг}$		Удельная энтальпия $i, \text{кДж/кг}$	
		жидкости	пара	жидкости	пара
36	0,867	0,000787	0,021	435,1	567,01
38	0,911	0,000792	0,020	437,12	567,75
40	0,958	0,000797	0,019	439,16	568,48
42	1,005	0,000802	0,018	441,2	569,19
44	1,055	0,000807	0,017	443,25	569,89
46	1,106	0,000813	0,016	445,32	570,57
48	1,159	0,000819	0,015	447,4	571,24
50	1,214	0,000824	0,015	449,49	571,89
52	1,271	0,000832	0,014	451,6	572,52
54	1,330	0,000839	0,013	453,72	573,13
56	1,391	0,000845	0,012	455,86	573,72
58	1,454	0,000852	0,012	458,01	574,29
60	1,519	0,000859	0,011	460,18	574,83
62	1,586	0,000866	0,011	462,38	575,35
64	1,655	0,000873	0,010	564,59	575,84
66	1,727	0,000881	0,010	466,82	576,31
68	1,800	0,000889	0,009	469,07	576,74
70	1,877	0,000897	0,009	471,36	577,14
72	1,955	0,000906	0,008	473,67	577,5
74	2,036	0,000915	0,008	476,02	577,83
76	2,120	0,000924	0,008	478,4	578,11
78	2,206	0,000934	0,007	480,81	578,35

Температура t , °С	Давление p , МПа	Удельный объем V , м ³ /кг		Удельная энтальпия i , кДж/кг	
		жидкости	пара	жидкости	пара
80	2,295	0,000945	0,007	483,27	578,54
82	2,386	0,000956	0,007	485,77	578,67
84	2,480	0,000968	0,006	488,31	578,74
86	2,577	0,000981	0,006	490,92	578,75
88	2,677	0,000995	0,006	493,59	578,68
89	2,728	0,001002	0,005	494 94	578,61
90	2,780	0,001010	0,005	496,32	578,52
91	2,833	0,001017	0,005	497,72	578,41
92	2,886	0,001026	0,005	499,13	578,27
93	2,940	0,001034	0,005	500,58	578,1
94	2,995	0,001043	0,005	502,04	577,91
95	3,051	0,001053	0,005	503,53	577,67
96	3,108	0,001063	0,005	505,05	577,41
97	3,165	0,001073	0,004	506,6	577,1
98	3,223	0,001084	0,004	508,19	576,75
99	3,282	0,001096	0,004	509,81	576,35
100	3,342	0,001109	0,004	511,47	575,9
102	3,464	0,001138	0,004	514,95	574,8
104	3,590	0,001172	0,003	518,69	573,37
106	3,720	0,001215	0,003	522,77	571,4
108	3,853	0,001273	0,003	527,43	568,86
110	3,990	0,001364	0,003	533,22	564,78
112	4,131	0,001876	0,002	551,09	551,09

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЧАСТЬ 1. ТЕХНОЛОГИИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	
1. РАСЧЕТ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ	5
1.1. Теория расчета	5
1.2. Примеры решения задач	9
1.3. Задачи для самостоятельного решения	11
2. РАСЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ	17
2.1. Теория расчета	17
2.2. Примеры решения задач	21
2.3. Задачи для самостоятельного решения	22
3. РАСЧЕТ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК	29
3.1. Теория расчета	29
3.2. Примеры решения задач	35
3.3. Задачи для самостоятельного решения	38
4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ	40
4.1. Теория расчета	40
4.2. Примеры решения задач	48
4.3. Задачи для самостоятельного решения	58
5. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ И ТЕПЛООБМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ	63
5.1. Теория расчета	63
5.2. Примеры решения задач	67
5.3. Задачи для самостоятельного решения	77
6. РАСЧЕТ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ	81
6.1. Теория расчета	81
6.2. Примеры решения задач	84
6.3. Задачи для самостоятельного решения	89
7. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО НАСОСА	91
7.1. Теория расчета	91
7.2. Примеры решения задач	102
7.3. Задачи для самостоятельного решения	105
ЧАСТЬ 2. ВОДОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ	
ЗАДАЧИ ПО ОБОРОТНОМУ ВОДОСНАБЖЕНИЮ	108
ЗАДАЧИ ПО СБРАЖИВАНИЮ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД И ПОЛУЧЕНИЮ БИОГАЗА	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	124
ПРИЛОЖЕНИЯ	132

Учебное электронное издание

СУВорова Юлия Александровна
КОЗАЧЕК Артемий Владимирович
НИКУЛИН Сергей Сергеевич

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2727-6



Подписано к использованию 29.12.2023.
Тираж 50 шт. Заказ № 188

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru