

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева

## ТЕПЛОМАССООБМЕН

### УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики и энергетического оборудования  
в качестве учебно-методического пособия  
по выполнению курсовой работы для студентов  
учреждений высшего образования  
по специальностям 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»*

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2026**

УДК 536.24(075.8)  
ББК 31.31я73  
О-34

Рецензент: зав. каф. «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»  
БНТУ д-р техн. наук, проф. *В. А. Седнин*;  
директор фил. «Гомельские тепловые сети» РУП «Гомельэнерго»  
*В. И. Коваленко*

**Овсянник, А. В.**

О-34 Тепломассообмен : учеб.-метод. пособие / А. В. Овсянник, Е. Н. Макеева ;  
М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель :  
ГГТУ им. П. О. Сухого, 2026. – 67 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300  
МГц ; 2 Gb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; ALT Linux 10.1 ; Adobe Acrobat  
Reader. – URL: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-570-1.

Содержит восемь лабораторных работ по основным разделам курса органической химии, включающих теоретические сведения, экспериментальную часть и вопросы для контроля.

Для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

УДК 536.24(075.8)  
ББК 31.31я73

ISBN 978-985-535-570-1

© Овсянник А. В., Макеева Е. Н., 2026  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2026

## Оглавление

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Введение.....                                                                                | 4         |
| Оформление курсовой работы и содержание<br>пояснительной записки .....                       | 5         |
| <b>Глава 1. Классификация теплообменных аппаратов .....</b>                                  | <b>8</b>  |
| 1.1. Кожухотрубчатые теплообменники.....                                                     | 9         |
| 1.2. Пластинчатые теплообменники .....                                                       | 16        |
| <b>Глава 2. Расчет кожухотрубчатого теплообменника .....</b>                                 | <b>27</b> |
| 2.1. Тепловой конструктивный расчет.....                                                     | 27        |
| 2.1.1. Расчет количества передаваемого тепла.....                                            | 27        |
| 2.1.2. Определение интенсивности процессов теплообмена.....                                  | 29        |
| 2.1.3. Определение коэффициента теплопередачи .....                                          | 32        |
| 2.1.4. Определение расчетной площади поверхности<br>теплообмена.....                         | 33        |
| 2.3. Определение температуры поверхности стенок трубы.....                                   | 36        |
| 2.4. Гидравлический расчет теплообменника .....                                              | 38        |
| 2.5. Определение толщины тепловой изоляции аппарата.....                                     | 39        |
| <b>Глава 3. Расчет пластинчатого теплообменника .....</b>                                    | <b>41</b> |
| 3.1. Тепловой расчет.....                                                                    | 41        |
| 3.1.1. Определение расходов и скоростей греющего<br>и нагреваемого теплоносителей .....      | 41        |
| 3.1.2. Расчет интенсивности теплообмена при движении<br>теплоносителей между пластинами..... | 42        |
| 3.1.3. Определение площади поверхности теплообмена .....                                     | 43        |
| 3.2. Гидравлический расчет пластинчатых теплообменников .....                                | 44        |
| 3.3. Компонировочный расчет.....                                                             | 44        |
| Литература .....                                                                             | 47        |
| Приложение 1 .....                                                                           | 48        |
| Приложение 2 .....                                                                           | 49        |
| Приложение 3 .....                                                                           | 51        |
| Приложение 4 .....                                                                           | 52        |
| Приложение 5 .....                                                                           | 63        |

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнение курсовой работы по курсу «Тепломассообмен» позволит студентам закрепить знания по основным разделам дисциплины, а также приобрести навыки применения теоретических знаний при решении теплотехнических задач.

Целью курсового проектирования является:

- получение навыков подбора и использования научной, технической, справочной литературы и ГОСТов;
- освоение методов технологического расчета различных процессов, теплового, конструктивного, гидравлического расчетов установок;
- развитие творческой инициативы студентов при самостоятельном решении поставленных перед ними задач;
- ознакомление с основами конструирования аппаратов, приемами интенсификации процессов теплообмена;
- выработка умения составлять и оформлять технологическую и конструкторскую документацию;
- развитие у студентов навыков технически грамотного изложения в пояснительной записке, обоснования принятых ими технических решений и методов расчета;
- развитие у студентов чувства ответственности за выполненную ими работу, принятые решения и умения обоснованно их защищать.

Курсовая работа выполняется по разделам «Расчет кожухотрубчатого теплообменника» и «Расчет пластинчатого теплообменника».

Условием качественного выполнения и защиты курсовой работы является самостоятельная творческая работа студентов с использованием специальной и справочной литературы. За принятые в проекте технические решения и правильность вычислений отвечает студент – автор работы.

Преподаватель – руководитель проекта – обеспечивает систематические консультации, на которых студенты согласовывают принятые ими проектные решения, а также получают ответы на все возникающие вопросы и рекомендации по использованию литературы.

Настоящее учебно-методическое пособие составлено с целью оказания помощи студентам, приступающим к выполнению курсовой работы, в отношении методов расчета, их последовательности, объема и содержания работы.

## **Оформление курсовой работы и содержание пояснительной записки**

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки и графического материала. Объем пояснительной записки – 25–30 страниц, графической части – один лист формата А1.

Пояснительная записка должна соответствовать требованиям ЕСКД, ГОСТ 2.105-79 «Общие требования к текстовым документам», ГОСТ 7.1-84 «Библиографическое описание документа».

Пояснительная записка оформляется на стандартных листах бумаги формата А4. При наборе текста с помощью компьютера применяется гарнитура шрифта Times New Roman, размер шрифта – 14 пунктов с использованием межстрочного интервала 18 пунктов (один межстрочный интервал) с выравниванием текста по ширине листа. Абзацный отступ – 1,25 мм. Размеры полей: слева – 30 мм, справа – 15 мм, сверху и снизу – 20 мм.

Страницы в тексте нумеруются, начиная с титульного листа, а в содержании указываются номера страниц, соответствующие каждому разделу записки.

Заголовки разделов должны быть краткими и соответствовать содержанию. Заголовки структурных элементов «СОДЕРЖАНИЕ», «ЗАКЛЮЧЕНИЕ» и др. следует располагать в середине строки без точки в конце и печатать прописными буквами. Разделы, подразделы, пункты следует нумеровать арабскими цифрами и записывать с абзацного отступа. После номера раздела, подраздела, пункта точку не ставят. Заголовки разделов, подразделов, пунктов следует печатать с абзацного отступа с прописной буквы без точки в конце. Каждый раздел имеет порядковый номер, обозначаемый арабской цифрой с точкой. Каждое последующее подразделение текста имеет нумерацию предыдущих, разделенных точками. Например, третий пункт второго подраздела первого раздела имеет обозначение: 1.2.3.

Терминология и определения в записке должны быть едиными и соответствовать установленным стандартам, а при их отсутствии – общепринятым в научно-технической литературе.

Все расчетные формулы в пояснительной записке приводятся сначала в общем виде, нумеруются, дается объяснение обозначений и размерностей всех входящих в формулы величин. Затем в формулу подставляют численные значения величин в том же порядке и записывают результаты расчета.

Все расчеты должны выполняться в международной системе единиц СИ. Если из справочников и других источников значения величин взяты в какой-либо другой системе единиц, перед подстановкой их в уравнения необходимо сделать перерасчет в систему единиц СИ. В тексте необходимо делать ссылки на литературный источник основных формул расчета, теплофизических параметров сред и других справочных данных. Ссылки на эти источники указываются в квадратных скобках. Например: «...для определения коэффициента теплоотдачи используется уравнение [9, с. 85]». Первая цифра в скобках соответствует номеру источника, указанного в списке использованной литературы.

Все иллюстрации (графики, схемы, чертежи) именуется рисунками. Рисунки нумеруются и располагаются после ссылки на них. Например: рис. 2.1 (первая цифра – номер раздела, вторая – порядковый номер рисунка в данном разделе). Название иллюстрации указывается под рисунком.

Все таблицы в записке нумеруются аналогично рисункам. Заголовки таблицы помещаются под словом «Таблица». Слово «Таблица» с номером размещается справа над таблицей. Все слова в заголовках и надписях таблицы пишутся полностью, без сокращений.

Пояснительная записка составляется в следующей последовательности: титульный лист, бланк задания на курсовое проектирование, содержание, введение, основная текстовая часть, заключение, список использованной литературы, приложения.

Форма титульного листа приведена в Приложении 1.

Задание на проектирование является основным исходным документом при выполнении курсовой работы и обязательно прикладывается к пояснительной записке (второй экземпляр листа задания должен храниться на кафедре). Пример формы бланка задания приведен в Приложении 2.

*Введение.* Объем введения должен быть не более 1–1,5 страниц. В нем приводятся краткие сведения о теплообменных аппаратах, указывается состояние разрабатываемого вопроса и основные задачи проектирования, характеризуются специфические особенности, актуальность и значение решаемых вопросов.

*Основная текстовая часть.* Она должна содержать описательный, расчетный и иллюстрационный материал.

Графическая часть проекта выполняется одновременно с расчетной, что позволяет вносить в расчеты необходимые поправки и

уточнения. Эта часть курсовой работы разрабатывается на уровне технического проекта (в соответствии с ГОСТ 2.119-73) и должна содержать чертеж общего вида кожухотрубчатого или пластинчатого теплообменного аппарата (по заданию преподавателя) – 1 лист формата А1.

Указанные документы по формату, масштабу, условным обозначениям, шрифтам должны строго соответствовать требованиям ЕСКД и сопровождаться основной надписью по форме 1, ГОСТ 2104-68, располагаемой в правом нижнем углу чертежа:

Графа 2 (шифр) — обозначение документа, по ГОСТ 2.201-80 для курсовой работы заполняется следующим образом:

код разработчика: вид проекта, специальность (шифр специальности), год, номер группы, номер варианта (две последние цифры в номере зачетки).

Например: КР 1-43 01 05.24.31.52.

Чертежи выполняются на стандартных листах со стандартными масштабами изображений (1:1; 1:2; 1:4; 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:40; 1:50; 1:75 и 1:100) в зависимости от габарита и сложности конструкции.

Изображения выполняются с максимальными упрощениями, предусмотренными стандартами ЕСКД для рабочих чертежей. Проставляются габаритные, установочные и присоединительные размеры изделия.

Наименования и обозначения составных частей изделия указываются на полках линий-выносок. Спецификация размещается на чертеже над штампом или выполняется на отдельных листах формата А4, прилагаемых к пояснительной записке в Приложении [4].

## Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообменные аппараты в зависимости способа передачи теплоты подразделяют на поверхностные – рекуперативные и регенеративные и смесительные (контактные) (рис. 1.1).

*Поверхностные теплообменники* представляют собой наиболее значительную группу аппаратов. В *рекуперативных аппаратах* теплоносители разделены стенкой, через которую теплота передается за счет теплопроводности материала стенки. Главной характеристикой таких аппаратов является площадь поверхности стенки, поскольку именно от ее размера зависит количество теплоты, передаваемой в аппарате от одного теплоносителя к другому. Форма поверхности стенки может быть трубчатой, плоской или иной. В *регенеративных теплообменниках* процесс переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному происходит на насадке, которая нагревается горячим теплоносителем, а затем сама нагревает холодный теплоноситель [7].

В *смесительных (контактных) теплообменниках* теплообмен происходит при непосредственном соприкосновении теплоносителей.

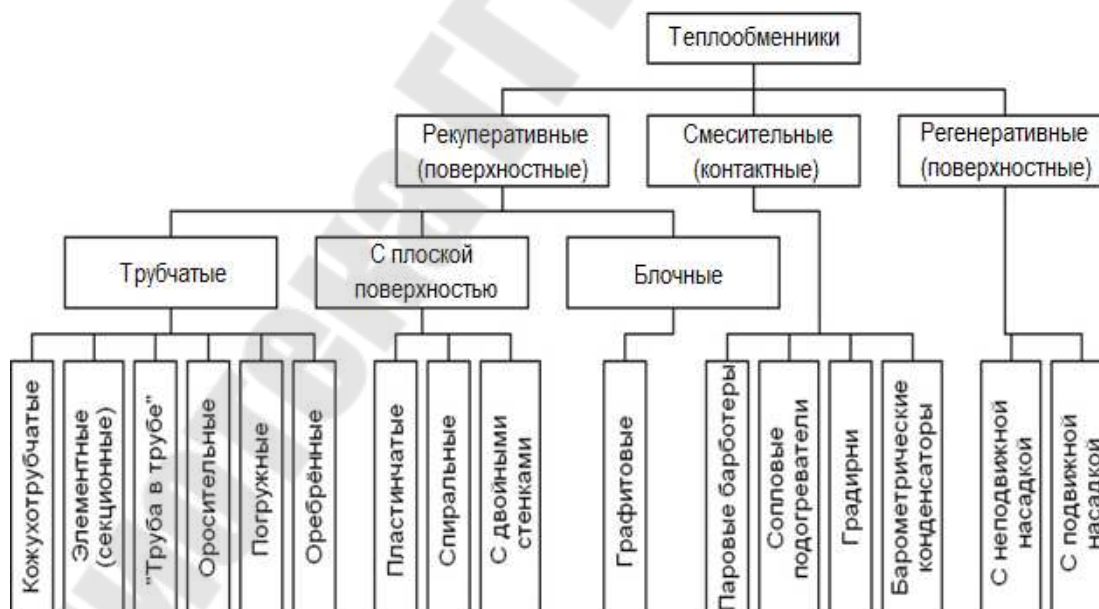


Рис.1.1. Классификация теплообменных аппаратов

По назначению поверхностные теплообменные аппараты подразделяют на следующие типы:

- *холодильники* – для охлаждения жидких или газовых сред;
- *подогреватели* – для нагрева жидких или газообразных сред жидким теплоносителем или конденсирующимся паром;
- *конденсаторы* – для конденсации паров при охлаждении водой или другим хладагентом;
- *испарители* – для испарения жидкостей при обогреве паром или высокотемпературным теплоносителем [1, 3].

### 1.1. Кожухотрубчатые теплообменники

В кожухотрубчатых теплообменных аппаратах поверхность теплообмена создается трубками, которые закреплены в трубных досках и размещены в кожухе [1].

**Устройство и принцип работы вертикального одноходового кожухотрубчатого теплообменника.** Горячий теплоноситель II через штуцер на днище 1 (рис. 1.2) поступает во входную камеру, образованную днищем и нижней трубной решеткой 2. Во входной камере поток теплоносителя распределяется по трубам 3, движется вверх, попадая в верхнюю камеру, образованную крышкой 4 и верхней трубной решеткой 5, и покидает аппарат через штуцер на крышке. Холодный теплоноситель I поступает в межтрубное пространство 6 и движется сверху вниз, обтекая трубы. В межтрубном пространстве установлены сегментные перегородки 7, способствующие турбулизации течения теплоносителя [7].

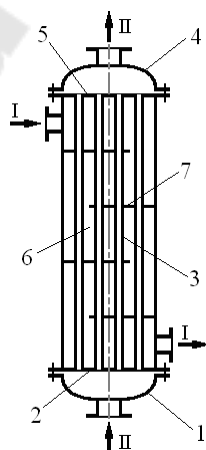


Рис. 1.2. Кожухотрубчатый одноходовой теплообменник:

- 1 – днище; 2 – нижняя трубная решетка;
- 3 – трубы; 4 – крышка; 5 – верхняя трубная решетка;
- 6 – межтрубное пространство; 7 – сегментные перегородки;
- I, II – теплоносители

**Схемы движения теплоносителей.** В зависимости от конструкции теплообменных аппаратов можно выделить следующие случаи взаимного движения теплоносителей в них [4]:

1. *Прямоток*: теплоносители движутся вдоль поверхности теплообмена строго в одном направлении по параллельным траекториям.

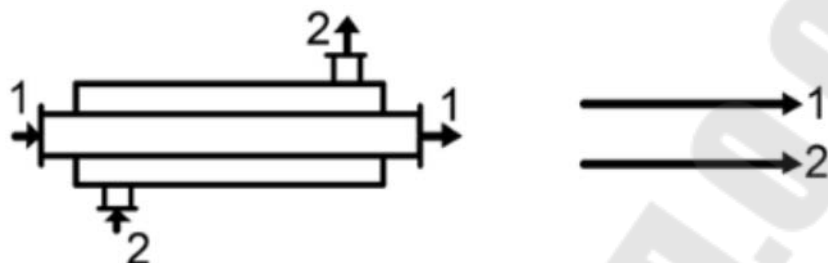


Рис. 1.3. Прямоток

2. *Противоток*: теплоносители движутся вдоль поверхности теплообмена по параллельным траекториям, но во встречных направлениях.

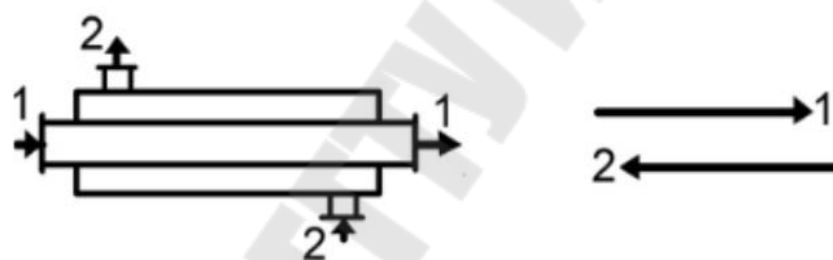


Рис. 1.4. Противоток

3. *Перекрестный ток*: такой режим возможен в оросительном теплообменнике, когда один теплоноситель движется по горизонтальной трубе, а второй омывает эту трубу сверху, вертикально, под прямым углом.

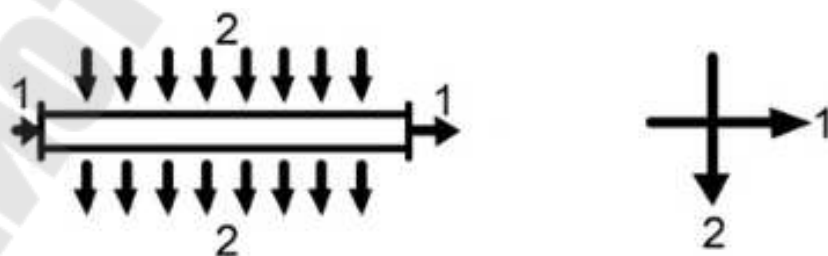


Рис. 1.5. Перекрестный ток

4. *Смешанный ток*: движение в многоходовых кожухотрубчатых теплообменниках, пластинчатых, и все остальные случаи движения теплоносителей, не относящиеся к первым трем группам.

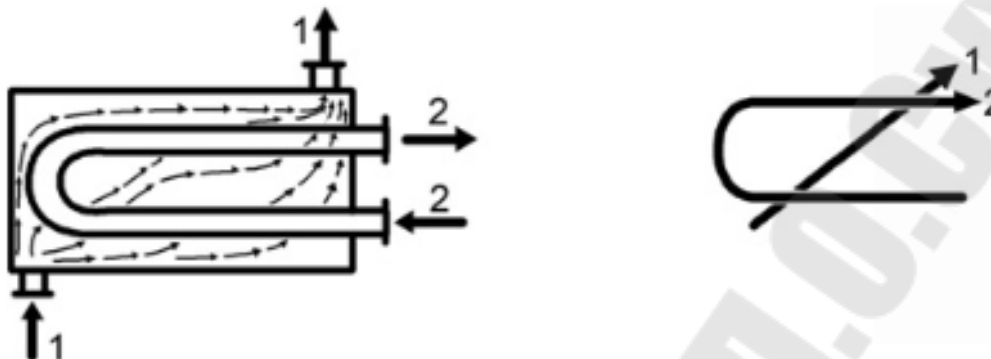


Рис. 1.6. Смешанный ток

**Размещение и способы крепления труб в трубных решетках.** Наиболее распространенный способ размещения труб в трубных решетках – по вершинам равносторонних треугольников (рис. 1.7, а). Применяются и другие способы размещения труб (рис. 1.7, б, в). Способ размещения должен обеспечить максимальную компактность аппарата, высокое значение коэффициента теплоотдачи, низкое гидравлическое сопротивление и возможность очистки межтрубного пространства.

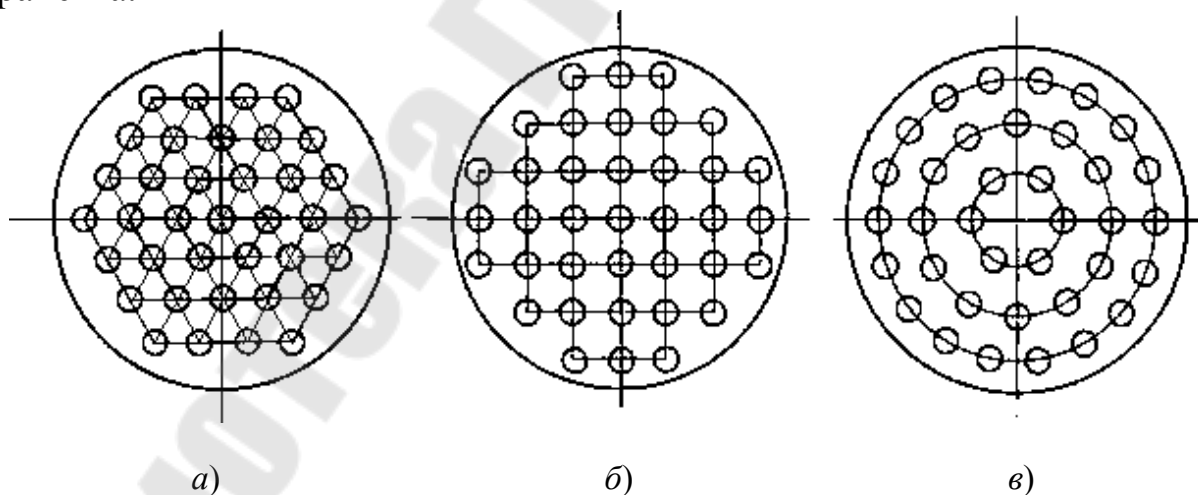


Рис. 1.7. Способы размещения труб в трубных решетках:

а – по вершинам равносторонних треугольников; б – по вершинам квадратов;  
в – по concentрическим окружностям

Для обеспечения герметизации теплообменников и предотвращения смешения теплоносителей разработаны различные способы крепления труб в трубных решетках (рис. 1.8). Чаще всего трубы закрепляют при помощи развальцовки, это наиболее удобный и распространенный метод. Если материал труб не поддается развальцовке, а также при большом давлении теплоносителя используют сварку. Применение сальниковых уплотнений дорого, сложно и недостаточно надежно, хотя значительно упрощает разбор теплообменника для его чистки. Кроме того, крепление труб с помощью сальникового уплотнения является одним из способов компенсации температурных деформаций теплообменника [7, 9].

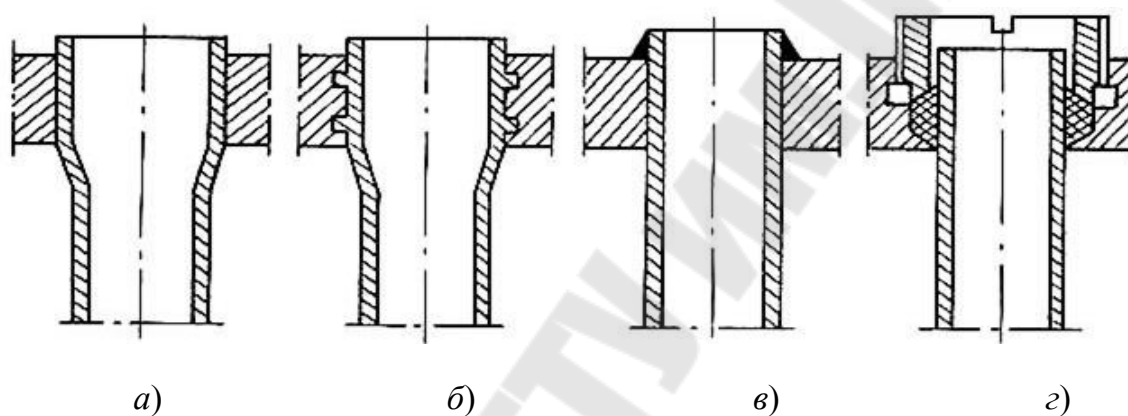


Рис. 1.8. Крепление труб в трубных решетках:  
*a* – развальцовка; *б* – развальцовка с канавками; *в* – сварка;  
*г* – сальниковые уплотнения

**Многоходовые кожухотрубчатые теплообменники.** Теплоноситель, поступающий в трубное пространство одноходового теплообменника, распределяется по всем трубам равномерно. Однако в случае относительно небольших расходов теплоносителя, это приводит к малой скорости теплоносителя в трубах и, как следствие, к низкому значению коэффициента теплоотдачи в трубном пространстве.

Для интенсификации теплоотдачи в трубном пространстве необходимо увеличить скорость теплоносителя в нем. Для этого теплоноситель распределяют не по всем трубам, а направляют его таким образом, чтобы он последовательно поступал только в первую часть труб, затем во вторую часть и т. д. При этом площадь сечения потока, поступающего в часть труб меньше, чем в исходном варианте одноходового теплообменника, следовательно, скорость теплоносителя возрастает. Такие теплообменники называют многоходовыми (рис. 1.9).

В многоходовом по трубному пространству кожухотрубчатом теплообменнике с помощью поперечных перегородок 2, установленных в крышке и днище теплообменника, пучок труб разделен на секции или ходы, по которым последовательно движется теплоноситель. Очевидно, что в таких теплообменниках скорость движения теплоносителя по трубам, при неизменном его расходе, увеличивается кратно числу ходов.

Для увеличения скорости, турбулизации потока, повышения коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве кожухотрубчатого теплообменника применяют сегментные перегородки. Применение сегментных перегородок эффективно только для теплоносителей, которые нагреваются или охлаждаются, т. е. не изменяющих фазового состояния.

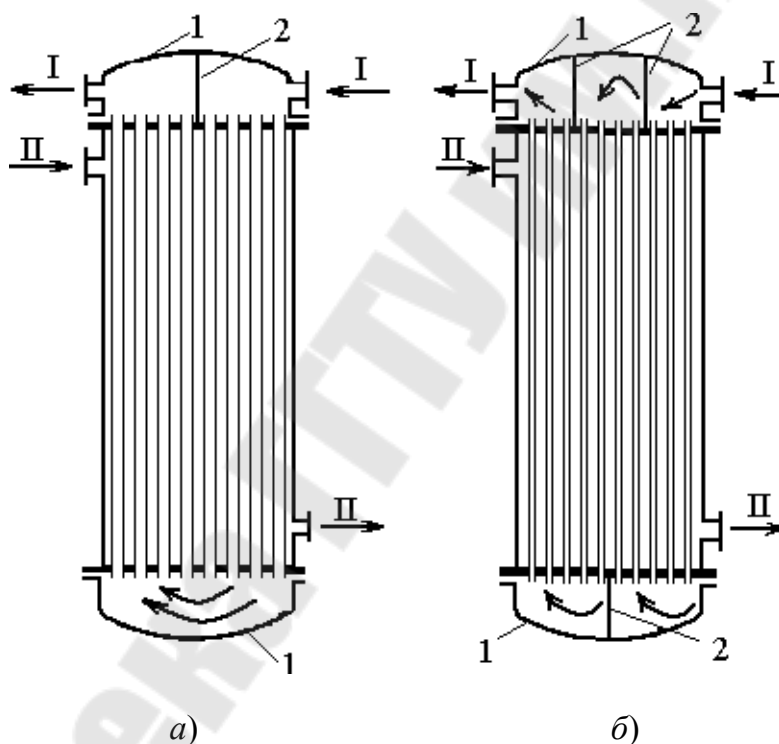


Рис. 1.9. Схема многоходовых кожухотрубчатых теплообменников:  
а – двухходовой; б – четырехходовой; 1 – крышки и днища;  
2 – перегородки; I, II – теплоносители

Увеличение скорости движения теплоносителей в трубном и межтрубном пространствах теплообменника влечет за собой увеличение гидравлического сопротивления, а также снижение движущей силы теплопередачи. Поэтому выбор конструкции кожухотрубчатого теплообменника должен быть сделан на основе технико-экономического анализа [9].

**Устройства для компенсации температурных деформаций.** Кожух теплообменника и его трубы контактируют с разными теплоносителями, температура этих элементов конструкции теплообменника различна. Если разница температур кожуха и труб достаточно велика (более 50 К), то кожух и трубы удлиняются существенно неодинаково, что влечет за собой значительные механические напряжения в трубных решетках, и может привести к нарушению плотности соединения труб с трубными решетками. Поэтому при значительных разностях температур кожуха и труб и большой длине труб теплообменника применяют теплообменники нежесткой конструкции (рис. 1.10).

При небольших температурных деформациях (не более 10–15 мм) и невысоких давлениях в межтрубном пространстве (не более 0,5 МПа) в качестве устройства для компенсации температурных деформаций может быть использован линзовый компенсатор – гибкая складка на кожухе теплообменника. Линзовый компенсатор прост, дешев, однако он значительно снижает прочность кожуха.

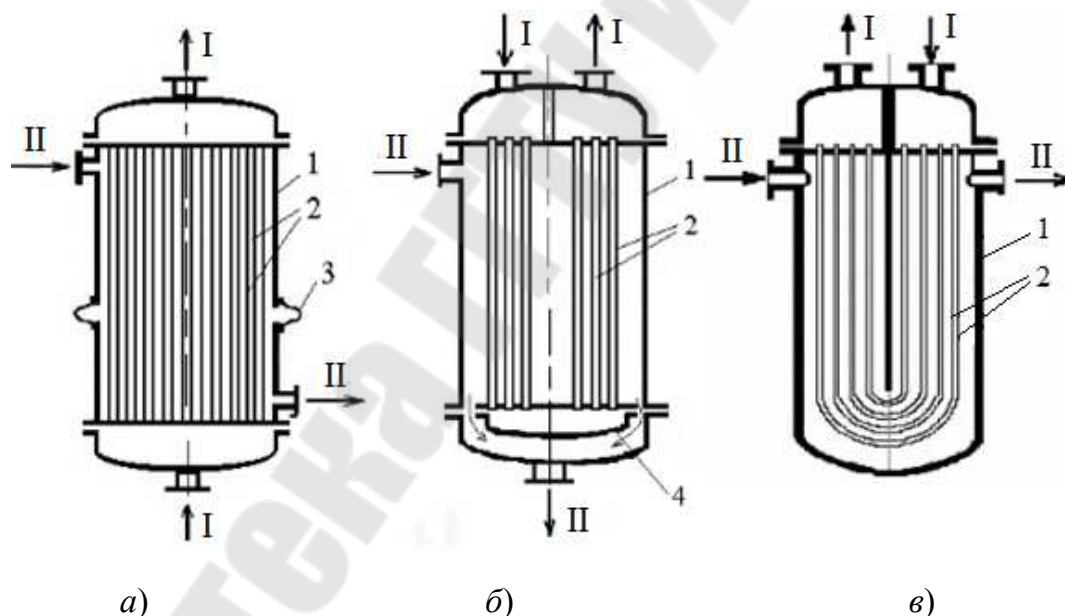


Рис. 1.10. Кожухотрубчатые теплообменники с устройствами для компенсации температурных деформаций:

*а* – теплообменник с линзовым компенсатором; *б* – теплообменник с U-образными трубами; *в* – теплообменник с плавающей головкой;  
*I* – кожух; *2* – трубы; *3* – линзовый компенсатор; *4* – плавающая головка;  
*I, II* – теплоносители

В теплообменнике с *U-образными трубами* нет нижней решетки, трубы могут удлиняться или сокращаться независимо от кожуха.

Такие аппараты не имеют ограничений по температурным деформациям и давлению в межтрубном пространстве, как аппараты с линзовым компенсатором. Однако в таких аппаратах усложняется монтаж труб, затруднена очистка их внутренней поверхности.

В теплообменнике с *плавающей головкой* нижняя трубная решетка не связана с кожухом и снабжена отдельной крышкой. Обладает теми же достоинствами, что и аппарат с U-образными трубами, к тому же, он лишен недостатков, связанных с проблемой монтажа труб и механической очистки их внутренних поверхностей. Однако стоимость таких аппаратов несколько выше, чем теплообменников с другими способами компенсаций температурных деформаций [8, 9].

*Достоинства кожухотрубчатых теплообменников:*

- 1) большая площадь поверхности теплопередачи при относительно компактных размерах кожухотрубчатого теплообменника;
- 2) простота изготовления;
- 3) расход материала на изготовление сравнительно невелик;
- 4) надежны в работе;
- 5) способны работать под большими давлениями.

*Недостатки кожухотрубчатых теплообменников:*

- 1) не способны эффективно работать при низких расходах теплоносителей;
- 2) трудности изготовления из материала, не допускающего развальцовки и сварки;
- 3) трудности при осмотре, чистке и ремонте.

**Обозначение кожухотрубчатых теплообменников.** Вид аппарата обозначают первой буквой: И – испарители, К – конденсаторы, Х – холодильники, Т – теплообменники.

Конструктивное исполнение аппарата, обеспечивающее компенсацию температурных деформаций его элементов, указано второй буквой условного обозначения.

**Примеры буквенных обозначений теплообменников**

ТН – теплообменник с неподвижными трубными решетками; ХК – холодильник с температурным компенсатором на кожухе; ТП – теплообменник с плавающей головкой; ИУ – испаритель с U-образными трубками.

Третья буква в условном обозначении показывает исполнение: Г – горизонтальное; В – вертикальное.

## Примеры условных обозначений теплообменных аппаратов

Теплообменник с неподвижными трубными решетками горизонтальный:

325ТНГ–I–1,6–Б9

20Г6–4

Обозначения в числителе: 325 – диаметр кожуха, мм (диапазон от 159 до 1200 мм); ТНГ – теплообменник с неподвижными трубными решетками, горизонтальный; I – исполнение с неразъемными распределительными камерами (исполнение II – с распределительными камерами, имеющими съемные крышки); 1,6 – условное давление, МПа (ряд: 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0); Б9 – материал кожуха и трубок по ГОСТ 15122-79.

Обозначения в знаменателе: 20 – наружный диаметр теплообменных труб, мм (ряд: 16; 20; 25; 38; 57); Г – гладкие трубки (Н – трубы с накаткой); 6 – длина труб, м (ряд: 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 9); 4 – число ходов по трубному пространству (ряд: 1, 2, 4, 6).

Теплообменник с плавающей головкой:

600 ТП-1,6-М1/20-6-2-У-И по ТУ 3612-023-00220302-01.

Здесь 600 – диаметр кожуха, мм; ТП – теплообменник с плавающей головкой, 1,6 – давление в кожухе, МПа; М1 – материал исполнения; 20 – диаметр теплообменных труб, мм; 6 – длина труб, м; 2 – двухходовой; У – климатическое исполнение; И – с деталями для крепления изоляции.

## 1.2. Пластинчатые теплообменники

В пластинчатых теплообменниках поверхность теплообмена образована набором тонких штампованных гофрированных пластин. Эти аппараты могут быть *разборными, полуразборными и неразборными* (сварными) [2].

**Устройство и принцип работы.** Пластинчатые теплообменники относятся к подклассу теплообменников с плоской поверхностью теплопередачи (рис. 1.11).

Конструкция пластин определяет технические показатели теплообменного аппарата. От формы, размеров и конструктивных особенностей пластин зависят интенсивность теплоотдачи, надежность аппарата, технологичность и трудоемкость его изготовления, эксплуатационные данные.

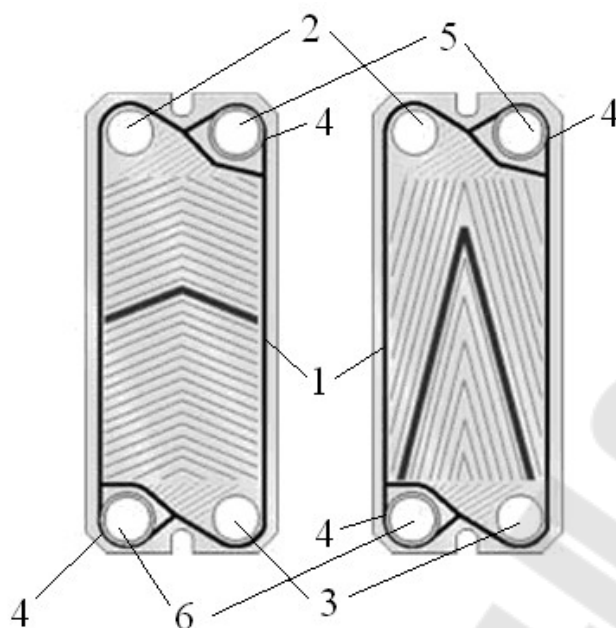


Рис. 1.11. Гофрированные пластины пластинчатых теплообменников:  
 1 – прокладка, ограничивающая пространство первого теплоносителя;  
 2, 3 – отверстия для входа и выхода первого теплоносителя; 4 – прокладка,  
 ограничивающая пространство второго теплоносителя;  
 5, 6 – отверстия для прохода второго теплоносителя

В настоящее время среди существующих можно выделить несколько основных видов пластин:

#### 1. Плоские и канальчатые пластины.

Попарное соединение простых плоских пластин позволяет создать две системы каналов, изолированных одна от другой теплопередающей стенкой. Канальчатые пластины характеризуются зигзагообразными или спиральными каналами на поверхности. Они применяются обычно в сочетании с гладкими пластинами.

#### 2. Пластины ленточно-поточного типа.

Конструкции таких пластин отличаются разнообразием в формах и размерах деталей, но для всех них характерно наличие периодически повторяющихся гофр (треугольных, синусоидальных или др.), ориентированных параллельно меньшей стороне пластины. Поток жидкости в каналах подобен плоской волнистой ленте. Геометрические характеристики потока могут быть различны, но во всех случаях поверхность омывается поперек гофр.

#### 3. Пластины сетчато-поточного типа.

В этих пластинах турбулизирующие элементы профиля одновременно создают сетку взаимных опор между пластинами, что по-

звolyет значительно повысить жесткость пакета и обеспечить его работоспособность при более высоких давлениях [2].

Пластины развернуты одна относительно другой на  $180^\circ$ , собраны в пакет и закреплены в раме. При этом образуется система узких волнистых каналов шириной 3–6 мм, по которым и протекают теплоносители. Такая установка пластин обеспечивает чередование горячих и холодных каналов. В процессе теплообмена жидкости движутся навстречу друг другу (в противотоке). Двойное резиновое уплотнение практически исключает смешение и потерю теплоносителей [5].

Разборный пластинчатый теплообменник (рис. 1.12) представляет собой пакет гофрированных пластин, зажатый в специальном станке, подобном тому, что используется для рамного фильтр-пресса. Сжатие пакета пластин в станке, состоящем из подвижной плиты 8 и неподвижной плиты, направляющих стержней 7 и 13, стойки 9 и стяжного винтового устройства 10, обеспечивает плотное прилегание прокладок между пластинами 6. Теплоноситель I поступает через штуцер 12 и движется по проходу 15, образованному отверстиями в пластинах. Продвигаясь по проходу, теплоноситель I распределяется по нечетным каналам (считая слева направо), образованным гофрированными пластинами 6.

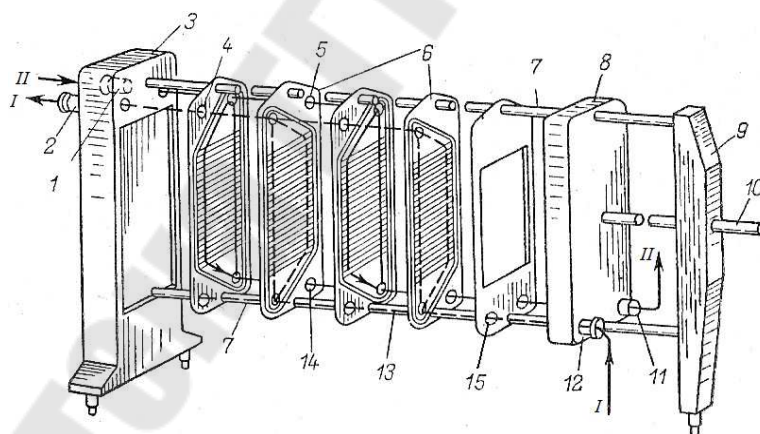


Рис. 1.12. Разборный пластинчатый теплообменник:

- 1 – штуцер ввода теплоносителя II; 2 – штуцер вывода теплоносителя I;
- 3 – неподвижная плита; 4 – проход для движения отработанного теплоносителя I;
- 5 – проход для движения свежего теплоносителя II; 6 – гофрированные пластины;
- 7 – верхний направляющий стержень; 8 – подвижная плита;
- 9 – неподвижная стойка; 10 – стяжное винтовое устройство; 11 – проход для движения отработанного теплоносителя II;
- 12 – штуцер ввода теплоносителя I; 13 – нижний направляющий стержень; 14 – проход для движения отработанного теплоносителя II;
- 15 – проход для движения свежего теплоносителя I

Отработанный теплоноситель I собирается в проход 4 и по нему направляется к выходному штуцеру 2. Теплоноситель II, поступая через штуцер 1 и двигаясь по проходу 5, распределяется по четным каналам. Отработанный теплоноситель II собирается в проход 14 и по нему направляется к выходному штуцеру 11 [5].

Разборные пластинчатые теплообменники достаточно просты в изготовлении, их легко разбирать для чистки и ремонта. Однако герметизация пластин представляет серьезную проблему, поэтому они не могут работать при высоких давлениях. Эта проблема практически исчезает в сварных или паяных пластинчатых теплообменниках, однако последние являются неразборными, они подлежат замене при загрязнении пластин, что удорожает процесс теплообмена. Применяют также полуразборные пластинчатые теплообменники, где пластины сварены попарно.

Одно из существенных преимуществ пластинчатых теплообменников заключается в возможности различных схем пакетной компоновки пластин. Пакетом в данном случае названа группа пластин, образующих систему параллельных каналов, в которых данный теплоноситель движется только в одном направлении (сверху вниз или наоборот). Пакет по существу аналогичен одному ходу по трубам в многоходовых кожухотрубчатых теплообменниках. При заданном расходе теплоносителя увеличение числа пакетов приводит к увеличению скорости теплоносителя, что интенсифицирует теплоотдачу, но увеличивает гидравлическое сопротивление [5, 7].

*Достоинства пластинчатых теплообменников:*

1) компактны (в 4–8 раз меньше по габаритным размерам равных по площади поверхности теплопередачи кожухотрубчатых теплообменников);

2) обеспечивают высокий коэффициент теплопередачи 3000–4000 Вт/(м<sup>2</sup> · К) (что более чем в 3 раза выше, чем в кожухотрубчатых), благодаря высокой скорости теплоносителей в каналах (1–3 м/с), при сравнительно невысоких для таких скоростей гидравлических сопротивлениях;

3) малая металлоемкость – при аналогичных параметрах масса пластинчатых теплообменников составляет 1/6 от массы трубчатых;

4) разборные пластинчатые теплообменники удобны для обслуживания, чистки и ремонта;

5) имеется возможность различных схем компоновки пластин, что позволяет подобрать оптимальный режим работы при заданных расходах теплоносителей;

6) другой принцип подбора и расчета теплообменного аппарата – вариация типа пластин и их количества – позволяет с большей точностью выдержать заданные параметры;

7) широкие возможности в подборе поверхности нагрева – при необходимости площадь поверхности теплообмена в пластинчатом теплообменнике может быть легко уменьшена или увеличена простым добавлением или уменьшением количества пластин;

8) низкая загрязняемость – вследствие высокого качества изготовления пластин (электрополировка) и высокой турбулентности потоков фактор загрязнения значительно ниже;

9) простота монтажа и обслуживания – не требуется привлечение специально обученного высококвалифицированного персонала; затрачивается меньше времени и снижается стоимость монтажно-наладочных, изоляционных и ремонтных работ; не требуется демонтаж подводящих трубопроводов;

10) устойчивость к вибрациям – пластинчатые теплообменники высокоустойчивы к наведенной двухплоскостной вибрации, которая может вызвать повреждение трубчатого аппарата;

11) сохранение в неизменном виде всех своих параметров в течение всего срока службы (25–30 лет), в отличие от кожухотрубного теплообменника;

12) устраняется вероятность перетекания одного теплоносителя в другой, что наблюдается в кожухотрубных водонагревателях при нарушении плотности вальцовки трубок и их механических повреждениях.

#### *Недостатки пластинчатых теплообменников:*

1) невозможность работы при высоких давлениях из-за недостаточной герметичности прокладок у разборных пластинчатых теплообменников и опасности деформации пластин у сварных (разборные теплообменники работают при давлениях до 1 МПа, сварные – до 4 МПа);

2) проблема обслуживания сварных пластинчатых теплообменников – чистка и ремонт затруднены [5, 9].

Основным элементом полуразборных пластинчатых теплообменников являются секции попарно сваренных (сдвоенных) гофрированных штампованных пластин из нержавеющей стали. Каждая такая секция имеет две пластины – правую и левую, соединенные между собой контактно-шовной электросваркой и образующие неразборную полость. По контуру каждой пластины выштампован U-образный паз. Правая пластина по форме является зеркальным отражением левой.

При сборке под сварку двух пластин вершины U-образных пазов прилегают друг к другу. Каждая секция устанавливается между двумя направляющими штангами – верхней и нижней. Штанги выполнены из труб или прутка и привернуты к неподвижной плите и стойке. Секции могут перемещаться вдоль штанг. При помощи нажимной плиты и стяжных болтов секции сжаты в пакет. *Пакет* – это группа пластин, образующих систему каналов, в которых теплоноситель движется только в одном направлении. Разборная полость теплообменника образуется между секциями после их сборки в пакет. Каналы, смежные с каналами, образованными внутри секций, выполняются разборными для возможности очистки от загрязнений. Разборные каналы уплотняют прокладками из пищевой термостойкой резины. Так как теплообменник имеет прокладки лишь по разборной полости, то опасность смещения теплоносителей имеется только по двум кольцевым промежуточным прокладкам, где происходит разделение теплоносителей между разборной и неразборной полостями.

Поверхность пластин гофрирована. Гофры имеют в поперечном сечении профиль равнобедренного треугольника. По углам пластины имеются отверстия для прохода теплоносителей, участвующих в теплообмене. Секции в пакет собирают таким образом, чтобы вершины гофр на сопрягаемых поверхностях были обращены в противоположные стороны.

При попарной сварке пластин заваривают кромки только по периметру двух угловых отверстий, кромки пластин с остальными двумя отверстиями образуют вход в неразборный канал внутри секции и выход из него. На стороне разборных каналов отверстия в пластинах уплотняются резиновыми прокладками.

Теплообменники работают при расчетном давлении до 1 МПа по разборной полости и до 1,6 МПа по неразборной.

Для надежной работы пластинчатого теплообменника на всех линиях поступления воды в нем необходимо устанавливать сетчатые фильтры или грязевики с сеткой.

Из рассматриваемых трех теплообменников наиболее целесообразно применение теплообменников РС 0,5Пр, поскольку эти теплообменники надежно работают при рабочем давлении до 1,6 МПа ( $16 \text{ кгс/см}^2$ ). Пластины попарно сварены по контуру, образуя блок. Между двумя сваренными пластинами имеется закрытый (сварной) канал для теплофикационной греющей воды. Разборные каналы допускают давление в них до 1 МПа.

Теплообменники типа Р 0,3р могут применяться в системах теплоснабжения при отсутствии теплообменников типа РС 0,5Пр и пара-

метрах теплоносителей до 1,0 МПа (до 10 кгс/см<sup>2</sup>), до 150 °С и перепаде давлений между теплоносителями не более 0,5 МПа (5 кгс/см<sup>2</sup>).

Применение теплообменников типа Р 0,6р (титан) в системах теплоснабжения ограничено и допустимо только при отсутствии теплообменников РС 0,5Пр и Р 0,3р при параметрах теплоносителей не более 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>) до 150 °С и перепаде давлений теплоносителей не более 0,3 МПа (3 кгс/см<sup>2</sup>).

**Структура и схемы пластинчатых теплообменников.** В промышленных аппаратах число пластин в некоторых конструкциях может достигать нескольких сот, а образуемые ими каналы могут быть соединены по различным одноходовым и многоходовым схемам. Сами аппараты по конструкции могут быть односекционными и многосекционными или комбинированными [2].

Односекционным пластинчатым теплообменником называется аппарат, в котором в теплообмене участвуют только две рабочие среды. Можно отметить, что такой аппарат выполняет только одно задание по теплообмену.

В пищевой промышленности широкое применение находят и такие конструкции пластинчатых аппаратов, в которых происходит несколько видов тепловой обработки жидкого пищевого продукта – основной рабочей среды. Это достигается путем соединения в одном аппарате нескольких взаимосвязанных, но самостоятельных теплообменных зон, в которых, например, нагревают продукт паром с целью стерилизации или пастеризации, затем постепенно охлаждают его холодным продуктом, идущим на подогрев, потом холодной водой и, наконец, хладоносителем до конечной температуры. Такую конструкцию имеют известные пастеризационно-охладительные аппараты, которые принято называть комбинированными.

Рассмотрим схему односекционного пластинчатого теплообменника и определим связанные с ней понятия (рис. 1.13).

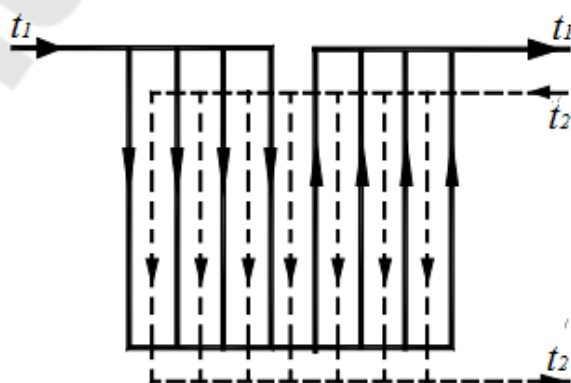


Рис. 1.13. Схема односекционного пластинчатого теплообменника

Элементом тракта движения жидкости в пластинчатом аппарате является *канал* – пространство между двумя соседними пластинами.

Рабочая среда, входящая в аппарат, попадает в каналы через продольные коллекторы, образованные угловыми отверстиями пластин и малыми прокладками, окружающими эти отверстия.

Из коллектора рабочая среда распределяется обычно по нескольким параллельным каналам. Совокупность нескольких каналов, по которым рабочая среда течет в одном направлении, в практике проектирования называют пакетом.

Понятие «пакет» в пластинчатом теплообменнике соответствует понятию «хода» в кожухотрубчатом.

По выходе из первого пакета рабочая среда попадает в противоположный коллекторный канал, проходит по нему вдоль аппарата до очередной граничной пластины (пластины с заглушенным угловым отверстием) и распределяется по каналам второго пакета. Во втором пакете рабочая среда движется в направлении, противоположном ее движению в первом пакете. Второй пакет может быть по числу каналов равен первому или не равен ему, как показано на рис. 1.13.

При различном числе каналов в расположенных последовательно пакетах скорость движения рабочей среды в каждом пакете будет изменяться.

При одинаковом числе каналов в пакетах скорость рабочей среды практически не изменяется.

Вторая рабочая среда, движение которой на схемах показано штриховой линией, проходит по своему коллекторному каналу и движется затем в межпластинных каналах, смежных с каналами для первой рабочей среды.

В компоновках каналов для рабочих сред возможны различные варианты:

1. Схему компоновки, при которой число каналов в пакетах для первой и второй рабочих сред одинаково, называют симметричной.

При симметричной схеме компоновки одна рабочая среда проходит последовательно такое же число пакетов, как и другая.

2. Схему компоновки, при которой число каналов в пакетах для первой и второй рабочих сред неодинаково, называют несимметричной.

Для поддержания приблизительного равенства скоростей рабочих сред в каналах при несимметричной схеме компоновки необходимо, чтобы отношение расходов было обратнопропорционально отношению чисел каналов.

3. Число пакетов на стороне второй рабочей среды неодинаково с числом пакетов на стороне первой рабочей среды (рис. 1.13).

При компоновке пластин в пластинчатом теплообменнике особое значение имеет компоновка пакетов со стороны основной (обрабатываемой) рабочей среды, так как обычно расход этой среды через аппарат (производительность аппарата) строго задан и от числа параллельных каналов в пакете зависит скорость продукта, а следовательно, и другие параметры процесса работы теплообменника.

Относительное направление движения обеих рабочих сред через пластинчатый теплообменник может быть различным в зависимости от сочетания общих и частных направлений движения рабочих сред через аппарат в целом и через межпластинные каналы. Различают следующие общие случаи [2]:

- а) частный противоток при общем противотоке, т. е. противоток и в каналах пакетов и в целом аппарате (чистый противоток) (рис. 1.14, а);
- б) смешанный ток (рис. 1.14, б);
- в) смешанный частный ток при общем противотоке (рис. 1.14, в);
- г) частный прямоток при общем противотоке (рис. 1.14, г);
- д) смешанный частный ток при общем прямотоке (рис. 1.14, д);
- е) частный прямоток при общем прямотоке (чистый прямоток) (рис. 1.14, е).

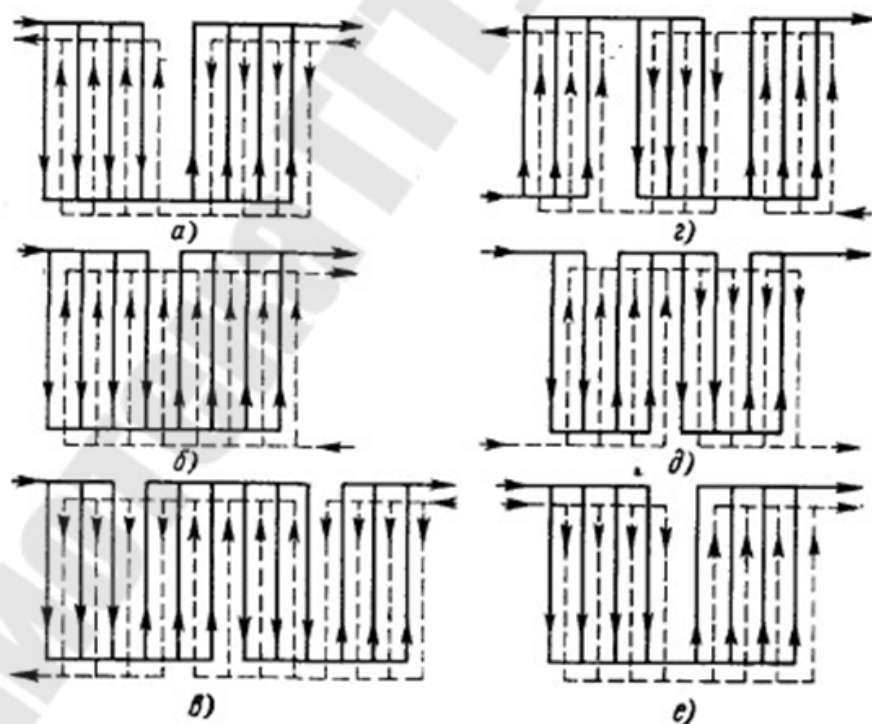


Рис. 1.14. Схемы относительного движения рабочих сред в пластинчатом теплообменнике

При чистом противотоке в условиях многопакетной компоновки пластины, находящиеся на границах пакетов внутри аппарата, работают на прямотоке, а при чистом прямотоке соответственно на противотоке, однако практическое влияние этих пластин на процесс теплопередачи в промышленных аппаратах при многопакетной компоновке пренебрежимо мало.

В практике проектирования пластинчатых теплообменников схеме компоновки пластин удобно условно обозначать дробью. В числителе дроби – сумма цифр, которые показывают количество соединенных пакетов по тракту горячей (охлаждаемой) рабочей среды, а значение каждой из цифр – количество параллельных межпластинных каналов в соответствующем по расположению на схеме (или по ходу движения рабочей среды) пакете. В знаменателе дроби – сумма цифр, обозначающих число пакетов и каналов в них по тракту движения холодной (нагреваемой) рабочей среды.

Обозначения такого вида называются формулами компоновки пластин.

Для схемы, приведенной на рис. 1.13, формула компоновки пластин будет выглядеть так:

$$C = 4 + 4/8.$$

Приведенные компоновки соответствуют односекционным теплообменникам, в которых протекают только две рабочие среды.

Если соединить на одной раме несколько односекционных пластинчатых теплообменников, то получим многосекционный (комбинированный) аппарат. Зоны комбинированного аппарата называют секциями. Характерным признаком такого аппарата является то, что каждая секция имеет штуцера, через которые подводится и отводится рабочая среда. Каждая секция, являясь простым пластинчатым теплообменником, подчиняется соответствующим для него закономерностям компоновки и работы.

Таким образом, структура многосекционного пластинчатого аппарата может быть представлена в следующем виде: *аппарат* → *секция* → *пакет* → *канал*.

**Обозначение пластинчатых теплообменников.** Структуру обозначения разберем на примере трехходового теплообменника с площадью поверхности всех установленных пластин  $18,4 \text{ м}^2$ , состоящего из трех пакетов секций (в первом пакете – 16 секций, во втором и третьем – по 15 секций):

РС-0,2-18,4-3х(16 × 15 × 15) ТУ РБ 14520298.012-99,  
где РС – полуразборный теплообменник (разборный по отдельным секциям);

0,2 – поверхность теплообмена одной из двух пластин, составляющих секцию, м<sup>2</sup>;

18,4 – суммарная площадь поверхности всех пластин, входящих в теплообменник, равная произведению поверхности одной пластины (0,2 м<sup>2</sup>) на число пластин;

3х – число ходов теплоносителей в теплообменнике (для теплообменников, предназначенных для присоединения систем горячего водоснабжения по двухступенчатой смешанной схеме (с 6 патрубками), после указания числа ходов добавляется обозначение «БГВ» (блок горячего водоснабжения), например:

РС-0,2-18,43 × БГВ(13 × 12 × 21));

(16 × 15 × 15) – схема компоновки секций в пакетах каждого хода, начиная с неподвижной плиты (16 секций в пакете первого хода и по 15 секций в пакетах секций второго и третьего ходов) [7].

## Глава 2. РАСЧЕТ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Данный расчет проводится для определения площади поверхности теплообмена стандартного водо-водяного рекуперативного теплообменника, в котором греющая вода поступает в трубы, а нагреваемая вода – в межтрубное пространство [7, 9].

**Задание.** Выполнить тепловой конструктивный расчет водо-водяного рекуперативного подогревателя производительностью  $Q$ , Вт. Температура греющего теплоносителя на входе в аппарат  $t'_1$ , °С. Температура нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменник  $t'_2$ , °С, изменение температуры нагреваемого теплоносителя в аппарате  $\Delta t_2$ , °С. Массовый расход греющего теплоносителя –  $M_1$ , кг/с, нагреваемого теплоносителя –  $M_2$ , кг/с. Поверхность нагрева выполнена из труб диаметром  $d_n / d_b$ . Трубы в трубной решетке расположены по вершинам равносторонних треугольников. Схема движения теплоносителей – противоток.

Материал труб теплообменного аппарата выбирается в соответствии с вариантом. Потерями тепла в окружающую среду пренебречь.

Исходные данные приведены в Приложении 3.

### 2.1. Тепловой конструктивный расчет

#### 2.1.1. Расчет количества передаваемого тепла

Уравнение теплового баланса для теплообменного аппарата имеет вид:

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q, \quad (2.1)$$

где  $Q_1$  – количество теплоты в единицу времени, отданное греющим теплоносителем, Вт;  $Q_2$  – количество теплоты в единицу времени, воспринятое нагреваемым теплоносителем, Вт;  $\Delta Q$  – потери теплоты в окружающую среду, Вт.

Так как  $\Delta Q = 0$  по условию, то количество передаваемого тепла в единицу времени через поверхность нагрева аппарата, Вт:

$$Q = Q_1 = Q_2.$$

$$Q = M_1 \cdot c_{p1}(t_1' - t_1'') = M_2 \cdot c_{p2}(t_2'' - t_2'), \quad (2.2)$$

где  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – средние удельные массовые теплоемкости греющего и нагреваемого теплоносителей, в интервале изменения температур от  $t_1'$  до  $t_1''$  и от  $t_2'$  до  $t_2''$  соответственно, кДж/(кг · К);  $M_1$  ( $M_2$  – массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей соответственно, кг/с.

Основное уравнение теплопередачи:

$$Q = kF\Delta t_{cp}, \quad (2.3)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  – среднелогарифмический температурный напор, °С.

Температура нагреваемого теплоносителя на выходе из теплообменника, °С:

$$t_2'' = t_2' + \Delta t_2. \quad (2.4)$$

Средняя температура нагреваемого теплоносителя, °С:

$$t_2 = \frac{t_2' + t_2''}{2}. \quad (2.5)$$

По температуре  $t_2$  определяем значение  $c_{p2}$  методом линейной интерполяции по табл. П.4.1

Количество теплоты в единицу времени, воспринятое нагреваемым теплоносителем, Вт:

$$Q_2 = M_2 \cdot c_{p2}(t_2'' - t_2'). \quad (2.6)$$

Методом линейной интерполяции с помощью табл. П.4.1 определяется средняя удельная массовая теплоемкость  $c_{p1}$  греющего теплоносителя при температуре  $t_1'$ .

Для условия  $Q_1 = Q_2$  определяется температура греющего теплоносителя на выходе из теплообменника, °С:

$$t_1'' = t_1' - \frac{Q_2}{M_1 \cdot c_{p1}}. \quad (2.7)$$

Средняя температура греющего теплоносителя, °С:

$$t_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}. \quad (2.8)$$

По температуре  $t_1$  определяется значения  $c_{p1}$ . Уточняется количество теплоты, отданное греющим теплоносителем в единицу времени, Вт:

$$Q_1 = M_1 \cdot c_{p1} (t_1' - t_1''). \quad (2.9)$$

Рассчитывается величина относительной погрешности  $\Delta$ , которая не должна превышать 3 %. Если данное условие не выполняется, требуется провести перерасчет:

$$\Delta = \frac{|Q_1 - Q_2|}{Q_1} 100, \%. \quad (2.10)$$

### 2.1.2. Определение интенсивности процессов теплообмена

В основу расчета коэффициентов теплоотдачи между теплоносителями и поверхностью стенки положены критериальные уравнения, полученные в результате обработки многочисленных экспериментальных данных и их обобщения на основе теории подобия.

**Расчет интенсивности теплоотдачи со стороны греющего теплоносителя.** По среднеарифметическому значению температуры  $t_1$  определяются значения физических свойств греющего теплоносителя (табл. П.4.1):  $\rho_1$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_1$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);  $Pr_{ж1}$  – число Прандтля.

В первом приближении температура стенки, °С:

$$t_{ст} = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (2.11)$$

По  $t_{ст}$  определяется  $Pr_{ст}$  (табл. П.4.1).

Число Рейнольдса для потока греющего теплоносителя:

$$Re_{ж,d1} = \frac{w_1 d_B}{\nu_1}, \quad (2.12)$$

где  $w_1$  – средняя скорость греющего теплоносителя, м/с.

Среднюю скорость движения теплоносителя в трубах рекомендуется предварительно принимать в пределах  $w_1 = (1-3)$  м/с.

В результате сравнения вычисленного значения  $Re_{ж,d1}$  с критическим числом  $Re_{кр} = 2300$  устанавливается режим течения и выбирается критериальное уравнение для расчета числа Нуссельта. Интенсивность теплоотдачи в круглых трубах зависит от режима движения теплоносителя.

При турбулентном режиме течения жидкости ( $Re_{ж,d} > 2300$ ) в круглых трубах и каналах число Нуссельта определяется по критериальной зависимости:

$$Nu_{ж,d1} = 0,023 Re_{ж,d1}^{0,8} \cdot Pr_{ж1}^{0,4} \left( \frac{Pr_{ж1}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (2.13)$$

При ламинарном режиме ( $Re_{ж,d} \leq 2300$ ) возможны два случая:

1. При  $Gr \cdot Pr_{ж} \leq 5 \cdot 10^5$ , когда влияние свободной конвекции можно не учитывать, коэффициент теплоотдачи для теплоносителя, движущегося в трубах круглого сечения, определяют с помощью уравнений:

– при  $Re_{ж,d} \cdot Pr_{ж} (d_B / L) > 12$

$$Nu_{ж,d1} = 1,61 [Re_{ж,d1} \cdot Pr_{ж1} (d_B / L)]^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}; \quad (2.14)$$

– при  $Re_{ж,d} \cdot Pr_{ж} (d_B / L) \leq 12$

$$Nu_{ж,d1} = 3,66 \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}, \quad (2.15)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости теплоносителя при температуре  $t_1$ , Па·с;  $\mu_{ст}$  – коэффициент динамической вязкости теплоносителя при температуре стенки, Па·с.

2. При  $Gr \cdot Pr_{ж} > 5 \cdot 10^5$  наступает вязкостно-гравитационный режим. В этом случае число Нуссельта определяется по формуле

$$Nu_{ж,d1} = 0,15(Re_{ж,d1} \cdot Pr_{ж1})^{0,33} (Gr \cdot Pr_{ж1})^{0,14} \left( \frac{Pr_{ж1}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2.16)$$

где число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g\beta_1(t_1 - t_{ст})d_B^3}{\nu_1^2}, \quad (2.17)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta_1$  – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, К<sup>-1</sup>:

$$\beta_1 = \frac{1}{273,15 + t_1}. \quad (2.18)$$

Определяющий размер – внутренний диаметр трубы, определяющая температура – средняя температура теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке трубы, Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{ж,d1} \lambda_1}{d_B}. \quad (2.19)$$

**Расчет интенсивности теплоотдачи со стороны нагреваемого теплоносителя.** По среднеарифметическому значению температуры  $t_2$  определяются значения физических свойств нагреваемого теплоносителя (табл. П.4.1):  $\rho_2$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_2$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С);  $Pr_{ж2}$  – число Прандтля.

Число Рейнольдса для потока холодного теплоносителя:

$$Re_{ж,d2} = \frac{w_2 d_H}{\nu_2}, \quad (2.20)$$

где  $w_2$  – средняя скорость нагреваемого теплоносителя, м/с.

Среднюю скорость движения теплоносителя в межтрубном пространстве рекомендуется предварительно принимать в пределах  $w_2 = (1-2)$  м/с.

В результате сравнения вычисленного значения  $Re_{ж,d2}$  с критическим числом  $Re_{кр} = 1000$  выбирается критериальное уравнение, по которому подсчитывается число Нуссельта.

При движении теплоносителя в межтрубном пространстве коэффициент теплоотдачи рассчитывают по уравнениям:

– при  $Re_{ж,d} \geq 1000$

$$Nu_{ж,d2} = 0,24 Re_{ж,d2}^{0,6} \cdot Pr_{ж,d2}^{0,36} \left( \frac{Pr_{ж2}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}; \quad (2.21)$$

– при  $Re_{ж,d} < 1000$

$$Nu_{ж,d2} = 0,34 Re_{ж,d2}^{0,5} \cdot Pr_{ж2}^{0,36} \left( \frac{Pr_{ж2}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (2.22)$$

За определяющий геометрический размер принимают наружный диаметр теплообменных труб.

Коэффициент теплоотдачи от стенок трубного пучка к нагреваемому теплоносителю, Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{ж,d2} \lambda_2}{d_H}. \quad (2.23)$$

### 2.1.3. Определение коэффициента теплопередачи

Если  $d_H / d_B < 2$ , то коэффициент теплопередачи для плоской поверхности теплообмена с достаточной точностью определяется по формуле, Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + r_{31} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + r_{32} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.24)$$

где  $r_{31}$ ,  $r_{32}$  – термические сопротивления слоев загрязнений с обеих сторон стенки, (м<sup>2</sup> · К)/Вт (табл. П.4.3);  $\delta_{ст}$  – толщина стенки, м;  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала трубок (табл. П.4.4), Вт/(м · К).

Толщина стенки трубки вычисляется по формуле

$$\delta_{ст} = \frac{d_H - d_B}{2}. \quad (2.25)$$

Вычисленное значение коэффициента теплопередачи сравнивается с ориентировочными значениями  $k$ , представленными в табл. П.4.5, для соответствующих теплоносителей.

Если расчетная величина  $k$  не входит в установленные пределы, следует провести перерасчет, уточнив скорости движения теплоносителей.

#### 2.1.4. Определение расчетной площади поверхности теплообмена

В аппаратах с прямо- или противоточным движением теплоносителей средняя разность температур потоков определяется как среднелогарифмическая между большей и меньшей разностями температур теплоносителей на концах аппарата:

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \left( \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)}, \quad (2.26)$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – большая разность температур, °С;  $\Delta t_{\text{м}}$  – меньшая разность температур, °С.

График изменения температур теплоносителей при противотоке представлен на рис. 2.1.

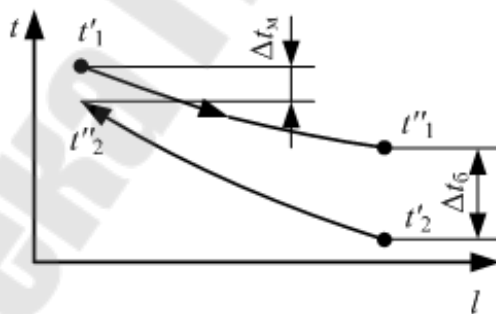


Рис. 2.1. Графическая зависимость для определения большей и меньшей разности температур теплоносителей

Типовые температурные схемы теплообменных процессов представлены в табл. П.4.2.

При сложном взаимном движении теплоносителей, например, при смешанном и перекрестном токе в многоходовых теплообменниках, средняя разность температур теплоносителей определяется с учетом поправки  $\varepsilon_{\Delta t} \leq 1$ :

$$\Delta t_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{ср.лог}} \varepsilon_{\Delta t}. \quad (2.27)$$

Для нахождения поправочного коэффициента  $\varepsilon_{\Delta t}$  вычисляются вспомогательные коэффициенты  $P$  и  $R$ :

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}; \quad (2.28)$$

$$R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'}. \quad (2.29)$$

Для стандартных схем движения теплоносителей в теплообменниках существуют графические зависимости  $\varepsilon_{\Delta t} = f(P, R)$ . График для определения поправки  $\varepsilon_{\Delta t}$  при перемешивании одного теплоносителя представлен на рис. П.4.1.

Также поправку можно рассчитать теоретически. В частности, для параллельно-смешанного тока теплоносителей с одним ходом в межтрубном пространстве и двумя ходами по трубам (например, в двухходовом кожухотрубчатом теплообменнике)  $\varepsilon_{\Delta t}$  рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\Delta t} = \frac{\frac{\eta}{\delta}}{\ln \left( \frac{2 - P(1 + R - \eta)}{2 - P(1 + R + \eta)} \right)}, \quad (2.30)$$

$$\text{где } \eta = \sqrt{R^2 + 1}; \quad \delta = \frac{R - 1}{\ln((1 - P)/(1 - RP))} \Big|_{R \neq 1} = \frac{1 - P}{P} \Big|_{R \rightarrow 1}.$$

Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = k \Delta t_{\text{ср}}. \quad (2.31)$$

Из основного уравнения теплопередачи определяется необходимая поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{\text{ср}}}. \quad (2.32)$$

По рассчитанной площади и заданному диаметру труб выбирается стандартный теплообменный аппарат (табл. П.4.6), характеристики которого сводят в таблицу.

Пересчитываются скорости движения и число Рейнольдса для греющего и нагреваемого теплоносителей, м/с:

$$w_1 = \frac{M_1}{\rho_1 f_1}; \quad (2.33)$$

$$w_2 = \frac{M_2}{\rho_2 f_2}, \quad (2.34)$$

где  $f_1$  – площадь сечения одного хода по трубам,  $\text{м}^2$ ;  $f_2$  – площадь сечения межтрубного пространства между перегородками,  $\text{м}^2$ .

$$\text{Re}_{ж,d1} = \frac{w_1 d_{\text{в}}}{v_1}; \quad (2.35)$$

$$\text{Re}_{ж,d2} = \frac{w_2 d_{\text{н}}}{v_2}. \quad (2.36)$$

## 2.2. Компонентный расчет теплообменного аппарата

Определяется число труб в теплообменнике:

$$n = \frac{F_c}{\pi d_{\text{н}} L_c}, \quad (2.37)$$

где  $F_c$  – площадь поверхности теплообмена стандартного теплообменника,  $\text{м}^2$ ;  $L_c$  – длина труб одного хода стандартного теплообменного аппарата, м.

По условию трубы по сечению трубной решетки расположены по вершинам равносторонних треугольников. Количество трубок, расположенных по сторонам большего шестиугольника:

$$a = \frac{2\sqrt{(n-1)/3 + 0,25} - 1}{2}. \quad (2.38)$$

Количество трубок, расположенных по диагонали шестиугольника:

$$b = 2a - 1. \quad (2.39)$$

Число рядов труб, омываемых теплоносителем в межтрубном пространстве, приближенно можно принять равным  $0,5b$ , т. е.

$$m = \sqrt{(n-1)/3 + 0,25} \approx \sqrt{n/3}. \quad (2.40)$$

Для стандартных труб с наружным диаметром  $d_n$ , равным 16, 20, 25, 38, 57 мм, размещенных по вершинам равносторонних треугольников, при развальцовке принимают шаг между трубами  $S = (1,3 - 1,6)d_n$ , при сварке  $S = 1,25d_n$ . Рассчитанную величину шага между отверстиями в трубной решетке сравнивают со стандартными значениями, представленными в табл. П.4.7.

Внутренний диаметр кожуха одноходового теплообменника, мм:

$$D_B = 1,1S\sqrt{n}. \quad (2.41)$$

Внутренний диаметр кожуха многоходового теплообменника, мм:

$$D_B = 1,1S\sqrt{\frac{n}{\psi}}, \quad (2.42)$$

где  $\psi$  – коэффициент заполнения трубной решетки, принимается равным 0,6–0,8.

Вычисленные значения  $n$  и  $D_B$  сопоставляются со стандартными величинами, выписанными из табл. П.4.6.

### 2.3. Определение температуры поверхности стенок трубы

Термическое сопротивление теплоотдачи от греющего теплоносителя к поверхности загрязнений,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ :

$$R_{\alpha 1} = \frac{1}{\alpha_1}. \quad (2.43)$$

Термическое сопротивление слоя отложений со стороны греющего теплоносителя,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ :

$$R_{\lambda 31} = \frac{1}{(1/r)_{31}}, \quad (2.44)$$

где  $(1/r)_{31}$  – тепловая проводимость слоя отложений со стороны греющего теплоносителя,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; значение выбирается по табл. П.4.3.

Термическое сопротивление стенки трубы,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ :

$$R_{\lambda} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad (2.45)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки трубки, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м · К);  $\lambda_{\text{ст}}$  выбирается по  $t_{\text{ст}}$  из табл. П.4.4.

Термическое сопротивление слоя отложений со стороны нагреваемого теплоносителя, (м<sup>2</sup> · К)/Вт:

$$R_{\lambda 32} = \frac{1}{(1/r)_{32}}, \quad (2.46)$$

где  $(1/r)_{32}$  – тепловая проводимость слоя отложений со стороны нагреваемого теплоносителя, Вт/(м<sup>2</sup> · К); значение выбирается по табл. П.4.3.

Термическое сопротивление теплоотдачи от стенки загрязнений к нагреваемому теплоносителю, (м<sup>2</sup> · К)/Вт:

$$R_{\alpha 2} = \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.47)$$

Аналитически температура стенок трубы определяется по формулам:

$$t_{\text{ст1}} = t_1 - q(R_{\alpha 1} + R_{\lambda 31}); \quad (2.48)$$

$$t_{\text{ст2}} = t_2 - q(R_{\alpha 2} + R_{\lambda 32}). \quad (2.49)$$

Для проверки температуру стенки определяют графическим способом. График по определению искомых температур  $t_{\text{ст1}}$  и  $t_{\text{ст2}}$  приведен на рис. 2.2.

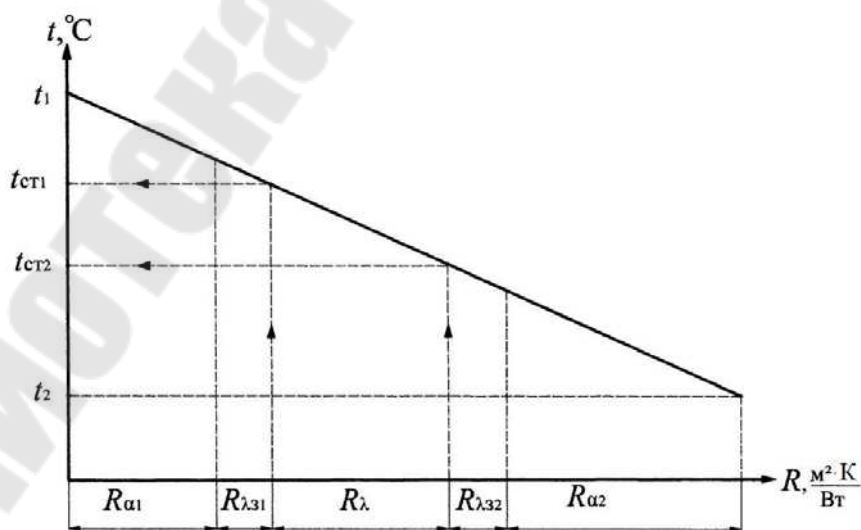


Рис. 2.2. Графический способ определения температуры поверхности стенки трубы со стороны греющего и нагреваемого теплоносителей

## 2.4. Гидравлический расчет теплообменника

Целью гидравлического расчета является определение величины потери давления теплоносителей при их движении через теплообменный аппарат.

Полное гидравлическое сопротивление при движении жидкости в трубах теплообменного аппарата определяется выражением, Па:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{тр1}} + \Delta P_{\text{м1}}, \quad (2.50)$$

где  $\Delta P_{\text{тр1}}$  – гидравлическое сопротивление трения, Па;  $\Delta P_{\text{м1}}$  – потери давления, обусловленные наличием местных сопротивлений; складываются из сопротивлений, возникающих в связи с изменением площади сечения потока, обтекания препятствий, Па:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{L_c}{d_b} \frac{w_1^2 \cdot \rho_1}{2} z, \quad (2.51)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения;  $z$  – число ходов теплоносителя по трубному пространству.

Коэффициент трения определяется по формуле:

$$\lambda = 0,25 \left( \lg \left[ \frac{e}{3,7} + \left( \frac{6,81}{\text{Re}_1} \right)^{0,9} \right] \right)^{-2}, \quad (2.52)$$

где  $e = \Delta / d_b$  – относительная шероховатость труб;  $\Delta$  – высота выступов шероховатостей (принимается  $\Delta = 0,2$  мм).

Потери давления, обусловленные наличием местных сопротивлений, Па:

$$\Delta P_{\text{м1}} = \xi_{\text{м1}} \frac{w_1^2 \rho_1}{2}, \quad (2.53)$$

где  $\xi_{\text{м1}}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений трубного пространства:

$$\xi_{\text{м1}} = \xi_{\text{вх.к}} + z(\xi_{\text{вх.тр}} + \xi_{\text{вых.тр}}) + \xi_{\text{пов}}(z-1) + \xi_{\text{вых.к}}, \quad (2.54)$$

где  $\xi_{\text{вх.к}}$ ,  $\xi_{\text{вых.к}}$  – коэффициенты сопротивлений входной и выходной камер (табл. П.4.8);  $\xi_{\text{вх.тр}}$ ,  $\xi_{\text{вых.тр}}$  – коэффициенты сопротивлений

входа в трубы и выхода из них (табл. П.4.8);  $\xi_{\text{пов}}$  – коэффициент сопротивления поворота между ходами.

Величина потерь давления греющего теплоносителя в теплообменном аппарате, Па:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{тр1}} + \Delta P_{\text{м1}}. \quad (2.55)$$

Величина потерь давления нагреваемого теплоносителя в межтрубном пространстве теплообменника, Па:

$$\Delta P_2 = \xi_{\text{м2}} \frac{w_2^2 \rho_2}{2}, \quad (2.56)$$

где  $\xi_{\text{м2}}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений межтрубного пространства:

$$\xi_{\text{м2}} = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{п.тр}}(x+1) + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{сегм}}x, \quad (2.57)$$

где  $\xi_{\text{вх}}$ ,  $\xi_{\text{вых}}$  – коэффициент сопротивления входа и выхода жидкости (табл. П.4.8);  $\xi_{\text{п.тр}}$  – коэффициент сопротивления пучка труб:

$$\xi_{\text{п.тр}} \approx \frac{3\sqrt{n/3}}{\text{Re}_2^{0,2}}, \quad (2.58)$$

где  $x$  – число сегментных перегородок (табл. П.4.10);  $\xi_{\text{сегм}}$  – коэффициент, определяющий поворот через сегментную перегородку (табл. П.4.8).

## 2.5. Определение толщины тепловой изоляции аппарата

Тепловая изоляция представляет собой конструкцию из материалов с малой теплопроводностью, покрывающую наружные поверхности оборудования, трубопроводов для уменьшения тепловых потерь. Толщину тепловой изоляции находят из равенства удельных тепловых потоков через слой изоляции и от поверхности изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_{\text{в}}(t''_{\text{ст}} - t_{\text{в}}) = \frac{\lambda_{\text{и}}}{\delta_{\text{и}}}(t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}}), \quad (2.59)$$

где  $t_{\text{ст}}''$  – температура изоляции со стороны окружающей среды, которая не должна превышать 45 °С согласно требованиям техники безопасности;  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup> · К), при расчетах принимать  $\alpha_{\text{в}} = (5-20)$  Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t_{\text{ст}}'$  – температура изоляции со стороны аппарата; ввиду незначительного термического сопротивления стенки аппарата по сравнению с термическим сопротивлением слоя изоляции,  $t_{\text{ст}}'$  принимают равной средней температуре нагреваемого теплоносителя, °С;  $t_{\text{в}}$  – температура окружающей среды; для изолируемых поверхностей, расположенных в помещении принимается 20 °С [7];  $\lambda_{\text{и}}$  – коэффициент теплопроводности изолятора, Вт/(м · К).

Если в качестве изолятора принять полотно стеклянное теплоизоляционное марки ИПС-Т-1000, ТУ 6-11-570-83, то коэффициент теплопроводности изолятора [7]:

$$\lambda_{\text{и}} = 0,047 + 0,00023t_{\text{Т}}, \quad (2.60)$$

где  $t_{\text{Т}}$  – средняя температура теплоизоляционного слоя, °С.

На открытом воздухе в летнее время, в помещении, в каналах, тоннелях, технических подпольях, на чердаках и в подвалах зданий:

$$t_{\text{Т}} = \frac{t_{\text{в}} + 40}{2}, \quad (2.61)$$

где  $t_{\text{в}}$  – средняя температура теплоносителя, омывающего стенку, °С.

На открытом воздухе в зимнее время:

$$t_{\text{Т}} = \frac{t_{\text{в}}}{2} \quad (2.62)$$

При расчетах задать температурный напор  $(t_{\text{ст}}'' - t_{\text{в}}) = (12-22)$  °С.

Толщина тепловой изоляции, м:

$$\delta_{\text{и}} = \frac{\lambda_{\text{и}}(t_{\text{ст}}' - t_{\text{ст}}'')}{\alpha_{\text{в}}(t_{\text{ст}}'' - t_{\text{в}})}. \quad (2.63)$$

## Глава 3. РАСЧЕТ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Рассчитать пластинчатый теплообменник для системы горячего водоснабжения ИТП, если известны параметры: нагрузка на отопление (ГВС) –  $Q$ , Вт; температуры греющей (сетевой) и нагреваемой воды на входе и выходе теплообменника соответственно  $t_1', t_1'', t_2', t_2''$ , °С. Принять равное число параллельных каналов в пакете для греющего и нагреваемого теплоносителей [2, 5, 7].

### 3.1. Тепловой расчет

#### 3.1.1. Определение расходов и скоростей греющего и нагреваемого теплоносителей

Средняя температура теплоносителей:

$$t_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}; \quad t_2 = \frac{t_2' + t_2''}{2}. \quad (3.1)$$

По среднеарифметическому значению температур  $t_1$  и  $t_2$  определяются значения теплофизических свойств греющего и нагреваемого теплоносителей (табл. П.4.1):  $c_{p1,2}$  – средние удельные массовые теплоемкости греющего и нагреваемого теплоносителей;  $\rho_{1,2}$  – плотность теплоносителей, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_{1,2}$  – кинематические коэффициенты вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_{1,2}$  – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м · К);  $Pr_{ж1,2}$  – числа Прандтля.

Массовые расходы теплоносителей, кг/с:

$$M_1 = \frac{Q}{c_{p1}(t_1' - t_1'')}; \quad M_2 = \frac{Q}{c_{p2}(t_2' - t_2'')}. \quad (3.2)$$

По максимальному расходу выбирается тип пластин (табл. П.5.1, П.5.2). Параметры пластин:  $\delta_{ст}$  – толщина стенки пластины, м;  $f_{пл}$  – площадь поверхности теплообмена пластины, м<sup>2</sup>;  $f_k$  – площадь поперечного сечения канала между пластинами, м<sup>2</sup>;  $P$  – смачиваемый периметр в поперечном сечении канала, м.

### 3.1.2. Расчет интенсивности теплообмена при движении теплоносителей между пластинами

Скорость движения греющего теплоносителя  $w_1$  обычно принимается в пределах от 0,1 до 3,0 м/с в зависимости от типа пластин и условий эксплуатации.

Скорость движения нагреваемой воды:

$$w_1 = \frac{M_2}{\rho_2 f_k (m-1)}, \quad (3.3)$$

где  $f_k$  – площадь поперечного сечения одного канала, м<sup>2</sup>;  $m$  – число каналов в пакете (количество секций в теплообменнике):

$$m = \frac{G_1}{w_1 \rho_1 f_k}. \quad (3.4)$$

Число Рейнольдса для каждого теплоносителя:

$$n'_n = 2m + 1; \quad Re_{ж,d2} = \frac{w_2 d_э}{\nu_2}, \quad (3.5)$$

где  $d_э$  – эквивалентный диаметр канала, определяемый по формуле

$$d_э = \frac{4f_k}{P}, \quad (3.6)$$

где  $P$  – смачиваемый периметр поперечного сечения одного канала, м.

Числа Рейнольдса, при которых может возникнуть переходный режим течения, существенно изменяются в зависимости от типа пластин. Как правило, во всех типах пластинчатых теплообменников ламинарный режим течения возникает при  $Re_{ж,d} < 10$ , а турбулентный – при  $Re_{ж,d}$ , превышающем 1000. Для небольших теплообменников переходный режим течения существует уже при числах Рейнольдса, равных 10–200 [7]. Для рассматриваемых пластинчатых теплообменников РС-0,2 рекомендуется принимать  $Re_{кр} = 50$ .

Критерий Нуссельта определяется в зависимости от характера движения теплоносителей:

– при турбулентном режиме ( $Re_{ж,d} \geq 50$ ):

$$Nu_{ж,d1,2} = 0,18 Re_{ж,d1,2}^{0,73} \cdot Pr_{ж1,2}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж1,2}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (3.7)$$

где  $Pr_{ст}$  – число Прандтля при средней температуре стенки  $t_{ст}$ , определяемой по формуле

$$t_{ст} = \frac{t_1 + t_2}{2}; \quad (3.8)$$

– при ламинарном режиме ( $Re_{ж,d} < 50$ ):

$$Nu_{ж,d1,2} = 0,18 Re_{ж,d1,2}^{0,33} \cdot Pr_{ж1,2}^{0,33} \left( \frac{Pr_{ж1,2}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (3.9)$$

Коэффициенты теплоотдачи от греющего теплоносителя к поверхности стенки и от поверхности стенки к нагреваемому теплоносителю соответственно, Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$\alpha_{1,2} = \frac{Nu_{ж,d1,2} \lambda_{1,2}}{d_э}. \quad (3.10)$$

### 3.1.3. Определение площади поверхности теплообмена

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + r_{31} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + r_{32} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.11)$$

где  $r_{31}$ ,  $r_{32}$  – термические сопротивления слоев загрязнений с обеих сторон стенки, (м<sup>2</sup> · К)/Вт (табл. П.4.3);  $\delta_{ст}$  – толщина стенки, м;  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала трубок, принять для стали 12X18H10T (определяется при средней температуре стенки  $t_{ст}$  по табл. П.4.4), Вт/(м · К).

Среднелогарифмический температурный напор при противотоке, °С:

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} \right)}. \quad (3.12)$$

Поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>, определяется из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{\text{cp}}}. \quad (3.13)$$

По величине поверхности теплообмена подбирается пластинчатый теплообменник.

### 3.2. Гидравлический расчет пластинчатых теплообменников

Коэффициент общего гидравлического сопротивления (трение и местные сопротивления) единицы длины канала:

$$\xi = \frac{9,543}{\text{Re}_{\text{ж},d1,2}^{0,25}} \text{ при } \text{Re}_{\text{ж},d} \geq 50; \quad (3.14)$$

$$\xi = \frac{390}{\text{Re}_{\text{ж},d1,2}} \text{ при } \text{Re}_{\text{ж},d} < 50. \quad (3.15)$$

Потери давления в теплообменнике по ходу греющего (первичного) и нагреваемого (вторичного) теплоносителей, Па:

$$\Delta P_{1,2} = \xi_{1,2} \frac{L_{\text{пр}}}{d_3} \frac{w_{1,2}^2 \rho_{1,2}}{2}, \quad (3.16)$$

где  $L_{\text{пр}}$  – приведенная длина одного канала, м;

### 3.3. Компоновочный расчет

Компоновочный расчет рекомендуется проводить по заданным условиям с целью полного использования допустимых потерь давления  $\Delta P_1$  и оптимизации теплообменника по площади поверхности теплообмена.

При расчете следует учесть, что *пакет* – это набор пластин, образующих щелевидные каналы, в которых греющая и нагреваемая вода течет только в одном направлении. Понятие «пакет» тождественно понятию «ход». *Секция* – это один или несколько пакетов, соединенных со штуцерами на раме для входа и выхода теплоносителя, которые предназначены для одного теплового процесса.

Схема компоновки пластин в теплообменнике:

$$C_x = \frac{m_1' + m_1'' + m_1''' + \dots + m_1^i}{m_2' + m_2'' + m_2''' + \dots + m_2^i}, \quad (3.17)$$

где числитель – компоновка каналов для греющей воды (первичного теплоносителя), знаменатель – то же для нагреваемой воды (вторичного теплоносителя);  $m_1$  – число каналов для греющей воды, включенных параллельно;  $m_2$  – число каналов для нагреваемой воды, включенных параллельно в каждом пакете;  $\sum m_2^i$  – количество последовательно включенных пакетов в секции.

Необходимая площадь поперечного сечения пакета определяется по заданным расходам рабочих сред и вычисленным или выбранным скоростям их движения в каналах:

$$f_n = \frac{V}{w}, \quad (3.18)$$

где  $V$  – объемный расход рабочей среды, м<sup>3</sup>/с;  $w$  – скорость данной рабочей среды, м/с.

Число параллельных каналов в пакете для каждой среды:

$$m = \frac{f_n}{f_1}, \quad (3.19)$$

где  $f_1$  – площадь поперечного сечения одного межпластинного канала, м<sup>2</sup>. Полученное значение  $m$  округлить до целого.

Число пластин в пакете:

$$n_n = 2m. \quad (3.20)$$

В крайних пакетах, соприкасающихся с плитами, общее число пластин на одну больше (концевую):

$$n_n' = 2m + 1. \quad (3.21)$$

Поверхность теплопередачи одного пакета:

$$F_n = F_1 n_n. \quad (3.22)$$

Число пакетов (ходов) в теплообменном аппарате:

$$x = \frac{F_a}{F_n}, \quad (3.23)$$

где  $F_a$  – рабочая поверхность аппарата, найденная в тепловом расчете,  $\text{м}^2$ .

Если величина  $F_a$  получается дробной, то ее округляют до целого числа и корректируют соответственно поверхность всего аппарата:

$$F'_a = xF_n. \quad (3.24)$$

Общее число пластин в аппарате (секции):

$$n_a = \frac{F'_a + 2F_1}{F_1}, \quad (3.25)$$

где  $F_1$  – поверхность теплопередачи одной пластины,  $\text{м}^2$ .

Для второго теплоносителя принимается такая же схема компоновки, как и для первого (симметричная компоновка).

## Литература

1. Бакластов, А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок : учеб. пособие для вузов / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, П. Г. Удыма ; под ред. А. М. Бакластова. – М. : Энергоиздат, 1981. – 336 с.
2. Галимова, А. Т. Пластинчатые теплообменники: методические указания / А. Т. Галимова, А. С. Приданцев, А. А. Сагдеев. – Нижнекамск : Нижнекам. химико-технол. ин-т (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2012. – 48 с.
3. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Курсовое проектирование / Ю. И. Дытнерский, Г. С. Борисов, В. П. Брыков. – М. : Химия, 1991. – 412 с.
4. Козлов, А. И. Основные правила разработки курсовых проектов по процессам и аппаратам химической технологии и защиты окружающей среды : метод. указания / А. И. Козлов, П. М. Лукин, Н. И. Савельев, П. Н. Эндюськин ; Чуваш. ун-т. – Чебоксары, 2005. – 32 с.
5. Копко, В. М. Пластинчатые теплообменники в системах централизованного теплоснабжения. Курсовое и дипломное проектирование : учеб. пособие / В. М. Копко, М. Г. Пшоник. – Минск : БНТУ, 2005. – 199 с.
6. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М. : Высш. шк., 1980. – 469 с.
7. Орлов, В. Н. Проектирование рекуперативных теплообменных аппаратов : учеб. пособие. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – 136 с.
8. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – Кн. 4. – 586 с.
9. Савельев, Н. И. Расчет и проектирование кожухотрубчатых теплообменных аппаратов : учеб. пособие / Н. И. Савельев, П. М. Лукин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та. 2010. – 80 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П.О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
к курсовой работе по курсу  
«Тепломассообмен» на тему: (название  
темы курсовой работы)

Выполнил студент группы \_\_\_\_\_  
ФИО студента

Руководитель  
\_\_\_\_\_ ФИО руководителя

Дата проверки \_\_\_\_\_

Дата допуска к защите \_\_\_\_\_

Дата защиты \_\_\_\_\_

Оценка работы \_\_\_\_\_

Подписи членов комиссии  
по защите курсовой работы \_\_\_\_\_

Гомель 2024

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого»

Факультет энергетический

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

|           |                    |
|-----------|--------------------|
| подпись   | инициалы и фамилия |
| « _____ » | _____ г.           |

### ЗАДАНИЕ по курсовому проектированию

Студенту \_\_\_\_\_

1. Тема курсовой работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. Сроки сдачи студентом законченной работы \_\_\_\_\_

3. Исходные данные к курсовой работе \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих  
разработке вопросов) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей и графиков) \_\_\_\_\_

6. Консультанты по курсовой работе \_\_\_\_\_

7. Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

1. Календарный график выполнения курсовой работы на весь период проектирования (с указанием сроков выполнения и трудоемкости отдельных этапов) \_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_  
подпись

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
дата и подпись студента

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.3.1

### Исходные данные к курсовой работе

| Пред-послед-няя цифра шифра | $M_1$ , кг/с | Материал труб | Качество воды     | Послед-няя цифра шифра | $M_2$ , кг/с | $d_n/\delta$ , мм | $t'_1$ , °C | $t'_2$ , °C | $\Delta t_2$ , °C |
|-----------------------------|--------------|---------------|-------------------|------------------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|
| 0                           | 12,5         | СтУ           | Загрязненная      | 0                      | 5,5          | $25 \times 2$     | 125         | 65          | 25                |
| 1                           | 12           | СтН           | Среднего качества | 1                      | 5            | $20 \times 2$     | 120         | 60          | 15                |
| 2                           | 13,5         | Л             | Загрязненная      | 2                      | 6,5          | $25 \times 2$     | 115         | 65          | 20                |
| 3                           | 11,5         | СтУ           | Загрязненная      | 3                      | 6            | $20 \times 2$     | 110         | 55          | 25                |
| 4                           | 14,5         | СтН           | Среднего качества | 4                      | 7,5          | $25 \times 2$     | 105         | 60          | 30                |
| 5                           | 13           | Л             | Среднего качества | 5                      | 7            | $20 \times 2$     | 100         | 55          | 25                |
| 6                           | 10,5         | СтУ           | Загрязненная      | 6                      | 8,5          | $25 \times 2$     | 95          | 50          | 20                |
| 7                           | 10           | СтН           | Среднего качества | 7                      | 8            | $20 \times 2$     | 90          | 45          | 15                |
| 8                           | 14           | Л             | Загрязненная      | 8                      | 9,5          | $25 \times 2$     | 105         | 60          | 20                |
| 9                           | 11           | СтУ           | Загрязненная      | 9                      | 9            | $20 \times 2$     | 95          | 45          | 25                |

Примечание. СтН – сталь нержавеющая; СтУ – сталь углеродистая; Л – латунь.

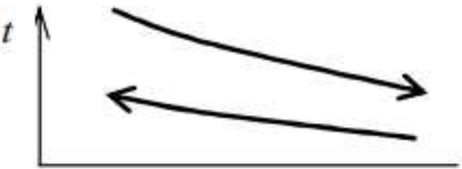
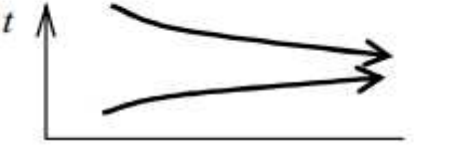
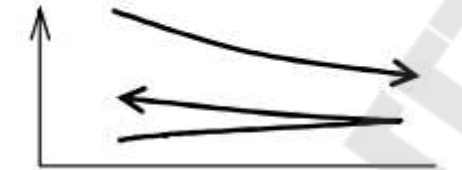
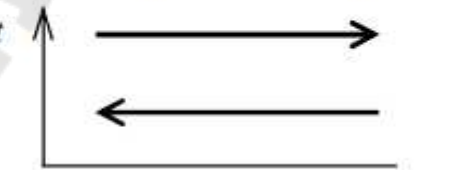
## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П.4.1

### Физические свойства воды на линии насыщения [5]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $c_p$<br>$\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ | $\lambda \cdot 10^2,$<br>$\text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\text{Pr}_\text{ж}$ |
|---------------------|-----------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 0                   | 999,8                 | 4,212                                     | 55,1                                                    | 1,789                                 | 13,67                |
| 10                  | 999,6                 | 4,191                                     | 57,5                                                    | 1,306                                 | 9,52                 |
| 20                  | 998,2                 | 4,183                                     | 59,9                                                    | 1,006                                 | 7,02                 |
| 30                  | 995,6                 | 4,174                                     | 61,8                                                    | 0,805                                 | 5,42                 |
| 40                  | 992,2                 | 4,174                                     | 63,4                                                    | 0,659                                 | 4,31                 |
| 50                  | 988,0                 | 4,174                                     | 64,8                                                    | 0,556                                 | 3,54                 |
| 60                  | 983,2                 | 4,178                                     | 65,9                                                    | 0,478                                 | 2,98                 |
| 70                  | 977,7                 | 4,187                                     | 66,8                                                    | 0,415                                 | 2,55                 |
| 80                  | 971,8                 | 4,195                                     | 67,5                                                    | 0,365                                 | 2,21                 |
| 90                  | 965,3                 | 4,208                                     | 68,0                                                    | 0,326                                 | 1,95                 |
| 100                 | 958,3                 | 4,220                                     | 68,3                                                    | 0,295                                 | 1,75                 |
| 110                 | 951,02                | 4,233                                     | 68,5                                                    | 0,272                                 | 1,6                  |
| 120                 | 943,1                 | 4,250                                     | 68,6                                                    | 0,252                                 | 1,47                 |
| 130                 | 934,8                 | 4,266                                     | 68,6                                                    | 0,233                                 | 1,36                 |
| 140                 | 926,1                 | 4,287                                     | 68,5                                                    | 0,217                                 | 1,26                 |
| 150                 | 916,9                 | 4,312                                     | 68,4                                                    | 0,203                                 | 1,17                 |

## Типовые температурные схемы теплообменных процессов

| Тип А. Температурные схемы без фазового превращения обоих теплоносителей                                                                                 | Тип Б. Температурные схемы с фазовым превращением одного или обоих теплоносителей                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>А1.</b> Противоточное движение теплоносителей</p>                 | <p><b>Б1.</b> Нагрев холодного потока конденсирующимся паром</p>  |
| <p><b>А2.</b> Прямоточное движение теплоносителей</p>                   | <p><b>Б2.</b> Испарение жидкости охлаждающим теплоносителем</p>   |
| <p><b>А3.</b> Смешанное движение одного или обоих теплоносителей</p>  | <p><b>Б3.</b> Испарение жидкости конденсирующимся паром</p>     |

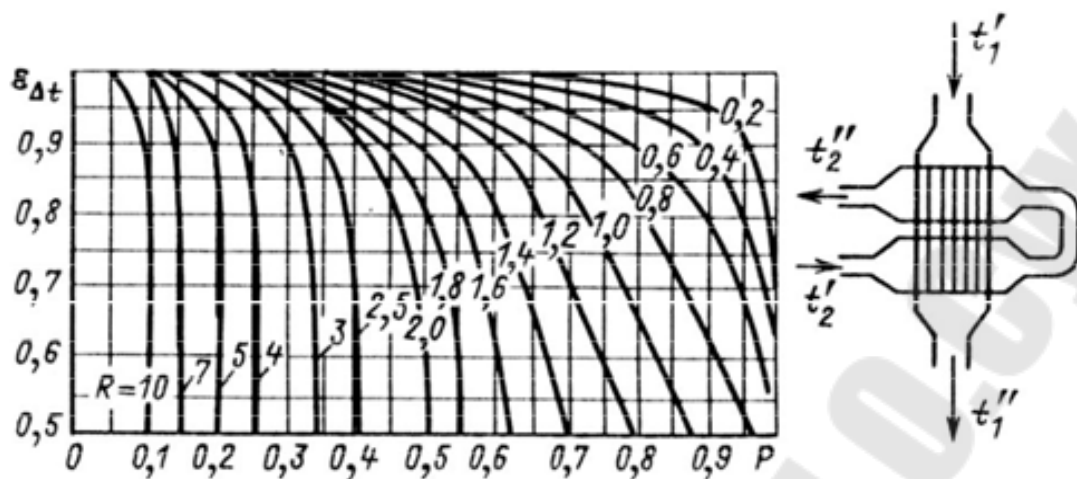


Рис. П.4.1. График для определения поправки  $\varepsilon_{\Delta t}$  при перемешивании одного теплоносителя [7]

Таблица П.4.3

**Тепловая проводимость загрязнений стенок  $1/r_3$  [2]**

| Теплоносители                          | $1/r_3$ , Вт/(м <sup>2</sup> · К) |
|----------------------------------------|-----------------------------------|
| Вода: загрязненная                     | 1400–1860                         |
| среднего качества                      | 1860–2900                         |
| хорошего качества                      | 2900–5800                         |
| дистиллированная                       | 11600                             |
| Воздух                                 | 2800                              |
| Нефтепродукты, масла, пары хладагентов | 2900                              |
| Нефтепродукты сырые                    | 1160                              |
| Органические жидкости                  | 5800                              |
| Водяной пар, содержащий масла          | 5800                              |
| Пары органических жидкостей            | 11600                             |

Таблица П.4.4

**Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  металлов и сплавов, Вт/(м · К)**

| Металл или сплав                          | Температура, °С |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                                           | 0               | 100  | 200  | 300  | 400  |
| Сталь углеродистая ( $C \approx 0,5 \%$ ) | 50,5            | 47,5 | 44,8 | 42,0 | 39,4 |
| Сталь нержавеющая ( $Cr \approx 13 \%$ )  | 26,5            | 27,0 | 27,0 | 27,0 | 27,6 |
| Латунь (70 % Cu + 30 % Zn)                | 106             | 131  | 143  | 145  | 148  |
| Дюралюминий (96 % Al + 4 % Cu)            | 160             | 188  | 188  | 193  | –    |
| Медь (чистая)                             | 401             | 393  | 389  | 384  | 379  |

Таблица П.4.5

**Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи  $k$  [2]**

| Вид теплообмена                                            | $k$ , Вт/(м <sup>2</sup> · К) |                         |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
|                                                            | для вынужденного движения     | для свободного движения |
| От газа к газу                                             | 10–40                         | 4–12                    |
| От газа к жидкости                                         | 10–60                         | 6–20                    |
| От конденсирующегося пара к газу                           | 10–60                         | 6–12                    |
| От жидкости к жидкости:<br>для воды                        | 800–1700                      | 140–430                 |
| для углеводородов и масел                                  | 120–270                       | 30–60                   |
| От конденсирующегося водяного пара:<br>к воде              | 800–3500                      | 300–1200                |
| к кипящей жидкости                                         | –                             | 300–2500                |
| к органическим жидкостям                                   | 120–340                       | 60–170                  |
| От конденсирующегося пара<br>органических жидкостей к воде | 300–800                       | 230–460                 |

Таблица П.4.6

**Параметры кожухотрубчатых теплообменников сварной конструкции  
с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатых  
теплообменников с температурными компенсаторами на кожухе [2]**

| <i>D</i><br>ко-<br>жуха,<br>мм | <i>d</i> труб,<br>мм | Чис-<br>ло<br>хо-<br>дов | Об-<br>щее<br>число<br>труб,<br>шт. | Поверхность<br>теплообмена<br>(в м <sup>2</sup> )*<br>при длине труб, м |     |      |      |      |      |     | Площадь<br>сечения<br>потока,<br>10 <sup>2</sup> м <sup>2</sup> |                                  | Площадь<br>сечения<br>одного<br>хода по<br>трубам,<br>10 <sup>2</sup> м |
|--------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|-----|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                                |                      |                          |                                     | 1,0                                                                     | 1,5 | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 6,0  | 9,0 | в вы-<br>резе<br>перего-<br>родок                               | меж-<br>ду<br>перего-<br>родками |                                                                         |
| 1                              | 2                    | 3                        | 4                                   | 5                                                                       | 6   | 7    | 8    | 9    | 10   | 11  | 12                                                              | 13                               | 14                                                                      |
| 159                            | 20 x 2               | 1                        | 19                                  | 1,0                                                                     | 2,0 | 2,5  | 3,5  | —    | —    | —   | 0,3                                                             | 0,5                              | 0,4                                                                     |
|                                | 25 x 2               | 1                        | 13                                  | 1,0                                                                     | 1,5 | 2,0  | 3,0  | —    | —    | —   | 0,4                                                             | 0,8                              | 0,5                                                                     |
| 273                            | 20 x 2               | 1                        | 61                                  | 4,0                                                                     | 6,0 | 7,5  | 11,5 | —    | —    | —   | 0,7                                                             | 1,0                              | 1,2                                                                     |
|                                | 25 x 2               | 1                        | 37                                  | 3,0                                                                     | 4,5 | 6,0  | 9,0  | —    | —    | —   | 0,9                                                             | 1,1                              | 1,3                                                                     |
| 325                            | 20 x 2               | 1                        | 100                                 | —                                                                       | 9,5 | 12,5 | 19,0 | 25,0 | —    | —   | 1,1                                                             | 2,0                              | 2,0                                                                     |
|                                |                      | 2                        | 90                                  | —                                                                       | 8,5 | 11,0 | 17,0 | 22,5 | —    | —   | 1,1                                                             | 1,6                              | 0,9                                                                     |
|                                | 25 x 2               | 1                        | 62                                  | —                                                                       | 7,5 | 10,0 | 14,5 | 19,5 | —    | —   | 1,3                                                             | 2,9                              | 2,1                                                                     |
|                                |                      | 2                        | 56                                  | —                                                                       | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 17,5 | —    | —   | 1,3                                                             | 1,5                              | 1,0                                                                     |
| 400                            | 20 x 2               | 1                        | 181                                 | —                                                                       | —   | 23,0 | 34,0 | 46,0 | 68,0 | —   | 1,7                                                             | 2,5                              | 3,6                                                                     |
|                                |                      | 2                        | 166                                 | —                                                                       | —   | 21,0 | 31,0 | 42,0 | 63,0 | —   | 1,7                                                             | 3,0                              | 1,7                                                                     |
|                                | 25 x 2               | 1                        | 111                                 | —                                                                       | —   | 17,0 | 26,0 | 35,0 | 52,0 | —   | 2,0                                                             | 3,1                              | 3,8                                                                     |
|                                |                      | 2                        | 100                                 | —                                                                       | —   | 16,0 | 24,0 | 31,0 | 47,0 | —   | 2,0                                                             | 2,5                              | 1,7                                                                     |
| 600                            | 20 x 2               | 1                        | 389                                 | —                                                                       | —   | 49   | 73   | 98   | 147  | —   | 4,1                                                             | 6,6                              | 7,8                                                                     |
|                                |                      | 2                        | 370                                 | —                                                                       | —   | 47   | 70   | 93   | 139  | —   | 4,1                                                             | 4,8                              | 3,7                                                                     |
|                                |                      | 4                        | 334                                 | —                                                                       | —   | 42   | 63   | 84   | 126  | —   | 4,1                                                             | 4,8                              | 1,6                                                                     |
|                                |                      | 6                        | 316                                 | —                                                                       | —   | 40   | 60   | 79   | 119  | —   | 3,7                                                             | 4,8                              | 0,9                                                                     |
|                                | 25 x 2               | 1                        | 257                                 | —                                                                       | —   | 40   | 61   | 81   | 121  | —   | 4,0                                                             | 5,3                              | 8,9                                                                     |
|                                |                      | 2                        | 240                                 | —                                                                       | —   | 38   | 57   | 75   | 113  | —   | 4,0                                                             | 4,5                              | 4,2                                                                     |
|                                |                      | 4                        | 206                                 | —                                                                       | —   | 32   | 49   | 65   | 97   | —   | 4,0                                                             | 4,5                              | 1,8                                                                     |
|                                |                      | 6                        | 196                                 | —                                                                       | —   | 31   | 46   | 61   | 91   | 91  | 3,7                                                             | 4,5                              | 1,1                                                                     |

| D<br>ко-<br>жуха,<br>мм | d труб,<br>мм | Чис-<br>ло<br>ходов | Об-<br>щее<br>число<br>труб,<br>шт. | Поверхность<br>теплообмена<br>(в м <sup>2</sup> )*<br>при длине труб, м |     |     |     |     |     |     | Площадь<br>сечения<br>потока,<br>10 <sup>2</sup> м <sup>2</sup> |                                  | Площадь<br>сечения<br>одного<br>хода по<br>трубам,<br>10 <sup>2</sup> м |
|-------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                         |               |                     |                                     | 1,0                                                                     | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 6,0 | 9,0 | в вы-<br>резе<br>перего-<br>родок                               | меж-<br>ду<br>перего-<br>родками |                                                                         |
| 800                     | 20 x 2        | 1                   | 717                                 | —                                                                       | —   | 90  | 135 | 180 | 270 | 405 | 6,9                                                             | 9,1                              | 14,4                                                                    |
|                         |               | 2                   | 690                                 | —                                                                       | —   | 87  | 130 | 173 | 260 | 390 | 6,9                                                             | 7,0                              | 6,9                                                                     |
|                         |               | 4                   | 638                                 | —                                                                       | —   | 80  | 120 | 160 | 240 | 361 | 6,9                                                             | 7,0                              | 3,0                                                                     |
|                         |               | 6                   | 618                                 | —                                                                       | —   | 78  | 116 | 155 | 233 | 349 | 6,5                                                             | 7,0                              | 2,0                                                                     |
|                         | 25 x 2        | 1                   | 465                                 | —                                                                       | —   | 73  | 109 | 146 | 219 | 329 | 7,0                                                             | 7,9                              | 16,1                                                                    |
|                         |               | 2                   | 442                                 | —                                                                       | —   | 69  | 104 | 139 | 208 | 312 | 7,0                                                             | 7,0                              | 7,7                                                                     |
|                         |               | 4                   | 404                                 | —                                                                       | —   | 63  | 95  | 127 | 190 | 285 | 7,0                                                             | 7,0                              | 3,0                                                                     |
|                         |               | 6                   | 384                                 | —                                                                       | —   | 60  | 90  | 121 | 181 | 271 | 6,5                                                             | 7,0                              | 2,2                                                                     |
| 1000                    | 20 x 2        | 1                   | 1173                                | —                                                                       | —   | —   | 221 | 295 | 442 | 663 | 10,1                                                            | 15,6                             | 23,6                                                                    |
|                         |               | 2                   | 1138                                | —                                                                       | —   | —   | 214 | 286 | 429 | 643 | 10,1                                                            | 14,6                             | 11,4                                                                    |
|                         |               | 4                   | 1072                                | —                                                                       | —   | —   | 202 | 269 | 404 | 606 | 10,1                                                            | 14,6                             | 5,1                                                                     |
|                         |               | 6                   | 1044                                | —                                                                       | —   | —   | 197 | 262 | 393 | 590 | 9,6                                                             | 14,6                             | 3,4                                                                     |
|                         | 25x2          | 1                   | 747                                 | —                                                                       | —   | —   | 176 | 235 | 352 | 528 | 10,6                                                            | 14,3                             | 25,9                                                                    |
|                         |               | 2                   | 718                                 | —                                                                       | —   | —   | 169 | 226 | 338 | 507 | 10,6                                                            | 13,0                             | 12,4                                                                    |
|                         |               | 4                   | 666                                 | —                                                                       | —   | —   | 157 | 209 | 314 | 471 | 10,6                                                            | 13,0                             | 5,5                                                                     |
|                         |               | 6                   | 642                                 | —                                                                       | —   | —   | 151 | 202 | 302 | 454 | 10,2                                                            | 13,0                             | 3,6                                                                     |
| 1200                    | 20 x 2        | 1                   | 1701                                | —                                                                       | —   | —   | —   | 427 | 641 | 961 | 14,5                                                            | 18,7                             | 34,2                                                                    |
|                         |               | 2                   | 1658                                | —                                                                       | —   | —   | —   | 417 | 625 | 937 | 14,5                                                            | 17,6                             | 16,5                                                                    |
|                         |               | 4                   | 1580                                | —                                                                       | —   | —   | —   | 397 | 595 | 893 | 14,5                                                            | 17,6                             | 7,9                                                                     |
|                         |               | 6                   | 1544                                | —                                                                       | —   | —   | —   | 388 | 582 | 873 | 13,1                                                            | 17,6                             | 4,9                                                                     |
|                         | 25 x 2        | 1                   | 1083                                | —                                                                       | —   | —   | —   | 340 | 510 | 765 | 16,4                                                            | 17,9                             | 37,5                                                                    |
|                         |               | 2                   | 1048                                | —                                                                       | —   | —   | —   | 329 | 494 | 740 | 16,4                                                            | 16,5                             | 17,9                                                                    |
|                         |               | 4                   | 986                                 | —                                                                       | —   | —   | —   | 310 | 464 | 697 | 16,4                                                            | 16,5                             | 8,4                                                                     |
|                         |               | 6                   | 958                                 | —                                                                       | —   | —   | —   | 301 | 451 | 677 | 14,2                                                            | 16,5                             | 5,2                                                                     |

\*Рассчитана по наружному диаметру труб.

Таблица П.4.7

**Диаметры отверстий и шаг между отверстиями в трубных решетках  
и перегородках кожухотрубчатых теплообменников [2]**

| Наружный диаметр труб, мм | Диаметры отверстий, мм |                | Шаг между<br>отверстиями $S$ , мм |
|---------------------------|------------------------|----------------|-----------------------------------|
|                           | в решетке              | в перегородках |                                   |
| 16                        | 16,3                   | 17,0           | 22                                |
| 20                        | 20,4                   | 20,8           | 26                                |
| 25                        | 25,4                   | 26,0           | 32                                |
| 38                        | 38,7                   | 39,0           | 48                                |
| 57                        | 57,8                   | 60,0           | 70                                |

Таблица П.4.8

**Коэффициенты местных сопротивлений потоку  $\xi$  [2]**

| Трубное пространство        | $\xi$ | Межтрубное пространство                 | $\xi$             |
|-----------------------------|-------|-----------------------------------------|-------------------|
| Входная и выходная камеры   | 1,5   | Вход и выход жидкости                   | 1,5               |
| Поворот между ходами        | 2,5   | Поворот через сегментную<br>перегородку | 1,5               |
| Вход в трубы и выход из них | 1     | Сопротивление пучка труб                | $3m / Re_2^{0,2}$ |

Таблица П.4.9

**Диаметры условного прохода штуцеров кожухотрубчатых  
теплообменников [2]**

| <b>D<br/>кожуха,<br/>мм</b> | <b>Диаметр, мм, условного прохода<br/>штуцеров для трубного пространства<br/>при числе ходов по трубам</b> |          |          |          | <b>Диаметр условного прохода<br/>штуцеров для межтрубного<br/>пространства, мм</b> |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | <b>1</b>                                                                                                   | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> |                                                                                    |
| 159                         | 80                                                                                                         | —        | —        | —        | 80                                                                                 |
| 273                         | 100                                                                                                        | —        | —        | —        | 100                                                                                |
| 325                         | 150                                                                                                        | 100      | —        | —        | 100                                                                                |
| 400                         | 150                                                                                                        | 150      | —        | —        | 150                                                                                |
| 600                         | 200                                                                                                        | 200      | 150      | 100      | 200                                                                                |
| 800                         | 250                                                                                                        | 250      | 200      | 150      | 250                                                                                |
| 1000                        | 300                                                                                                        | 300      | 200      | 150      | 300                                                                                |
| 1200                        | 350                                                                                                        | 350      | 250      | 200      | 350                                                                                |
| 1400                        | —                                                                                                          | 350      | 250      | 200      | —                                                                                  |

Таблица П.4.10

**Число сегментных перегородок в нормализованных кожухотрубчатых  
теплообменниках [2]**

| <b>D кожуха,<br/>мм</b> | <b>Число сегментных перегородок при длине труб, м</b> |            |            |            |            |            |            |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | <b>1,0</b>                                            | <b>1,5</b> | <b>2,0</b> | <b>3,0</b> | <b>4,0</b> | <b>6,0</b> | <b>9,0</b> |
| 159                     | 6                                                     | 10         | 14         | 26         | —          | —          | —          |
| 273                     | 4                                                     | 8          | 12         | 18         | —          | —          | —          |
| 325                     | —                                                     | 6          | 8          | 14 (16)    | 18         | 36 (38)    | —          |
| 400                     | —                                                     | —          | 6          | 10         | 14         | 22 (24)    | —          |
| 600                     | —                                                     | —          | 4          | 8          | 10         | 18(16)     | (24)       |
| 800                     | —                                                     | —          | 4          | 6          | 8          | 14 (12)    | 22 (20)    |
| 1000                    | —                                                     | —          | —          | 4          | 6          | 10         | 16 (18)    |
| 1200                    | —                                                     | —          | —          | —          | 6          | 8          | 14 (12)    |

*Примечание.* Числа в скобках относятся к теплообменникам с плавающей головкой и с U-образными трубами.

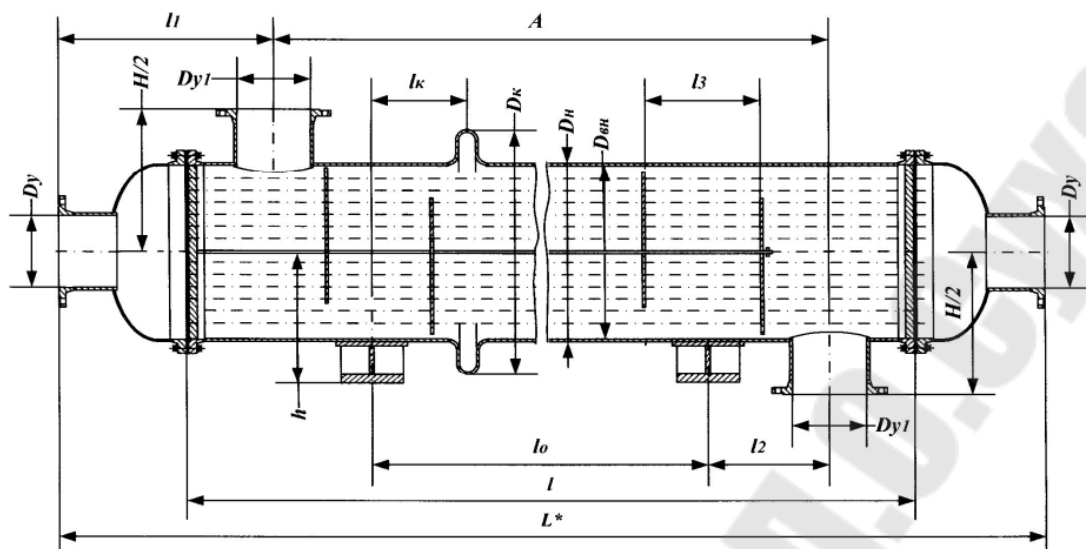


Рис. П.4.2. Теплообменник одноходовой горизонтальный с диаметром кожуха от 325 до 1200 мм (к табл. П.4.11)

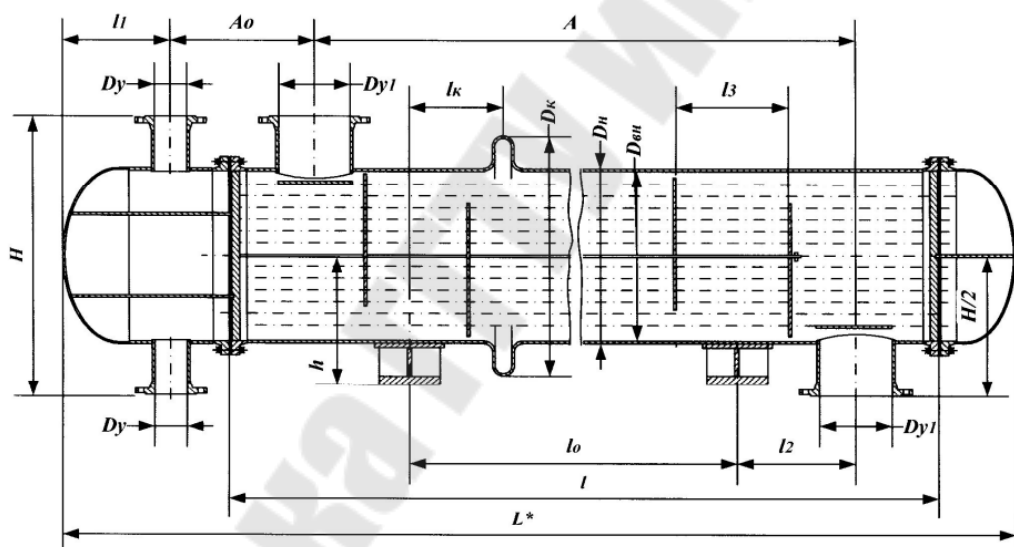


Рис. П.4.3. Теплообменник четырехходовой горизонтальный с диаметром кожуха от 325 до 1200 мм (к табл. П.4.12)

Таблица П.4.11

## Основные размеры одноходовых теплообменников, мм

| Диаметр<br>кожуха<br>$D_n D_{вн}$ | Давление<br>в кожухе<br>$P_y$ , МПа | $l$  | $L$  | $l_0$ | $A$  | $\frac{D_y}{D_{y1}}$ | $\frac{D_k}{H/2}$  | $\frac{h}{H}$ | $l_2$      |            | $l_k$ |      | Размещение<br>перегородок |           |
|-----------------------------------|-------------------------------------|------|------|-------|------|----------------------|--------------------|---------------|------------|------------|-------|------|---------------------------|-----------|
|                                   |                                     |      |      |       |      |                      |                    |               | ТКГ<br>ТНГ | ТКВ<br>ТНВ | ТКВ   | ТКГ  |                           |           |
|                                   |                                     |      |      |       |      |                      |                    |               |            |            |       |      | $l_3$                     | $n$ , шт. |
| <u>159</u> –                      | 1,6;<br>2,5;<br>4,0                 | 1000 | 1540 | 350   | 680  |                      |                    |               | 200        | 400        | –     | –    | 100                       | 6         |
|                                   |                                     | 1500 | 2040 | 650   | 1180 | $\frac{80}{80}$      | $\frac{309}{215}$  | 159           | 400        | 800        | 325   | 325  |                           | 10        |
|                                   |                                     | 2000 | 2540 | 800   | 1680 | $\frac{80}{80}$      | $\frac{309}{215}$  | 430           | 500        | 1200       | 400   | 400  |                           | 14        |
|                                   |                                     | 3000 | 3540 | 1500  | 2680 |                      |                    |               | 650        | 1500       | 750   | 750  |                           | 26        |
| <u>273</u> –                      | 1,6; 2,5                            | 1000 | 1640 | 350   | 600  |                      |                    |               | 250        | 400        | -     | -    | 130                       | 4         |
|                                   |                                     | 1500 | 2140 | 650   | 1100 | $\frac{100}{100}$    | $\frac{423}{272}$  | 241           | 350        | 800        | 325   | 450  |                           | 8         |
|                                   |                                     | 2000 | 2640 | 800   | 1600 | $\frac{100}{100}$    | $\frac{423}{272}$  | 520           | 500        | 1200       | 400   | 700  |                           | 12        |
|                                   |                                     | 3000 | 3640 | 1500  | 2600 |                      |                    |               | 650        | 1500       | 750   | 900  |                           | 20        |
| <u>325</u> –                      | 1,6; 2,5                            | 1500 | 2200 | 650   | 1050 |                      |                    |               | 350        | 800        | 325   | 475  | 180                       | 6         |
|                                   |                                     | 2000 | 2700 | 800   | 1550 | $\frac{150}{100}$    | $\frac{475}{298}$  | 292           | 500        | 1200       | 400   | 700  |                           | 8         |
|                                   |                                     | 3000 | 3700 | 1500  | 2550 | $\frac{150}{100}$    | $\frac{475}{298}$  | 575           | 650        | 1500       | 750   | 900  |                           | 14        |
|                                   |                                     | 4000 | 4700 | 2000  | 3550 |                      |                    |               | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 18        |
| <u>426</u> –                      | 1,6; 2,5                            | 2000 | 2930 | 800   | 1550 |                      |                    |               | 500        | 1200       | 400   | 700  | 250                       | 6         |
|                                   |                                     | 3000 | 3930 | 1500  | 2550 | $\frac{150}{150}$    | $\frac{576}{363}$  | 352           | 500        | 1500       | 750   | 900  |                           | 10        |
|                                   |                                     | 4000 | 4930 | 2000  | 3550 | $\frac{150}{150}$    | $\frac{576}{363}$  | 610           | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 14        |
|                                   |                                     | 6000 | 6930 | 3000  | 5550 |                      |                    |               | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 22        |
| $\frac{630}{600}$                 | 1,6                                 | 2000 | 2960 | 800   | 1500 |                      |                    |               | 400        | 1200       | 400   | 700  | 300                       | 4         |
|                                   |                                     | 3000 | 3960 | 1500  | 2500 | $\frac{200}{200}$    | $\frac{780}{530}$  | 525           | 500        | 1500       | 750   | 900  |                           | 8         |
|                                   |                                     | 4000 | 4960 | 2000  | 3500 | $\frac{200}{200}$    | $\frac{780}{530}$  | 680           | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 10        |
|                                   |                                     | 6000 | 6960 | 3000  | 5500 |                      |                    |               | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 18        |
| $\frac{800}{800}$                 | 1,0                                 | 2000 | 3070 | 800   | 1450 |                      |                    |               | 400        | 1200       | 400   | 700  | 350                       | 4         |
|                                   |                                     | 3000 | 4070 | 1500  | 2450 | $\frac{250}{250}$    | $\frac{966}{627}$  | 622           | 600        | 1500       | 750   | 900  |                           | 6         |
|                                   |                                     | 4000 | 5070 | 2000  | 3450 | $\frac{250}{250}$    | $\frac{966}{627}$  | 775           | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 8         |
|                                   |                                     | 6000 | 7070 | 3000  | 5450 |                      |                    |               | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 14        |
| $\frac{800}{800}$                 | 1,6                                 | 2000 | 3120 | 800   | 1450 |                      |                    |               | 400        | 1200       | 400   | 700  | 350                       | 4         |
|                                   |                                     | 3000 | 4120 | 1500  | 2450 | $\frac{250}{250}$    | $\frac{966}{627}$  | 622           | 600        | 1500       | 750   | 900  |                           | 6         |
|                                   |                                     | 4000 | 5120 | 2000  | 3450 | $\frac{250}{250}$    | $\frac{966}{627}$  | 775           | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 8         |
|                                   |                                     | 6000 | 7120 | 3000  | 5450 |                      |                    |               | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 14        |
| $\frac{1000}{1000}$               | 0,6; 1,0                            | 3000 | 4170 | 1500  | 2350 |                      |                    |               | 400        | 1500       |       | 900  | 520                       | 4         |
|                                   |                                     | 4000 | 5170 | 2000  | 3350 | $\frac{300}{300}$    | $\frac{1166}{429}$ | 722           | 600        | 1800       | –     | 1000 |                           | 6         |
|                                   |                                     | 6000 | 7170 | 3000  | 5350 | $\frac{300}{300}$    | $\frac{1166}{429}$ | 910           | 1200       | 1800       | –     | 1000 |                           | 10        |
|                                   |                                     |      |      |       |      |                      |                    |               |            |            |       |      |                           |           |
| $\frac{1000}{1000}$               | 1,6                                 | 3000 | 4180 | 1500  | 2350 |                      |                    |               | 400        | 1500       |       | 900  | 520                       | 4         |
|                                   |                                     | 4000 | 5180 | 2000  | 3350 | $\frac{300}{300}$    | $\frac{1166}{429}$ | 722           | 600        | 1800       | –     | 1000 |                           | 6         |
|                                   |                                     | 6000 | 7180 | 3000  | 5350 | $\frac{300}{300}$    | $\frac{1166}{429}$ | 915           | 1200       | 1800       | –     | 1000 |                           | 10        |
|                                   |                                     |      |      |       |      |                      |                    |               |            |            |       |      |                           |           |
| $\frac{1200}{1200}$               | 0,6; 1,0                            | 4000 | 5300 | 2000  | 3200 |                      |                    |               | 700        | 1800       |       | 1000 | 550                       | 6         |
|                                   |                                     | 6000 | 7300 | 3000  | 5200 | $\frac{350}{350}$    | $\frac{1166}{831}$ | 1050          | 1200       |            | –     |      |                           | 8         |
| $\frac{1200}{1200}$               | 1,6                                 | 4000 | 5350 | 2000  | 3200 |                      |                    |               | 700        |            |       | 1000 | 550                       | 6         |
|                                   |                                     | 6000 | 7350 | 3000  | 5200 | $\frac{350}{350}$    | $\frac{1366}{831}$ | 1080          | 1200       | 1800       | –     |      |                           | 8         |

Таблица П.4.12

## Основные размеры многоходовых теплообменников, мм

| Диаметр<br>кожуха<br>$D_n D_{вн}$ | Давле-<br>ние<br>в ко-<br>жухе<br>$P_y$ ,<br>МПа | $l$  | $L$  | $10$ | $A$  | $Dy$ при<br>числе ходов<br>по трубам |     |     | $Dy1$<br>$D_k$     | $H/2$<br>$h$      | $A0$<br>$11$      | $l_2$      |            | $l_k$ |      | Размещение<br>перегородок |           |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|------|------|------|------|--------------------------------------|-----|-----|--------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|-------|------|---------------------------|-----------|
|                                   |                                                  |      |      |      |      | 2                                    | 4   | 6   |                    |                   |                   | ТКГ<br>ТНГ | ТКВ<br>ТНВ | ТКГ   | ТКВ  | $l_3$                     | $n$ , шт. |
|                                   |                                                  |      |      |      |      |                                      |     |     |                    |                   |                   |            |            |       |      |                           |           |
| <u>325</u> –                      | 1,6; 2,5                                         | 1500 | 2170 | 650  | 1050 | 100                                  | –   | –   | <u>100</u><br>475  | <u>293</u><br>292 | <u>440</u><br>240 | 350        | 800        | 325   | 475  | 180                       | 6         |
|                                   |                                                  | 2000 | 2670 | 800  | 1550 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 500        | 1200       | 400   | 700  |                           | 8         |
|                                   |                                                  | 3000 | 3670 | 1500 | 2550 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 650        | 1500       | 750   | 900  |                           | 14        |
|                                   |                                                  | 4000 | 4670 | 2000 | 3550 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 18        |
| <u>426</u><br>400                 | 1,6; 2,5                                         | 2000 | 2770 | 800  | 1550 | 150                                  | –   | –   | <u>150</u><br>576  | <u>363</u><br>352 | <u>445</u><br>290 | 500        | 1200       | 400   | 700  | 250                       | 6         |
|                                   |                                                  | 3000 | 3770 | 1500 | 2550 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 500        | 1500       | 750   | 900  |                           | 10        |
|                                   |                                                  | 4000 | 4770 | 2000 | 3550 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 14        |
|                                   |                                                  | 6000 | 6770 | 3000 | 5550 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 22        |
| <u>630</u><br>600                 | 1,6                                              | 2000 | 2910 | 800  | 1500 | 200                                  | 150 | 100 | <u>200</u><br>780  | <u>530</u><br>525 | <u>520</u><br>370 | 400        | 1200       | 400   | 700  | 300                       | 4         |
|                                   |                                                  | 3000 | 3910 | 1500 | 2500 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 500        | 1500       | 750   | 900  |                           | 8         |
|                                   |                                                  | 4000 | 4910 | 2000 | 3500 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 10        |
|                                   |                                                  | 6000 | 6910 | 3000 | 5500 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 18        |
| <u>–</u><br>800                   | 1,0                                              | 2000 | 3160 | 800  | 1450 | 250                                  | 200 | 150 | <u>250</u><br>966  | <u>627</u><br>622 | <u>630</u><br>420 | 400        | 1200       | 400   | 700  | 350                       | 4         |
|                                   |                                                  | 3000 | 4160 | 1500 | 2450 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 600        | 1500       | 750   | 900  |                           | 6         |
|                                   |                                                  | 4000 | 5160 | 2000 | 3350 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 8         |
|                                   |                                                  | 6000 | 7160 | 3000 | 5250 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 14        |
| <u>–</u><br>800                   | 1,6                                              | 2000 | 3190 | 800  | 1450 | 250                                  | 200 | 150 | <u>250</u><br>966  | <u>627</u><br>622 | <u>630</u><br>420 | 400        | 1200       | 400   | 700  | 350                       | 4         |
|                                   |                                                  | 3000 | 4190 | 1500 | 2450 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 600        | 1500       | 750   | 900  |                           | 6         |
|                                   |                                                  | 4000 | 5190 | 2000 | 3350 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 800        | 1800       | 1000  | 1000 |                           | 8         |
|                                   |                                                  | 6000 | 7190 | 3000 | 5250 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | 1500  | 1000 |                           | 14        |
| <u>–</u><br>1000                  | 0,6;<br>1,0                                      | 3000 | 4260 | 1500 | 2350 | 300                                  | 200 | 150 | <u>300</u><br>1166 | <u>729</u><br>722 | <u>685</u><br>500 | 400        | 1500       | –     | 900  | 520                       | 6         |
|                                   |                                                  | 4000 | 5260 | 2000 | 3350 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 600        | 1800       | –     | 1000 |                           | 8         |
|                                   |                                                  | 6000 | 7260 | 3000 | 5350 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | –     | 1000 |                           | 10        |
| <u>–</u><br>1000                  | 1,6                                              | 3000 | 4260 | 1500 | 2350 | 300                                  | 200 | 150 | <u>300</u><br>1166 | <u>729</u><br>722 | <u>685</u><br>500 | 400        | 1500       | –     | 900  | 520                       | 6         |
|                                   |                                                  | 4000 | 5260 | 2000 | 3350 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 600        | 1800       | –     | 1000 |                           | 8         |
|                                   |                                                  | 6000 | 7260 | 3000 | 5350 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | –     | 1000 |                           | 10        |
| <u>–</u><br>1200                  | 0,6;<br>1,0                                      | 4000 | 5430 | 2000 | 3200 | 350                                  | 250 | 200 | <u>350</u><br>1366 | <u>831</u><br>822 | <u>756</u><br>620 | 700        | 1800       | –     | 1000 | 550                       | 6         |
|                                   |                                                  | 6000 | 7430 | 3000 | 5200 |                                      |     |     |                    |                   |                   | 1200       | 1800       | –     | 1000 |                           | 8         |

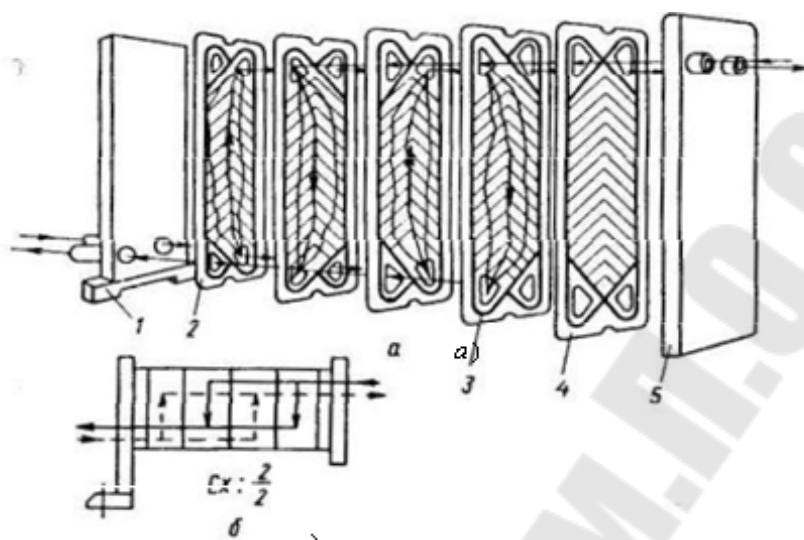


Рис. П.5.1. Схема движения теплоносителей (а) и условная схема компоновки пластин (б) в однопакетном разборном пластинчатом теплообменнике:

1 – неподвижная плита; 2 – теплообменная пластина;  
3 – прокладка; 4 – концевая пластина; 5 – подвижная плита

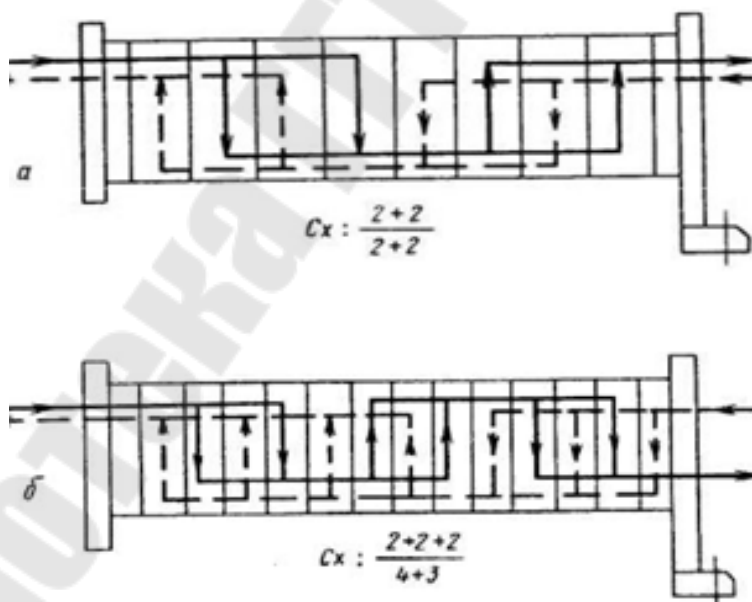


Рис. П.5.2. Примеры компоновки пластин:

а – симметричная двухпакетная схема; б – несимметричная схема  
(три пакета для горячего теплоносителя, два – для холодного)

Таблица П.5.1

**Техническая характеристика и основные параметры пластинчатых теплообменных аппаратов**

| Показатель                                                                                                                   | Тип пластины          |                       |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|
|                                                                                                                              | 0,3р                  | 0,6р                  | 0,5Пр                         |
|                                                                                                                              | Тип аппарата          |                       |                               |
|                                                                                                                              | разборный             |                       | полуразборный                 |
| Расход теплоносителя (не более), м <sup>3</sup> /ч                                                                           | 50                    | 200                   | 200                           |
| Номинальная площадь поверхности теплообмена аппарата, м <sup>2</sup> ,<br>и исполнение на раме:<br>консольной (исполнение 1) | От 3 до 10            | От 10 до 25           | —                             |
| двухопорной (исполнение 2)                                                                                                   | От 12,5 до 25         | От 31,5 до 160        | От 31,5 до 140                |
| трехопорной<br>с промежуточной плитой<br>(исполнение 3)                                                                      | —                     | От 200 до 300         | От 160 до 320                 |
| Расчетное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )                                                                               | 1(10)                 | 1(10)                 | 1,6(16)<br>2,5(25)            |
| Габарит теплообменников, мм                                                                                                  | 650 x 400 x<br>x 1665 | 605 x 750 x<br>x 1800 | 2570 x 650 x<br>x 1860 (3500) |

Таблица П.5.2

**Техническая характеристика пластин**

| Показатель                                             | Тип пластины   |                |                |
|--------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                        | 0,3р           | 0,6р           | 0,5Пр          |
| Габариты (длина x ширина x<br>x толщина), мм           | 1370 x 300 x 1 | 1375 x 600 x 1 | 1380 x 650 x 1 |
| Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>                | 0,3            | 0,6            | 0,5            |
| Вес (масса), кг                                        | 3,2            | 5,8            | 6,0            |
| Эквивалентный диаметр канала, м                        | 0,008          | 0,0083         | 0,009          |
| Площадь поперечного сечения<br>канала, м <sup>2</sup>  | 0,0011         | 0,00245        | 0,00285        |
| Смачиваемый периметр<br>в поперечном сечении канала, м | 0,66           | 1,188          | 1,27           |
| Ширина канала, мм                                      | 150            | 545            | 570            |
| Зазор для прохода рабочей среды<br>в канале, мм        | 4              | 4,5            | 5              |
| Приведенная длина канала, м                            | 1,12           | 1,01           | 0,8            |

Окончание табл. П.5.2

| Показатель                                                                             | Тип пластины                   |                              |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                                                                        | 0,3p                           | 0,6p                         | 0,5Pr                        |
| Площадь поперечного сечения коллектора (угловое отверстие на пластине), м <sup>2</sup> | 0,0045                         | 0,0243                       | 0,0283                       |
| Наибольший диаметр условного прохода присоединяемого штуцера, мм                       | 65(80)                         | 200                          | 200                          |
| Коэффициент общего гидравлического сопротивления                                       | <u>19,3</u> Re <sub>0,25</sub> | <u>15</u> Re <sub>0,25</sub> | <u>15</u> Re <sub>0,25</sub> |
| Коэффициент гидравлического сопротивления штуцера                                      | 1,5                            | 1,5                          | 1,5                          |

Таблица П.5.3

### Характеристики прокладок для пластин

| Условное обозначение прокладок | Марка материала и технические условия | Каучуковая основа                                  | Температура рабочей среды, °С |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
| 0                              | Резина 359 (ТУ 38-1051023-89)         | СКМС-30 и АРКМ-15 (бутадиенметилстирольный каучук) | От –20 до +80                 |
| 1                              | Резина 4326-Г (ТУ 38-1051023-89)      | СКН-18 (бутадиеннитрильный каучук)                 | От –30 до +100                |
| 2                              | Резина 51-3042 (ТУ 38-1051023-89)     | СКЭПТ (этиленпропилендиеновый каучук)              | До 150                        |
| 3                              | Резина 51-1481 (ТУ 38-1051023-89)     | СКЭП (этиленпропилендиеновый каучук)               | До 150                        |
| 4                              | Резина ИРП-1225 (ТУ 38-1051023-89)    | СКФ-32 и ИСКФ-26 (фторированный каучук)            | От –30 до +200                |

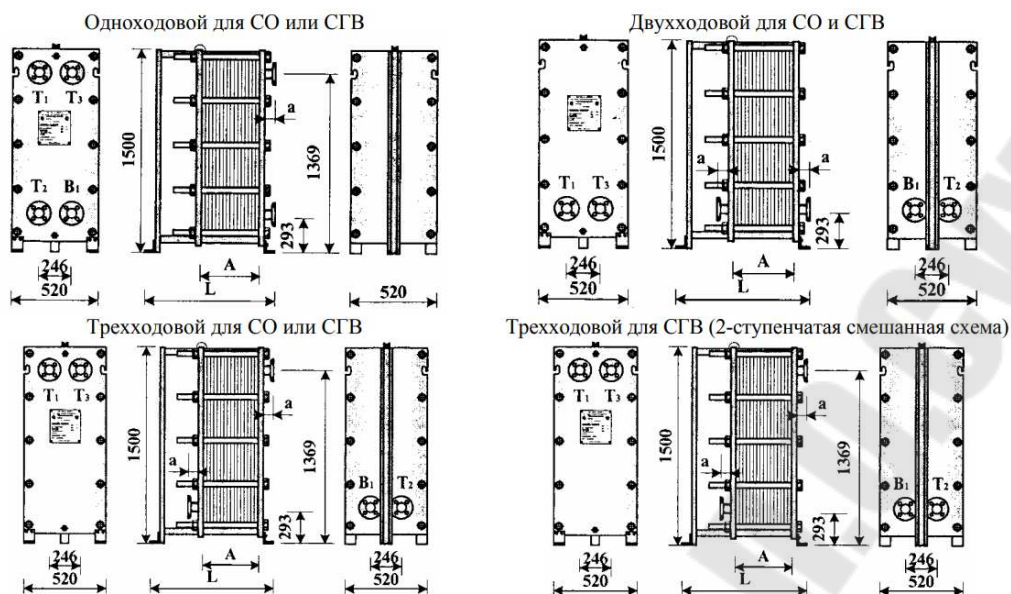


Рис. П.5.3. Общий вид, габаритные и присоединительные размеры пластинчатых теплообменников ТАР-0,4

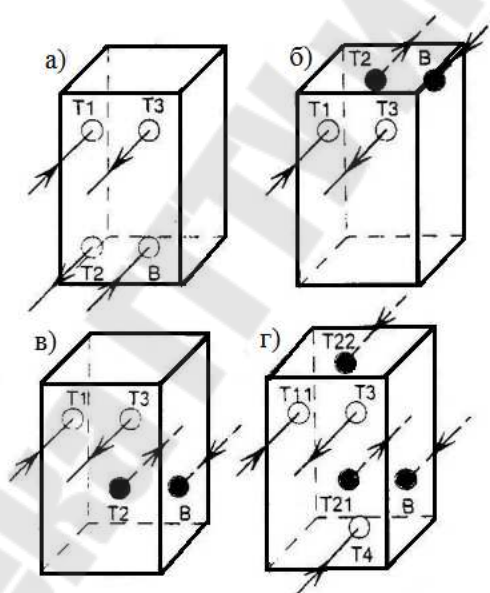


Рис. П.5.4. Схемы обвязки пластинчатых теплообменников:

*а* – одноходовой теплообменник; *б* – двухходовой теплообменник;

*в* – трехходовой теплообменник; *г* – трехходовой теплообменник для блока горячего водоснабжения:

T1, T11 – вход греющей воды из тепловой сети;

T2, T21 – выход греющей воды в тепловую сеть; T22 – вход обратной воды, поступающей в теплообменник из системы отопления;

T3 – выход нагретой воды, поступающей в систему горячего водоснабжения;

T4 – вход циркуляционной воды, поступающей из системы горячего водоснабжения; B – вход холодной водопроводной воды

Таблица П.5.4

**Габаритные и присоединительные размеры, масса теплообменников  
ТАР-0,4**

| Площадь, м <sup>2</sup> | L, мм | A, мм          | Масса, кг | Площадь, м <sup>2</sup> | L, мм | A, мм          | Масса, кг |
|-------------------------|-------|----------------|-----------|-------------------------|-------|----------------|-----------|
| св. 30 до 34            | 1080  | См. примечание | 760       | св. 96 до 98            | 2120  | См. примечание | 1205      |
| св. 34 до 38            | 1145  |                | 790       | св. 98 до 100           | 2185  |                | 1220      |
| св. 38 до 42            | 1210  |                | 815       | св. 100 до 102          | 2185  |                | 1230      |
| св. 42 до 46            | 1275  |                | 845       | св. 102 до 104          | 2250  |                | 1245      |
| св. 46 до 50            | 1340  |                | 870       | св. 104 до 106          | 2250  |                | 1260      |
| св. 50 до 54            | 1405  |                | 900       | св. 106 до 108          | 2315  |                | 1275      |
| св. 54 до 58            | 1470  |                | 925       | св. 108 до 110          | 2315  |                | 1290      |
| св. 58 до 62            | 1535  |                | 955       | св. 110 до 112          | 2380  |                | 1305      |
| св. 62 до 66            | 1600  |                | 980       | св. 112 до 114          | 2380  |                | 1315      |
| св. 66 до 70            | 1665  |                | 1010      | св. 114 до 116          | 2445  |                | 1330      |
| св. 70 до 74            | 1730  |                | 1035      | св. 116 до 118          | 2445  |                | 1345      |
| св. 74 до 78            | 1795  |                | 1065      | св. 118 до 120          | 2510  |                | 1360      |
| св. 78 до 82            | 1860  |                | 1090      | св. 120 до 122          | 2510  |                | 1370      |
| св. 82 до 86            | 1925  |                | 1120      | св. 122 до 124          | 2575  |                | 1385      |
| св. 86 до 90            | 1990  |                | 1145      | св. 124 до 126          | 2575  |                | 1400      |
| св. 90 до 92            | 2055  |                | 1160      | св. 126 до 128          | 2640  |                | 1410      |
| св. 92 до 94            | 2055  |                | 1175      | св. 128 до 130          | 2640  |                | 140       |
| св. 94 до 96            | 2120  |                | 1190      | —                       | —     |                | 1205      |

*Примечание.* A – длина пакета пластин, мм,  $A = 3,45N$ , где N – количество пластин, шт.,  $N = F/0,4$ , где F – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>.

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Овсянник Анатолий Васильевич**  
**Макеева Екатерина Николаевна**

## **ТЕПЛОМАССООБМЕН**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор  
Компьютерная верстка

*Н. Г. Мансурова*  
*И. П. Минина*

Подписано в печать 23.03.26.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,1.

Изд. № 27.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого.  
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя  
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.  
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель