

Научная статья

Original article

УДК 332.05

doi: 10.55186/2413046X\_2022\_7\_10\_612

**ВЫБОР ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ  
SELECTING A HEAT EXCHANGER TO INCREASE THE HEAT  
TRANSFER COEFFICIENT**



**Ермолаева Вера Анатольевна**, кандидат химических наук, доцент,  
Муромский институт (филиал) Владимирского государственного  
университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Муром

**Ermolaeva Vera Anatolievna**, Murom Institute (branch) Vladimir state  
University named A. G. and N. G. Stoletovs, Murom, Russia

**Аннотация.** В работе представлен подробный анализ основных типов теплообменных аппаратов с учетом их преимуществ и недостатков, обсуждается проблема выбора наиболее эффективного теплообменного аппарата, рассмотрены основные способы повышения коэффициента теплопередачи, выбран и рассчитан двухтрубный теплообменный аппарат типа «труба в трубе», имеющий оптимальную скорость транспортировки теплоносителя и простоту изготовления и ухода. Выполнен расчет теплообменного аппарата для обеспечения необходимой теплопередачи, осуществления теплообменного процесса, повышения коэффициента теплопередачи. Определены количества передаваемого тепла и расхода пара. Рассчитана поверхность теплообмена и число секций.

**Abstract.** The paper presents a detailed analysis of the main types of heat exchangers, taking into account their advantages and disadvantages, discusses the problem of choosing the most efficient heat exchanger, considers the main ways to increase the heat transfer coefficient, selects and calculates a two-tube heat exchanger of the "pipe in a pipe" type, which has an optimal speed of heat transfer and ease of manufacture and maintenance. The calculation of the heat exchanger is performed to ensure the necessary heat transfer, the implementation of the heat exchange process, and the increase in the heat transfer coefficient. The amounts of heat transferred and the steam consumption are determined. The heat transfer surface and the number of sections are calculated.

**Ключевые слова:** теплообменные аппараты, коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена.

**Keywords:** heat exchangers, heat transfer coefficient, heat transfer surface.

### **Введение**

Теплообменные аппараты широко применяются в химических технологиях для осуществления теплообмена между двумя теплоносителями с целью нагрева (подогреватели) или охлаждения одного из них (холодильники). К конструкции теплообменных аппаратов предъявляются определенные требования: простой, удобный монтаж и ремонт, высокая тепловая производительность, экономичность, обеспечение заданных технологических условий процесса, простота конструкции, компактность, современный технический и эстетический дизайн, длительный срок службы. Особенные требования предъявляются к обеспечению надёжности работы аппаратов, к возможности автоматического регулирования технологических параметров и аварийного отключения в случае внештатных ситуаций.

В качестве греющего агента в теплообменных аппаратах наиболее часто используют насыщенный водяной пар, который имеет следующие достоинства: высокий коэффициент теплоотдачи, большое количество тепла, выделяемое при конденсации пара, равномерность нагрева (конденсация

пара происходит при постоянной температуре), легкое регулирование нагрева [1,2].

### **Анализ типов теплообменных аппаратов**

1. Пластинчатые теплообменники состоят из отдельных пластин, изготовленных из тонколистовой стали толщиной 0,5 - 0,6 мм, двух концевых камер. Чтобы увеличить поверхность теплообмена и турбулизацию потока теплоносителя проточную часть пластин изготавливают гофрированной или ребристой. Для герметизации к пластинам приклеивают резиновые уплотнения. Достоинства такого типа теплообменных аппаратов: интенсивный теплообмен, простота изготовления, компактность, малое гидравлическое сопротивление, удобство монтажа и очистки от загрязнений. Передвижение теплоносителя происходит прямотоком, противотоком или смешанно. Ограничения: поверхность теплообмена 1-360 м<sup>2</sup>, число пластин 5-603, температура теплоносителя не выше 150°С, давление не выше 25 кгс/см<sup>2</sup>.

2. Витые теплообменники состоят из концентрических змеевиков, составляющих поверхность нагрева, заключенных в кожух. Теплоноситель может перемещаться или по трубному или по межтрубному пространству. Теплообменники такого типа используются при высоком давлении для разделения газовых смесей методом глубокого охлаждения, выдерживают деформации от температурных напряжений [3].

3. Спиральные теплообменники, в которых поверхность нагрева образована тонкими металлическими листами, свернутыми спиралью. Для уплотнения каналы с одной стороны завариваются, а с другой стороны уплотняются плоской прокладкой. Такой вид уплотнения исключает смешивание теплоносителей, дает возможность легко очищать каналы, а также при повреждении прокладки наружу просачиваться только один теплоноситель. Достоинства: компактность, малое гидравлическое сопротивление, значительная интенсивность теплообмена при повышенных

скоростях передвижения теплоносителей. Недостатки: сложность производства и ремонта, давление не выше  $10 \text{ кгс/см}^2$ .

4. Кожухотрубчатые теплообменники, состоящие из пучков труб, трубных решеток, корпуса, крышки, патрубков. Для интенсификации теплообмена и ускорения движения теплоносителя часто устанавливаются перегородки в трубном или межтрубном пространстве. Аппараты такого типа изготавливаются вертикальными, горизонтальными или наклонными. Кожухотрубчатые теплообменники жесткой конструкции отличаются простотой устройства и используются при сравнительно небольшой разности температуры корпуса и пучка труб. Аппараты нежесткой конструкции содержат пучок U-образных труб, подвижную трубную решетку, что предусматривает возможность небольшого независимого движения теплообменных труб и корпуса с целью устранения напряжений от температурных деформаций. Аппараты полужесткой конструкции имеют специальные компенсаторы, закрепленные на корпусе, которые надежно обеспечивают компенсацию температурных удлинений, не превышающих 11-15 мм, при давлении не выше  $2,5 \text{ кгс/см}^2$  [4].

5. Двухтрубные аппараты типа «труба в трубе» имеют значительную поверхность нагрева, состоят из ряда секций, которые параллельно соединены коллекторами. Теплоноситель - насыщенный пар - направляют в межтрубное пространство. Для обеспечения необходимой скорости и достижения высокой интенсивности теплообмена подбирают диаметры внутренней и наружной труб. Достоинства: высокий коэффициент теплопередачи, нагрев или охлаждение газов или жидкостей при высоком давлении, простота конструкции, монтажа и обслуживания. Недостатки: большие габариты, высокая стоимость из-за большого расхода металла на наружные трубы, трудоемкость очистки кольцевого пространства.

6. Графитовые теплообменники незаменимы на некоторых производствах благодаря высокой коррозионной стойкости и хорошей

теплопроводности графита. Возможно использование блочных, кожухотрубчатых, оросительных теплообменников и погружных теплообменных элементов. Так, блочный графитовый теплообменник состоит из прямоугольных или цилиндрических блоков, которые имеют две системы перпендикулярных отверстий для перекрестной схемы движения теплоносителей. Для каждой системы отверстий предусмотрены графитовые крышки для ввода и вывода веществ [5,6].

7. Элементные (или секционные) теплообменники, состоящие из последовательно соединенных секций. Достоинства: могут применяться при высоком давлении, при движении теплоносителей с соизмеримыми скоростями без изменений агрегатных состояний, поверхность теплообмена одной секции 0,75-30 м<sup>2</sup>, число трубок 4-140. Гидравлические сопротивления снижаются и загрязнение межтрубного пространства уменьшается благодаря отсутствию перегородок. Недостатки: менее компактны, чем кожухотрубчатые аппараты, и более дороги, т.к. число дорогостоящих элементов аппарата (трубы решеток, фланцевые соединения, компенсаторы) увеличивается.

8. Погружные теплообменники, состоящие из плоских или цилиндрических змеевиков, погруженных в жидкую рабочую среду, используются, если жидкая среда кипит или содержит механические включения, или если необходимо применение поверхности нагрева из специальных материалов (свинца, керамики), для которых форма змеевика наиболее приемлема. Недостатки: малая скорость омывания жидкой средой, низкая теплоотдача снаружи змеевика, недостаточно эффективны.

9. Оросительные теплообменники - ряд прямых труб, расположенных одна под другой, орошаемых снаружи водой. Применяются как холодильники для жидкостей и газов или как конденсаторы, когда не требуется высокая производительность, при охлаждении химически агрессивных сред, когда применяется поверхность нагрева из специальных

веществ. Вода, которая орошает трубы, равномерно подается сверху, частично испаряется, поэтому расход ее довольно небольшой. Недостатки: довольно громоздкие аппараты; низкая интенсивность теплообмена, но простые в изготовлении и обслуживании [7,8].

10. Ребристые теплообменники с увеличенной теплообменной поверхностью за счет оребрения, широко применяются в сушильных установках, отопительных системах и в качестве экономайзеров, при нагревании воздуха и газовых смесей паром. При изготовлении важно рациональное размещение ребер и их плотное соприкосновение с основной трубой.

Наиболее распространены в химических технологиях кожухотрубчатые теплообменники: их доля составляет более 80% от общего количества применяемой теплообменной аппаратуры.

### **Исследование и выбор теплообменного аппарата**

При исследовании теплообменного аппарата необходимо:

- изучить физико-химические основы процесса теплообмена;
- представить описание работы и подробную технологическую схему теплообменного аппарата;
- рассмотреть вопросы техники безопасности при эксплуатации и охраны окружающей среды [9];
- рассчитать тепловой и гидравлический баланс данного аппарата.

В теплообменных аппаратах передача теплоты от одной среды к другой через разделяющую их стенку является сложным процессом, который делится на три вида: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение, которые существуют одновременно в разных сочетаниях. Необходимо интенсифицировать тепловые процессы, повышая эффективность работы аппаратов, снижая расход тепловой энергии за счет оптимизации технологически процессов. Основные способы повышения коэффициента теплопередачи:

- Правильно выбирать теплообменный аппарат;
- Обеспечить турбулентный режим движения теплообменных сред;
- Заменять свободную конвекцию на принудительную;
- Своевременно и полно отводить конденсат и несконденсированные пары;
- Оптимизировать форму и размеры продуктов, подвергающихся теплообмену;
- Снижать термическое сопротивление стенок аппарата (удаление накипи и пригара);

Процессы теплообмена играют огромную роль в химической, энергетической, металлургической, пищевой и многих других отраслях промышленности [10].

### **Расчет двухтрубного теплообменного аппарата**

В данной работе выбран и рассчитан двухтрубный теплообменный аппарат типа «труба в трубе», имеющий оптимальную скорость транспортировки теплоносителя и простоту изготовления и ухода. Это позволяет без проблем проводить регулярную чистку устройства, которая положительно влияет на продолжительность его службы. Величины сечения внутренней трубы и кольцевого зазора имеют небольшие значения, скорости движения теплоносителей достигают 3 м/с, увеличивается коэффициент теплопередачи, поверхность нагрева значительна, образование накипи напротив замедляется [2,8]. Недостаток – увеличение расхода металла при изготовлении. При перемещении жидкостей внутри теплообменного аппарата значения температуры их изменяются: горячая жидкость остывает, а холодная нагревается. Параметры изменения температур жидкостей зависят от особенностей их передвижения: прямоточного (жидкости двигаются в одном направлении), противоточного (жидкости двигаются в противоположном друг другу направлении), перекрестного (жидкости двигаются перекрестно).

Выполнен технологический расчет теплообменного аппарата «труба в трубе» по следующим исходным данным: нагреваемая жидкость передвигается по внутренней стальной трубе -  $\lambda_c = 70 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ ; диаметр -  $d_1/d_2 = 50/42 \text{ мм}$ ; температура на входе -  $t_{\text{ж}}^1 = 25\text{°C}$ ; температура на выходе -  $t_{\text{ж}}^n = 90\text{°C}$ ; количество нагреваемой жидкости 2500 кг/ч [2]. В кольцевом межтрубном канале происходит конденсация пара, в результате чего жидкость, находящаяся в трубе нагревается. Теплообменник расположен горизонтально, имеет длину каждой секции  $L = 2 \text{ м}$ .

В основе теплового расчета выбранного теплообменного аппарата находится совместное решение уравнений теплового баланса и теплопередачи. При решении первого уравнения определяется величина тепла, необходимая для расхода при тепловом процессе, и величины расхода теплоносителей. При решении второго уравнения определяется величина поверхности теплообмена, нужная для проведения теплового процесса [4].

Определены количества передаваемого тепла и расхода пара. Поскольку агрегатное состояние не изменяется, воспользуемся формулой:

$$\Delta h_2 = C_{p2} \cdot (t_{\text{ж}}'' - t_{\text{ж}}'),$$

где  $C_{p2}$  - средняя удельная теплоемкость жидкого теплоносителя в интервале температур от  $t_{\text{ж}}^n$  до  $t_{\text{ж}}'$  Дж/кг·°C;  $t_{\text{ж}}''$  и  $t_{\text{ж}}^1$  - начальная и конечная температуры теплоносителя, °C.

Расход греющего пара рассчитывался по формуле:

$$M_1 = \frac{M_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_{\text{ж}}'' - t_{\text{ж}}')}{(h'' - h')},$$

где  $h''$ ,  $h^1$  - соответственно, энтальпии греющего пара и конденсата, Дж/кг.  $h'' = 2768,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ ,  $h^1 = 719,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$

$$M_1 = \frac{2500 \cdot 4182,1 \cdot (95 - 25)}{(2768,1 - 719,3) \cdot 10^3} = 357,2 \text{ кг/час}$$

$$Q = M_1 \cdot \Delta h_1 = \frac{357,2}{3600} \cdot (2768,1 - 719,3) \cdot 10^3 = 203,2 \text{ кВт}$$

Поверхность теплообмена, нужная для проведения теплопередачи, рассчитывается по формуле [2]:



$$Q = K \cdot \Delta t_{cp} \cdot F,$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t_{cp}$  - среднее изменение температуры,  $^\circ\text{C}$ ;  $F$  - поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ .

Соответственно:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}},$$

Параметры зависимости при расчете среднего изменения температуры определяется противоточным направлением движения взаимодействующих в тепловом процессе жидкостей. Вычисленная  $\Delta t_{cp} = 126,8^\circ\text{C}$

Поскольку выбранный теплообменный аппарат имеет тонкостенные трубы и соотношение диаметров менее 1,5, воспользуемся формулой для расчета коэффициента теплопередачи через плоские стенки [4]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\lambda_c$  - коэффициент теплопроводности материала трубы;  $\delta_c$  - толщина стенки трубы 4 мм;  $\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стенке (вычисленный  $7432 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );  $\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от стенки к движущейся жидкости (вычисленный  $3246 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );.

Вычисленные величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  используются при расчете коэффициента теплопередачи  $K$ .

$$K = \frac{1}{\frac{1}{7432} + \frac{0,004}{70} + \frac{1}{3246}} = 1996 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

По полученным данным рассчитана поверхность теплообмена:  $1,802 \text{ м}^2$ . Определено число секций, равное четырем. Таким образом, выполнен расчет теплообменного аппарата для обеспечения необходимой теплопередачи, осуществления теплообменного процесса, повышения коэффициента теплопередачи.

### Список литературы

1. Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Теплообменное оборудование предприятий, учебное пособие, Санкт-Петербург, 2016. - 184. с.

2. 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.
3. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др.; под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Сократ, 2003. - 986 с.
4. Мухленов И. П. Расчеты химико-технологических процессов [Электронный ресурс] - URL: <https://freedocs.xyz/view-ocs.php?pdf=442039732>
5. Мухленов И.П. Общая химическая технология. Портал научно-технической информации [Электронный ресурс] - URL: <http://nglib.ru/annotation.jsp?book=014935>
6. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии, М.: Химия. - [Электронный ресурс] - URL: <http://padaread.com/?book=13794>
7. Захарова А. А. Процессы и аппараты химической технологии., - М.: Издательский центр «Академия», 2016. – 528 с.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия. - [Электронный ресурс] - URL: <https://www.twirpx.com/file/947001/>
9. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. [Электронный ресурс] - URL: <http://bookre.org/reader?file=541321>

### References

1. Ivanov A.N., Belousov V.N., Smorodin S.N. Teploobmennoe oborudovanie predpriyatij, uchebnoe posobie, Sankt-Peterburg, 2016. - 184. s.
2. Savel`ev N.I. Raschet i proektirovanie kozhuxotrubchaty`x teploobmenny`x apparatov: ucheb. posobie / N.I. Savel`ev, P.M. Lukin. – Cheboksary`: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2010. - 80 s.

3. Teploobmenniki e`nergeticheskix ustanovok: uchebnik dlya vuzov / K.E`. Aronson, S.N. Blinkov, V.I. Brezgin i dr.; pod red. Yu.M. Brodova. – Ekaterinburg: Sokrat, 2003. - 986 s.
4. Muxlenov I. P. Raschety` ximiko-texnologicheskix processov [E`lektronny`j resurs] - URL: <https://freedocs.xyz/view-ocs.php?pdf=442039732>
5. Muxlenov I.P. Obshhaya ximicheskaya texnologiya. Portal nauchno-texnicheskoy informacii [E`lektronny`j resurs] - URL: <http://nglib.ru/annotation.jsp?book=014935>
6. Gel`perin N. I. Osnovny`e processy` i apparaty` ximi`cheskoj texnologii, M.: Ximiya. - [E`lektronny`j resurs] - URL: <http://padaread.com/?book=13794>
7. Zaxarova A. A. Processy` i apparaty` ximicheskoy texnologii., - M.: Izdatel`skij centr «Akademiya», 2016. – 528 s.
8. Kasatkin A.G. Osnovny`e processy` i apparaty` ximicheskoy texnologii / A.G. Kasatkin. – M.: Ximiya. - [E`lektronny`j resurs] - URL:: <https://www.twirpx.com/file/947001/>
9. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery` i zadachi po kursu processov i apparatov ximicheskoy texnologii. [E`lektronny`j resurs] - URL: <http://bookre.org/reader?file=541321>

**Для цитирования:** Ермолаева В.А. Выбор теплообменного аппарата для повышения коэффициента теплопередачи // Московский экономический журнал. 2022. № 10. URL: <https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-10-2022-48/>

© Ермолаева В.А, 2022. Московский экономический журнал, 2022, № 10.