

УДК 66.045.001:536.423.4

Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П., Капустенко П.А., Хавин Г.Л.

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ПЛАСТИНЧАТЫХ ПАРОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

Стратегия энергосбережения предусматривает разработку и внедрение высокоэффективного теплообменного оборудования, в том числе и использующую энергию пара. Пластинчатые паровые теплообменники получили достаточно широкое распространение в различных областях промышленности, благодаря своим высоким тепловым характеристикам, простотой обслуживании и эксплуатации. Установка таких аппаратов требует на стадии проектирования учитывать специфику их эксплуатации. К этим факторам можно отнести наличие высокого КПД теплообменных пластинчатых аппаратов и необходимость регулирования давления пара. Кроме того, существуют достаточно важные моменты при проектировании, связанные с деаэрацией поверхности нагрева, отвода конденсата и установка конденсатоотводчиков, дренажа паропроводов, высушивания пара и т.д. Применение пластинчатых теплообменников, использующих в качестве теплоносителя пар, требует, в свою очередь, создания достоверных и надежных методик расчета в широком диапазоне тепловых нагрузок и температур, а также тщательное обоснование и прогнозирование эксплуатации таких аппаратов в промышленности и коммунальной энергетике.

Для расчета пластинчатых теплообменников, использующих конденсацию пара, разработана методика и математическое обеспечение [1,2]. Благодаря своей эффективности пластинчатые теплообменники находят все более широкое применение в процессах конденсации хладагентов, в частности в аммиачных холодильных установках. Обзор работ по проблемам конденсации хладагентов можно найти в [3]. Применительно к аммиаку, в [4] представлены две серии экспериментов с высоким ( $60^\circ$ ) и низким ( $30^\circ$ ) значением угла наклона гофр. Показано, что пластины с низким углом наклона гофры дают более высокий коэффициент теплопередачи, чем с углом  $60^\circ$ . В [5] приведены результаты по конденсации и аммиака для различных типов пластин теплообменников. Коэффициент теплопередачи получился от 1,5 до 4 раз больше, чем для сравниваемой гладкой трубы. Аналогичные исследования и результаты приведены в [6] для конденсации хладагентов в компактных паяных теплообменниках.

При использовании пластинчатого парового теплообменника, как и других типов теплообменных аппаратов, работающих на паре, существуют несколько методов регулирования, применение которых зависит от конкретных условий работы теплообменника. К факторам, определяющим выбор того или иного метода регулирования, прежде всего, необходимо отнести: тип, параметры и конструкцию пластинчатого теплообменника; давление пара, поступающего в теплообменный аппарат; общее обратное давление на выходе конденсата из теплообменника; какой из параметров – расход пара или разность выходной и входной температуры нагреваемого теплоносителя изменяется во время работы. Выбор метода регулирования работы парового пластинчатого теплообменника зачастую во многом определяет эффективность его эксплуатации.

Целью настоящей работы является разработка методики проектирования и моделирование работы пластинчатого аппарата с регулированием, а именно решение двух задач:

- подбор теплообменника данной марки, с заданной из технических условий, площадью конденсации по длине пластины (не менее 50 %),
- расчет теплообменного аппарата с заданной температурой выходящего из теплообменника конденсата.

Решение этих задач дает возможность значительно расширить область применения паровых пластинчатых аппаратов для различных условий эксплуатации и упростить их выбор. Это также позволяет моделировать работу вспомогательного оборудования, обеспечивающего функционирование теплообменника в автоматическом режиме, и просчитать работу аппарата в переходных режимах.

Главной особенностью конденсации в каналах паровых пластинчатых теплообменников является тот факт, что движение пара сверху вниз приводит к тому, что пленка конденсата внизу всегда плотнее и теплообмен ухудшается. Преимуществом такого процесса является снижение опасности гидравлического удара для паровых регулируемых пластинчатых теплообменников. Конденсат находится при температуре, которая ниже чем температура, соответствующая давлению насыщенного пара. Это явление переохлаждения конденсата требует гарантированного его удаления из теплообменника, во избежание его застоя в нижней части каналов. В самом плохом варианте застой конденсата может привести к запиранию теплообменника. На практике происходит снижение коэффициента теплопередачи и сильное охлаждение конденсата. Иногда это явление используется для увеличения съема тепла, но чаще всего переохлаждение конденсата является следствием пленочной конденсации в каналах пластинчатого теплообменника.

Обычный способ регулирования температуры для имеющегося теплообменника заключается в установке клапана регулирования температуры на входе греющего потока. Регулирование осуществляется путем изменения перепада давления по нагреваемой стороне. Расчет парового теплообменника в этом случае производится с некоторым запасом поверхности. Правильно подобранный теплообменник имеет завышение поверхности не более 15 %.

Регулирование потока основного пара применяется, когда жестко фиксируется 100 % расход нагреваемого теплоносителя в процессе работы, т.е. теплообменник работает в режиме подогревателя. Поток пара (а значит и его давление) регулируется двухходовым регулирующим клапаном на подаче пара в теплообменник. Регулирующий сигнал на привод клапана подается датчиком, который установлен на выходной магистрали нагреваемого теплоносителя. Для удаления конденсата на выходе греющего теплоносителя из пластинчатого теплообменника устанавливается конденсатоотводчик. На рис. 1 представлена схема с регулированием потока основного пара. Такая схема регулирования нашла самое широкое распространение благодаря простоте исполнения и надежной работе. Основным ее технологическим преимуществом является быстрое реагирование на изменение тепловой нагрузки. К недостаткам относят тот факт, что при увеличении давления в конденсатной системе или резком изменении параметров нагреваемого теплоносителя может произойти запирание (остановка) теплообменника. Иногда, во избежание остановки теплообменника, применяется регулирование потока основного пара с активным отводом конденсата. В такой установке выход конденсата оборудуется автоматическим насосным конденсатоотводчиком или комбинацией насос, а затем установленный последовательно конденсатоотводчик.

Установленный замкнутый контур выравнивает давление внутри корпуса насоса и на выходе из теплообменника, что дает возможность конденсату вытекать из теплообменника к корпусу насоса. Когда давление на выходе из теплообменника больше,

чем обратное, то конденсат вытекает из теплообменного аппарата самотеком. Если давление на выходе конденсата ниже обратного, то включается насос и конденсат выкачивается. Такая схема, помимо гарантированного удаления конденсата, позволяет работать теплообменнику при низком давлении греющего пара и более высоком обратном давлении.

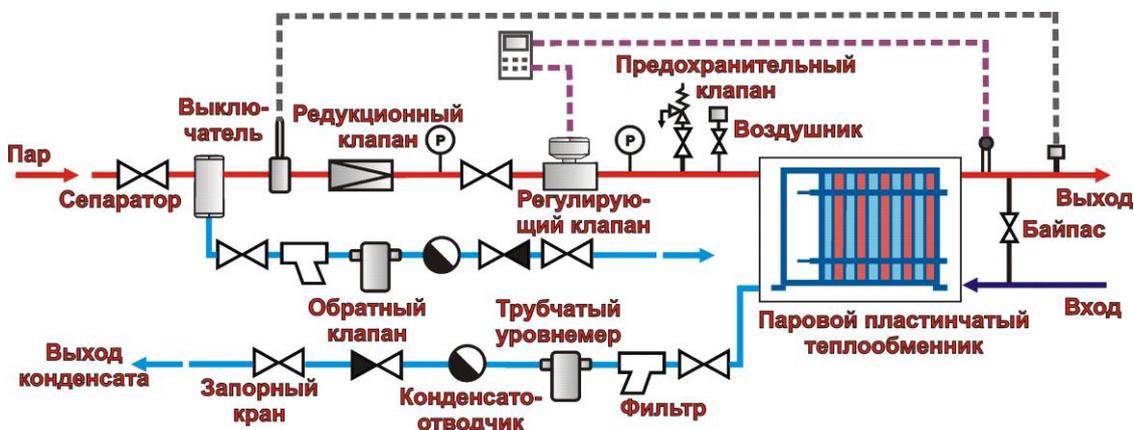


Рисунок 1 – Схема с регулированием расхода основного пара

Обычно установка насоса для принудительного удаления конденсата рекомендуется, когда по техническим условиям имеется низкая температура греющего теплоносителя, следовательно, и давление или же для понижения объема пара самоиспарения, полученного в конденсатной системе.

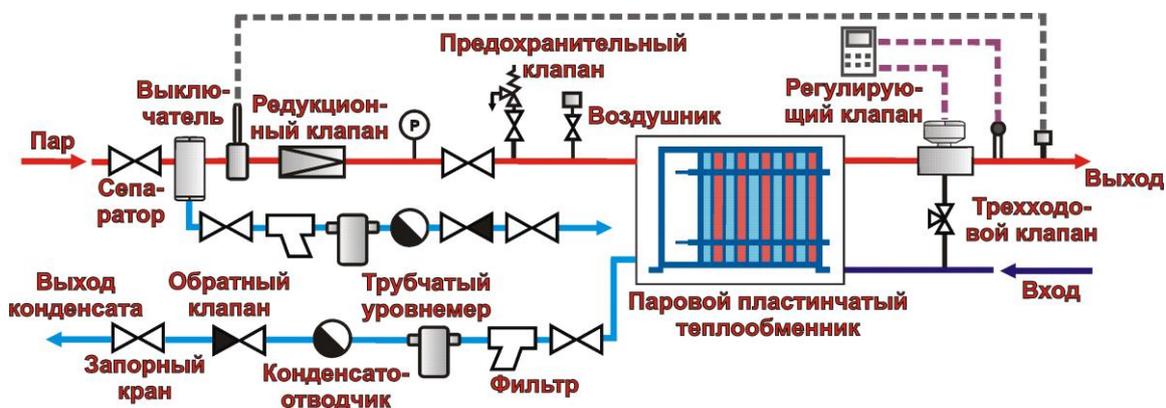


Рисунок 2 – Схема с установкой трехходового регулятора

При низком давлении греющего пара ( $< 0,1$  МПа) достаточно эффективным способом регулирования работы теплообменника является установка трехходового регулятора по стороне нагреваемого теплоносителя. На рис. 2 представлена схема с установкой трехходового регулятора. Трехходовой кран смешивает нагреваемый теплоноситель из подачи с нагретым потоком из теплообменника, обеспечивая требуемую конечную температуру на выходе. При этом в качестве греющего теплоносителя подается пар постоянного давления, что является одним из основных преимуществ данной схемы. К недостатку относят то, что нагреваемый теплоноситель в теплообменнике должен оставаться при давлении, необходимом для предотвращения кипения жидкости.

Если это вода, то нагреваемая сторона должна находиться при давлении, по меньшей мере, равном или желательнее большем, чем давление основного пара.

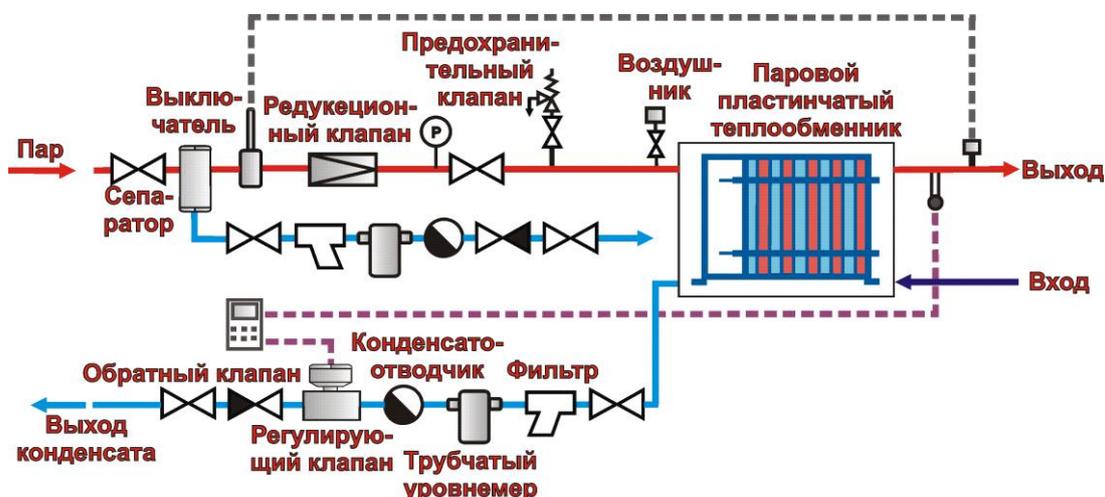


Рисунок 3 – Схема с установкой регулирующего клапана на выходе конденсата из теплообменника

На рис. 3 представлена схема с установкой регулирующего клапана на выходе конденсата из теплообменника для регулирования уровня конденсата внутри теплообменника. Работа клапана (его закрытие и открытие) изменяет уровень конденсата в теплообменном аппарате по высоте пластины. Обычно при расчетной нагрузке допускается уровень конденсата в пределах до 50 % от высоты пластины (поверхности теплообмена). Степень переохлаждения конденсата напрямую связана с величиной поверхности теплообмена.

Главными преимуществами такой схемы являются: уменьшение пара самоиспарения за счет переохлаждения конденсата; имеющееся постоянное давление защищает аппарат от остановки; используется регулирующий клапан меньшего типоразмера. Основным недостатком считается наличие некоторого запаздывания при изменении тепловой нагрузки по стороне нагреваемого теплоносителя. Данную схему рекомендуют применять, когда по стороне нагреваемого теплоносителя имеется стабильная большая тепловая нагрузка и давление пара не более 0,5 МПа, а также когда присутствие пара самоиспарения нежелательно.

Основу представленных методов регулирования составляет использование двухходового регулирующего клапана, который устанавливается либо на входе пара в пластинчатый теплообменник, либо на выходе конденсата. В первом случае он осуществляет изменение расхода и давления пара, поступающего в теплообменник, во втором регулирует уровень конденсата внутри аппарата.

Рассмотрим установку пластинчатых теплообменников в аммиачном холодильном цикле. Аммиак, с расходом 6220 кг/ч, поступает из компрессионного отделения с температурой 114 °С и давлением ~ 11 атм. на конденсацию. Выходная температура аммиака из теплообменного аппарата равна 28 °С, что практически совпадает с температурой насыщения при давлении 11 атм., равной 27,7 °С. Фактически проектируемый теплообменник работает на охлаждение газообразного аммиака. Предусмотрено охлаждение водой со средней температурой входа 25 °С и выхода 70 °С, с расходом ~ 6200 кг/ч. В результате расчета на эту позицию был выбран пластинчатый полусварной одноходовый теплообменный аппарат производства фирмы «Альфа Лаваль» марки

М15М, с компоновкой 31Н пластина по стороне аммиака и 30Н пластин по стороне охлаждающей воды. Потеря давления по стороне аммиака принималась не более 50 кПа.

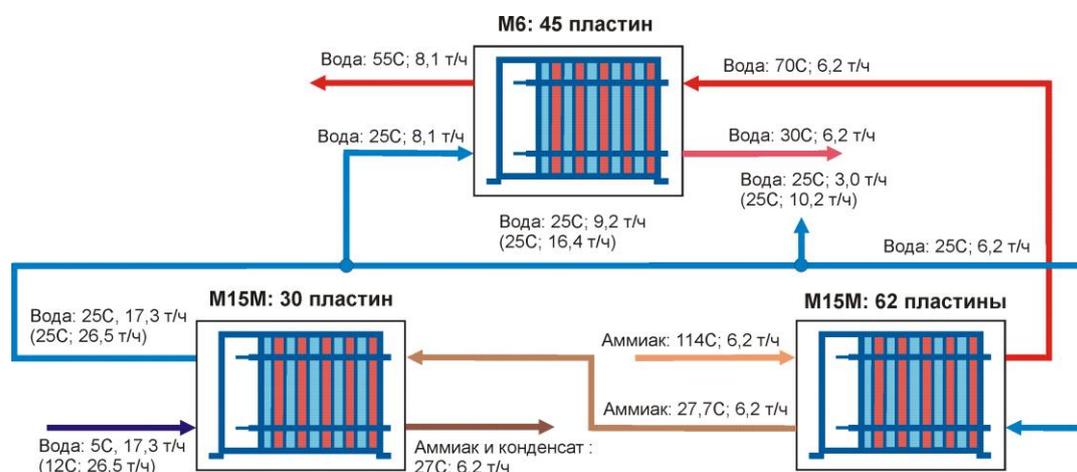


Рисунок 4 – Общая схема установки пластинчатых теплообменников для охлаждения аммиака

С другой стороны существует возможность получения дополнительной теплоты путем частичной 20 % конденсации имеющегося количества аммиака. Для этого используется водопроводная (в условиях зимы) или артезианская вода (в условиях лета). Вода нагревается с 5 °С до 25 °С в условиях зимы с расходом воды на конденсацию аммиака равным ~ 17300 кг/ч. В результате расчета получен теплообменный аппарат марки М15М, с компоновкой 14L пластин по стороне аммиака и 15L пластин по стороне охлаждающей воды. Потеря давления по стороне аммиака принималась не более 25 кПа. Для условий лета, когда используется артезианская вода с исходной температурой 12 °С, работает тот же теплообменный аппарат, но расход воды возрастает до 26600 кг/ч.

Нагретая в теплообменнике, конденсирующем аммиак, вода в количестве ~ 6200 кг/ч подается в теплообменник охлаждения газообразного аммиака, оставшаяся вода ~ 11100 кг/ч поступает на нужды горячего и холодного водоснабжения, как для технологического процесса производства сыра, так и на коммунальные услуги. На общей схеме установки теплообменников, представленной на рис. 4, в скобках указаны значений температуры и расхода в условиях летней эксплуатации.

В условиях зимы для приготовления 8100 кг/ч горячей воды (нагрев с 25 °С до 55 °С) запроектирован пластинчатый двухходовый теплообменник марки М6 с компоновкой 2×11МН по стороне греющего теплоносителя и 2×11МL по стороне нагреваемого. Потери давления не превышают 50 кПа. В качестве греющего теплоносителя используется вода из теплообменника охлаждения газообразного аммиака (рис. 4) с температурой 70 °С на входе и 30 °С на выходе из теплообменника. Оставшиеся 3000 кг/ч воды поступают на нужды холодного водоснабжения. В условиях летней эксплуатации, когда начальная температура охлаждающей воды поднимается до 12 °С количество воды на холодное водоснабжение увеличивается до 10200 кг/ч.

Таким образом, применение пластинчатых паровых теплообменников в процессах утилизации тепловой энергии является эффективным, как с точки зрения экономии тепловой энергии, так и простоты реализации, компактности и капиталовложений.

Особенно важным является возможность регулирования работы теплообменника, которая учитывается уже на стадии его проектирования.

Наиболее перспективным можно считать применение компактных пластинчатых паровых теплообменников с регулированием в качестве соединительного элемента между источником тепла и тепловым насосом, а также между тепловым насосом и теплоприемником в технологических процессах.

1. Пластинчатые теплообменники в промышленности / ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., КАПУСТЕНКО П. А., ХАВИН Г. Л., АРСЕНЬЕВА О. П. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2004. – 232 с

2. Arman B, Rabas T. Condensation Analysis for Plate and Frame Heat Exchangers, HTD-Vol 314, Natl. Heat Transfer Conf., vol. 12, pp.97-104, ASME, New York, 1995.

3. Palm B., Thonon B. Thermal and Hydraulic Performances of Compact Heat Exchangers for Refrigeration Systems, Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industry, ed. R.K. Shah, pp. 455-462, Begell House, New York, 1999.

4. Panchal C.B., Rabas T.J. Thermal Performance of Advanced Heat Exchanger for Ammonia Refrigeration Systems, Heat Transfer Eng., vol. 14, no. 4, pp.42-57, 1993.

5. Kumar H. The Design of plate Heat Exchangers for Refrigerants, Proc. Inst. Refrig., 1991-92.5-1, 1992.

6. Navarro J.M., Bailly A. Compact Brazed Plate Heat Exchangers, Heat Exchange Technology: Recent Developments, ed. C. Marvillet, pp. 276-283, Elsevier, Paris, France, 1994.

The support of European Community (Project SHERHPA, Contract № COLL-CT-2004-500229) is sincerely acknowledged.

УДК 66.045.001:536.423.4

ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., АРСЕНЬЄВА О.П., КАПУСТЕНКО П.О., ХАВІН Г.Л.

### **ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ І РЕГУЛЮВАННЯ ПЛАСТИНЧАСТИХ ПАРОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Розглянуто питання встановлення регулюючого клапану при проектуванні теплового пункту на базі парового пластинчастого теплообмінника. Наведено різні схеми встановлення двоходового регулюючого клапану. Що гарантують вивід конденсату і забезпечують роботу апарату без зупинки. У якості прикладу розглянуто встановлення парових теплообмінників у аміачному холодильному циклі, у тому разі і як утилізатора теплової енергії.