

**Путилин Ю.В., Пушкарева О.Б.**  
Уральский государственный лесотехнический университет,  
г. Екатеринбург

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

В транспортно-технологических комплексах применяется достаточно много теплообменного оборудования различных типов: типовые серийные энергетические паро-водяные и водо-водяные теплообменники, маслоохладители, используемые как для обслуживания и ремонта транспортной техники, так и для систем теплоснабжения соответствующих наземных сооружений. В настоящей статье на основании анализа наиболее применяемых конструкций теплообменников предлагаются более эффективные аппараты нового типа, имеющие лучшие теплогидравлические, массогабаритные и эксплуатационные характеристики.

*Ключевые слова:* теплообменное оборудование, горизонтально-трубные пленочные аппараты, интенсификация теплообмена, эффективность, теплоотдача.

**Putilin Ju.V., Pushkareva O.B.**  
Ural State Forest Engineering University,  
Ekaterinburg

## **ENCHANCING THE EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGE EQUIPMENT IN THE TRANSPORT-TECHNOLOGICAL COMPLEXES**

Heat exchange equipment of different types is sufficiently applied in the transport-technological complexes: standard serial energy steam-water and water-water heat exchangers, oil coolers, used for maintenance and repair of transport equipment as well as for heating system of the relevant ground facilities. More effective apparatuses of a new type, which have the best heating, hydraulic, weight, overall dimension and operational characteristics are presented in the article on the basis of the analysis of the most applied constructions of heat exchangers.

*Keywords:* heat exchange equipment, horizontal-tubes film apparatus, intensification of heat exchange, efficiency, heat transfer.

Анализ наиболее применяемых в транспортно-технологических комплексах типовых энергетических теплообменных аппаратов показывает, что в большинстве их используются морально и физически устаревшие конструкции и малоэффективные схемы проведения процессов теплообмена, характеризующиеся сравнительно низкой интенсивностью. К настоящему времени предложено много методов интенсификации теплообмена в этих аппаратах, направленных на совершенствование их отдельных элементов (например, трубных пучков и др.), но не затрагивающих принципиальных изменений в конструкции аппаратов и в технологических схемах проведения процесса теплопереноса.

В то же время известна достаточно отработанная (более 30 лет) в смежной области техники (термическом опреснении воды) технология, позволяющая повысить тепловую эффективность различного теплоэнергетического оборудования по сравнению с традиционными конструкциями. В настоящей статье рассмотрены основные принципиальные аспекты применения этой технологии в пароводяных и однофазных теплообменных аппаратах.

Типовая конструкция пароводяных теплообменников – кожухотрубные аппараты с вертикальными или горизонтальными трубными пучками. Конденсация пара происходит на наружной поверхности длиннотрубных пучков, а нагреваемая вода движется внутри труб, т.е. в трубном пространстве теплообменника, имеющем, как правило, несколько (2 – 4) ходов.

Причем, по данным теплотехнических испытаний в конденсаторах и подогревателях в большинстве случаев лимитирующей стадией общей теплопередачи «пар – жидкость» является конденсационная, интенсивность которой в среднем на 30 – 50% ниже, чем по водяной стороне аппарата. Величина коэффициентов теплоотдачи от водяного пара к стенке ( $\alpha_{\text{п}}$ ) составляет всего 6 – 8 кВт/(м<sup>2</sup>·К). Существенно повысить тепловую эффек-

тивность этого оборудования и сократить его гидравлическое сопротивление позволяет применение технологии горизонтально-трубных пленочных аппаратов (ГТПА). Характерной особенностью их является гравитационное течение пленки орошающей жидкости по наружной поверхности горизонтальных теплообменных труб и конденсация греющего пара внутри труб (рис. 1а). Для генерации пленки применяются оросительные устройства того или иного типа (на рис. 1 – перфорированный лист, устанавливаемый над трубным пучком).

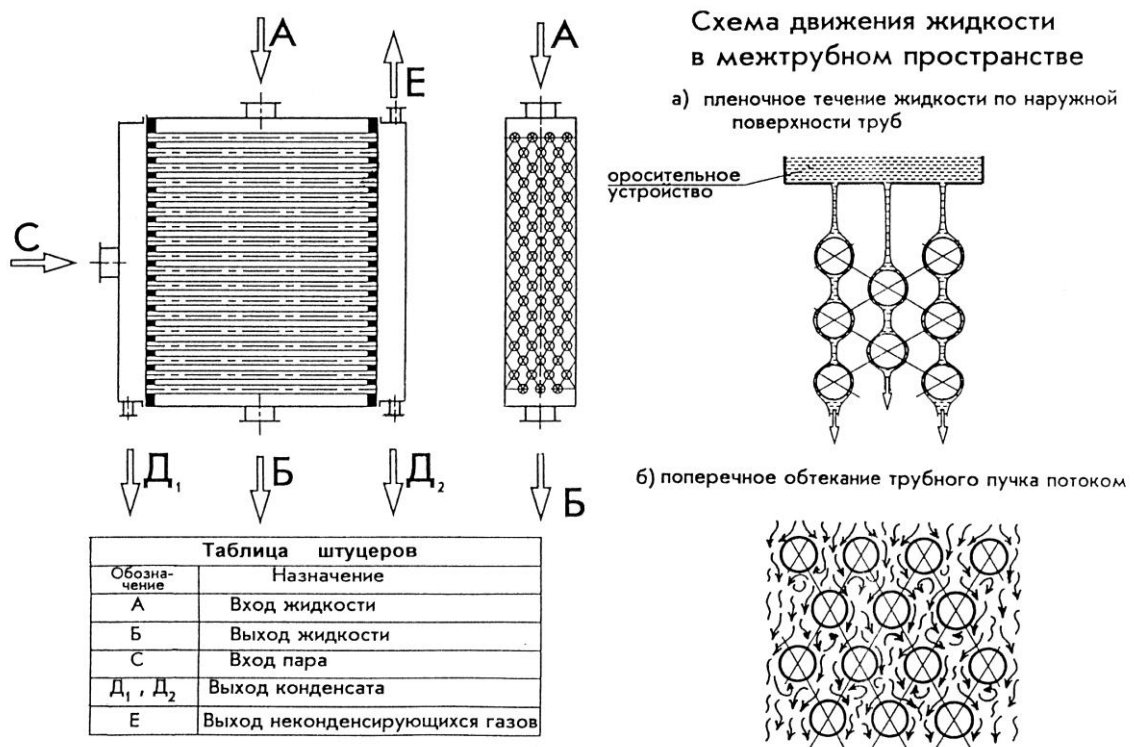


Рисунок 1 - Конструктивная схема пароводяных теплообменников

Наибольшее распространение эти аппараты получили в технике термического опреснения воды в качестве испарителей, конденсаторов, деаэраторов.

Физической основой происходящей в ГТПА интенсификации теплоотдачи от стенки трубы к стекающей пленке жидкости является перенос процесса из области стабилизированного теплообмена в начальный уча-

сток формирования пограничного слоя, что обеспечивается малой протяженностью пробега пленки жидкости по поверхности каждой горизонтальной трубы (половина периметра трубы, т.е. 20 – 40 мм для труб диаметром 12 – 25 мм). Эта модель реализуется также и при поперечном обтекании горизонтальных труб сплошным потоком жидкости, хотя интенсивность процесса теплообмена несколько ниже, чем при пленочном течении среды. Поэтому в тех случаях, когда обеспечение разрыва потока теплоносителя для организации пленочного режима течения жидкости оказывается проблематичным (например, при реконструкции действующего оборудования), целесообразно использование схемы поперечного обтекания труб потоком жидкости (рис. 1б).

Фактором интенсификации теплоотдачи со стороны конденсации является сокращение общего термического сопротивления ламинарной пленки конденсата из-за уменьшения ее средней толщины по сравнению с таковой на длинных вертикальных трубах или на горизонтальных пучках труб (когда толщина пленки возрастает от верхнего ряда труб к нижнему). При этом величина коэффициента теплоотдачи для водяного пара может достигать значений 10 – 25 кВт/(м<sup>2</sup>·К), что намного превышает таковые в типовых конденсаторах и подогревателях, где, как уже упоминалось  $\alpha_n \approx 6 - 8$  кВт/(м<sup>2</sup>·К).

Таким образом, применение рассмотренной технологии ГТПА позволяет существенно повысить интенсивность обеих стадий теплопередачи: как теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке трубы, так и теплоотдачи от стенки к жидкости (сетевой или охлаждающей воде).

В результате, в пароводяных подогревателях, конструктивная схема которых, представлена на рис. 1, обеспечивается интенсификация общей теплопередачи «пар – жидкость» в 1,5 – 2 раза и соответствующее улучшение массогабаритных характеристик этого оборудования. Достигается также существенное уменьшение гидравлического сопротивления аппарата

по воде (межтрубному пространству) – не менее, чем в 10 раз в «поточных» аппаратах, либо полное отсутствие такового в пленочных теплообменниках. Соответственно снижается расход электрической энергии, потребляемой перекачивающими насосами.

Технология ГТПА обладает преимуществом и для однофазных теплообменников «жидкость – жидкость», поскольку сохраняются принципы организации движения среды в межтрубном пространстве, обеспечивающие реализацию модели теплообмена на начальном участке. Такие аппараты с успехом могут быть применены в различных технологических схемах для нагрева и охлаждения жидкостей, в том числе в схемах отопления и горячего водоснабжения (ГВС) вместо секционных «скоростных» подогревателей типа ПВ или недостаточно надежных в эксплуатации пластинчатых теплообменников.

Конструктивная схема предлагаемых аппаратов соответствует представленной на рис. 1 с тем отличием, что в трубном пространстве, разделенном на несколько (4 – 12) ходов, движется греющая или нагреваемая вода. В межтрубном пространстве так же, как и в паро-водяных аппаратах, осуществляется чисто поперечное обтекание горизонтального трубного пучка пленкой или сплошным потоком жидкости.

Такая конструкция, наряду с ее простотой, позволяет получить достаточные для достижений высокой тепловой эффективности значения скорости движения теплоносителей.

Компоновка ходов обеспечивает согласование направлений движения рабочих сред по трубному и межтрубному пространствам для реализации принципа противотока, при котором, как известно, достигается максимальное значение температурного напора по всей поверхности теплообмена. Это иллюстрируется представленной на рис. 2 схемой, где буквами «А» и «Б» обозначены рабочие среды, цифрами (1 – 6) – номера ходов в трубном пространстве.

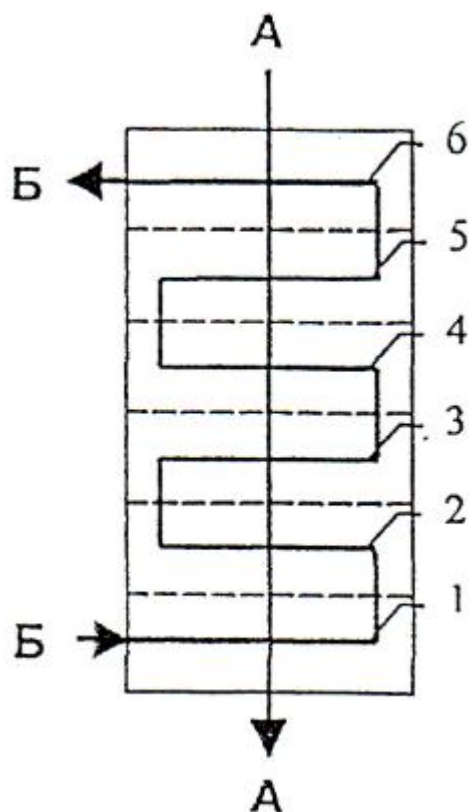


Рисунок 2 - Схема движения рабочих сред (А и Б) в теплообменниках  
«жидкость – жидкость».

Предлагаемые аппараты по отношению к серийным секционным подогревателям по ГОСТ 27590-88 имеют, за счет более высокой интенсивности теплопередачи, значительные преимущества как по требуемой площади поверхности теплообмена (в 1,5–2,5 раза), так и по массе (в 2–4 раза). Эти аппараты не уступают по интенсивности теплопередачи пластинчатым теплообменникам, но имеют при этом лучшие гидравлические и массогабаритные показатели и более высокую эксплуатационную надежность из-за меньшей склонности к образованию отложений и накипи.

Причем пленочные теплообменники по всем основным характеристикам обладают преимуществом перед «поточными» (в среднем в 1,4–1,5 раза). В них достигается также упрощение конструкции и снижение металлоемкости ввиду отсутствия необходимости укрепления корпуса по межтрубному пространству, поскольку в нем нет избыточного давления. Отсутствует и гидравлическое сопротивление аппарата по этому пространству.

ву. Кроме того, в пленочных аппаратах из-за наличия развитой свободной поверхности жидкости и её интенсивного перемешивания при перетекании с трубы на трубу обеспечивается одновременно с нагревом воды возможность ее эффективного деаэрирования.

Подробный анализ недостатков типовых серийных однофазных водоводяных теплообменников (типа ПВ и пластинчатых) и предполагаемые преимущества аппаратов предлагаемой конструкции приведены в [1].

Такие однофазные теплообменники могут применяться не только в качестве водо-водяных аппаратов, но и для других теплоносителей. Особенно перспективно их использование в качестве маслоохладителей, широко применяемых в технологических схемах охлаждения различного оборудования, трансформаторных и компрессорных установках и т.д. Стандартная конструкция серийных маслоохладителей отличается большой сложностью и трудоемкостью изготовления из-за значительного количества перегородок типа «диск-кольцо» или сегментных в межтрубном пространстве аппарата и жестких требований к обеспечению определенной величины зазоров между перегородками и поверхностью корпуса. Холостые протечки масла через зазоры существенно снижают тепловую эффективность этих охладителей, которая и так невысока – номинальные значения коэффициента теплопередачи для большинства гладкотрубных модификаций не превышают величины  $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

На основании выполненного анализа для маслоохладителей предлагается конструктивная схема, аналогичная описанной выше для водоводяных теплообменников и с компоновкой ходов по рис. 2. На этом рисунке по стрелке «А» движется масло (сплошным потоком или в стекающей пленке), а по стрелке «Б» - охлаждающая вода (4 – 12 ходов).

Выполненное сопоставление основных расчетных характеристик маслоохладителей предлагаемых типов (для двух вариантов поперечного обтекания трубного пучка – пленкой или сплошным потоком масла) и серий-

ного маслоохладителя МО-10 производства Калужского турбинного завода показало существенные преимущества новых аппаратов. Так, достигаемая в них интенсивность теплопередачи не менее, чем вдвое превышает ее уровень в МО-10 (для пленочного охладителя расчетное значение коэффициента теплопередачи составляет  $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , для «поточного» -  $450 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а металлоемкость их меньше в 2 – 2,5 раза.

Маслоохладители пленочного типа, кроме того, характеризуется простотой включения их в схему маслоснабжения путем монтажа над сборным масляным баком, либо непосредственно в нем, а также повышенной экологической безопасностью ввиду невозможности протечек масла в тракт охлаждающей воды (трубное пространство аппарата, находящееся при работе оборудования под избыточным давлением), а следовательно, в природные источники водоснабжения. В серийных же маслоохладителях проблема герметизации масляного тракта экономически оправданными методами не решена до сих пор и на современном этапе привлекает особое внимание.

Следует также обратить внимание на отработанную концепцию конструирования горизонтально-трубных аппаратов в виде плоскостенных теплообменников, что обеспечивает рациональную организацию движения рабочих сред, отсутствие «мертвых» зон в межтрубном пространстве, компактность и возможность простой компоновки в блоки необходимой тепловой мощности из отдельных модулей определенного типоразмера.

#### Список литературы

1. Путилин Ю.В. Повышение эффективности и надежности водяных подогревателей систем теплоснабжения// Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса в рамках концепции 2020: матер. VII Международной науч.-техн. конф. Екатеринбург: УГЛУ, 2009. Ч.2. С. 133-136.