

## ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 621.165-714

Ю.В. Путилин, О.Б. Пушкарева  
(Yu.V. Putilin, O.B. Pushkareva)  
УГЛТУ, Екатеринбург  
(USFEU, Ekaterininburg)

### НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (NEW TECHNOLOGIES IN CONDUCTING OF THE HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE POWER EQUIPMENT OF THE TIMBER INDUSTRY ENTERPRISES)

*Предложены эффективные теплообменники нового типа, обеспечивающие улучшение теплотехнических и эксплуатационных характеристик энергетического оборудования в 1,5–2,0 раза.*

*Effective heat exchangers of a new type, providing the improvement of the heat – technical and operational characteristics of the power equipment by a factor of 1,5–2,0 are proposed.*

Анализ наиболее применяемых в теплоэнергетике типовых 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 для интенсификации теплообмена в этих аппаратах предложено много методов, 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.

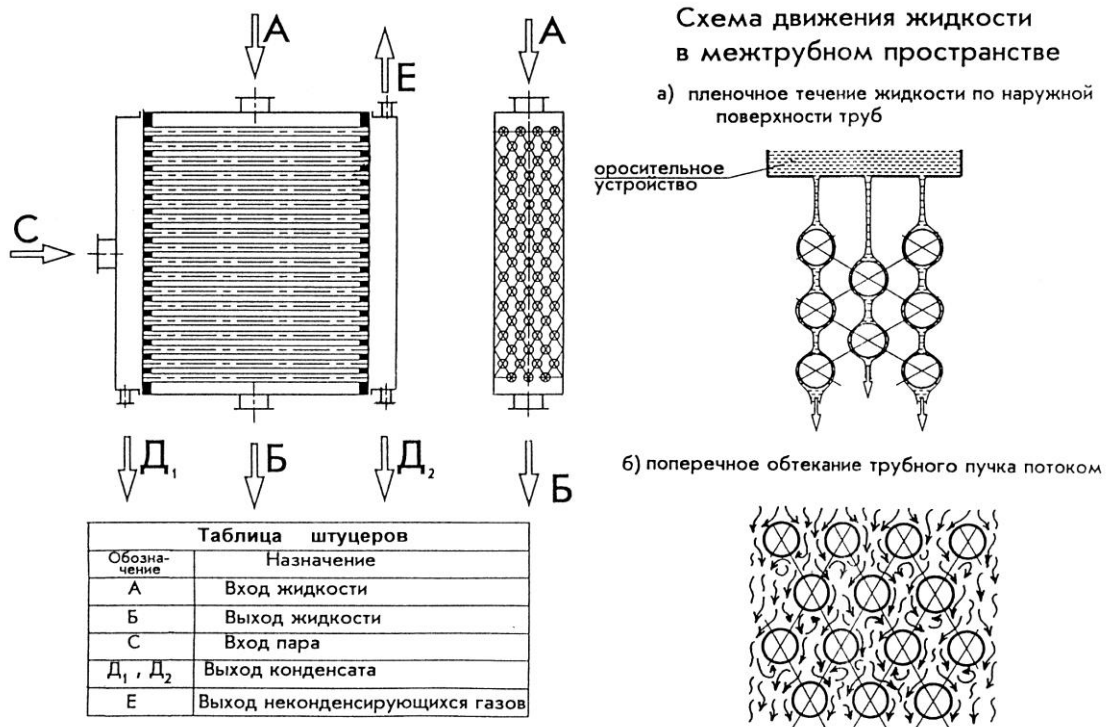
В то же время известна достаточно отработанная (более 30 лет) в смежной области техники (термическом опреснении воды) технология, позволяющая повысить тепловую эффективность различного теплоэнергетического оборудования по сравнению с токовой в традиционных конструкциях. В настоящей статье рассмотрены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

На ТЭЦ и в котельных предприятий лесной промышленности в составе основного оборудования используются поверхностные пароводяные теплообменники различного назначения – конденсаторы,

сетевые подогреватели, регенеративные подогреватели. Типовая конструкция их – кожухо-трубные 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  $\alpha_n$  составляет всего 6–8 кВт/(м<sup>2</sup>·К). Для обеспечения приемлемого уровня общей теплопередачи приходится создавать большие скорости воды в трубах ( $\approx 2$  м/с), что приводит к значительному гидравлическому сопротивлению аппаратов по трубному пространству.

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



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 участок 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 (рисунок, б).

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 конденсаторах, сетевых и регенеративных (низкого давления) подогревателях, где, как уже упоминалось,  $\alpha_n$  равна 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, питательной или охлаждающей воде).

В результате в пароводяных подогревателях, конструктивная схема которых представлена на рисунке, обеспечиваются 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, например, 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 рисунке 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 пароводяных аппаратах, осуществляется чисто поперечное обтекание горизонтального трубного пучка пленкой или сплошным потоком жидкости\*.

УДК 532.546

С.В. Звягин  
(S.V. Zvyagin)  
УГЛТУ Екатеринбург  
(USFEU, Ekaterinburg)

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ  
ЧАСТИЦАМИ И ГАЗОМ В НАДСЛОЕВОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ**  
(MATHEMATICAL MODEL OF HEAT EXCHANGE BETWEEN  
PARTICLES AND GAS IN SPACE HIGHER FLUIDIZED BED)

*Разработана математическая модель теплообмена между частицами и газом в зоне всплесков, описывающая картину нагрева частиц в разреженной зоне псевдоожигенного слоя. Экспериментальные значения температуры газа в надслоевом пространстве хорошо согласуются с теоретическими зависимостями, построенными по математической модели.*

*The mathematical model of heat exchange between particles and gas in a zone of the splashes, describing a picture of heating particles in the discharged zone of a fluidized bed is developed. Experimental values of temperature of gas in space higher fluidized bed are well coordinated with the theoretical dependences constructed on mathematical model.*

---

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