

УДК 66.096.5

А.В. Соколов  
(A.V. Sokolov)  
УрФУ, Екатеринбург  
(UFU, Ekaterinburg)  
А.И. Сафронов  
(A.I. Safronov)  
УГЛТУ, Екатеринбург  
(USFEU, Ekaterinburg)

**ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО  
ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ТЕПЛООТДАЧИ В ТРУБЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ  
(THE INFLUENCE OF THREE-PHASE FLUIDIZED BED  
CHARACTERISTICS ON HEAT TRANSFER EFFICIENCY IN  
TUBULAR HEAT EXCHANGER)**

*Выполнено исследование влияния свойств трехфазного псевдоожигенного слоя на эффективность охлаждения теплоносителя в горизонтальном трубчатом теплообменнике.*

*The research of three-phase fluidized bed properties on efficiency of heat carrier cooling in a horizontal tubular heat exchanger is represented.*

Жидкостный псевдоожигенный (кипящий) слой – поток однофазного теплоносителя в капельном состоянии. Находящиеся в этом потоке твердые частицы обладают высокой интенсивностью теплообмена с поверхностью. Такая система также препятствует образованию отложений на поверхности (или разрушает их) вследствие постоянного соударения частиц с поверхностью. Этот эффект называется самоочисткой поверхности.

Дополнительный ввод в эту систему газовых струй (создание трехфазного слоя: вода, твердые частицы, воздух) обеспечивает усиленную турбулизацию потока и рост теплоотдачи слоя с поверхностью.

Применение в качестве сжижающей среды жидкости с большей вязкостью, чем вода, снижает интенсивность возмущений в следе за частицами, возникающих при обтекании частиц жидкостью. Уменьшаются их размеры и способность проникать в пристенную зону и отжиматься от стенки вследствие увеличения внутреннего трения. Снижаются также скорость жидкости между частицами, скорость и интенсивность движения газовых пузырей вследствие их коалесценции. Уменьшение скорости газа и увеличение диаметра пузырей происходит также из-за роста сил трения в

жидкости. Поэтому увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению конвективной дисперсии теплоты и соответственно к снижению интенсивности теплообмена.

Для трубных пучков оптимальная порозность наблюдается при больших скоростях жидкости по сравнению с порозностью теплоотдачи одиночной трубы. Более высокая интенсивность теплоотдачи трубных пучков по сравнению с таковой в одиночных цилиндрах связана, по-видимому, с дополнительной турбулизацией потока за счет различных геометрических параметров трубного пучка – поперечного и продольного шагов.

Обработка экспериментальных данных позволяет отметить сильное влияние объемного газосодержания на теплообмен при наличии пучка, в то время как для одиночной трубы это влияние заметно меньше. Данное положение связано с тем, что при тех же расходах жидкости и газа происходит увеличение средней скорости как жидкой, так и газовой фазы вследствие уменьшения проходного сечения. В результате возмущения, вносимые газовыми пузырями, усиливаются, интенсифицируя процесс теплопереноса.

Обобщающие эмпирические зависимости по порозности слоя  $\varepsilon$  и коэффициентам теплоотдачи  $\alpha$  при обтекании газожидкостным слоем горизонтальных шахматных и коридорных пучков труб получены ранее в виде критериальных уравнений конвективного теплообмена.

Также были определены оптимальные значения скорости жидкости и соответствующие ей максимальные коэффициенты теплоотдачи. Экспериментальные данные представлены после обработки в виде критериальных уравнений.

Эти зависимости отражают влияние характеристик трехфазной среды – газосодержание, фракционный состав, плотность материала частиц, скорость фильтрации, теплофизические свойства жидкости.

По уравнениям теплового баланса, теплопередачи и критериальным уравнениям конвективного теплообмена разработана методика расчета теплообменного аппарата. В соответствии с ней выполнен тепловой расчет рекуперативного теплообменника для охлаждения циркуляционной воды.

Аппарат представляет собой теплообменник с горизонтальными медными трубками с наружным диаметром 14 мм и толщиной стенки 1,5 мм, развальцованными в трубных досках прямоугольной формы. Шаг в треугольной разбивке трубного пучка, равный 24 мм, выбирался исходя из диаметра частиц и требуемого проходного сечения для создания

оптимальной скорости фильтрации. Движение теплоносителей осуществлялось по схеме многократного перекрестного тока. Трехфазный псевдооживленный слой организован в межтрубном пространстве, которое для предотвращения уноса и провала частиц сверху и снизу ограничено перфорированной решеткой и мелкоячеистой латунной сеткой. В качестве дисперсного материала использованы алундовые частицы с эквивалентным диаметром 0,95 мм. Трехфазный слой создается одноходовым подъемным движением водно-воздушной смеси. Смешение компонентов оживающей смеси происходит перед трубным пучком в смесительной камере, а разделение после прохождения аппарата – в градирне.

Исходными данными для расчета являются: тепловая нагрузка по циркуляционной воде, температура циркуляционной воды на входе и на выходе, ее расход, температура оживающей смеси на входе, расход технической воды и газосодержание.

Учитывая малые толщину и термическое сопротивление медной стенки труб пучка, а также отсутствие слоя загрязнений ввиду самоочистки поверхности со стороны кипящего слоя, коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле

$$k \approx \alpha_{\text{в}} \alpha_{\text{max}} / (\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{max}}).$$

Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{в}}$  от воды к трубкам определяются по критериальному уравнению конвективного теплообмена для турбулентного режима при движении однофазной среды в трубе. Значение максимального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{max}}$  от поверхности трубок к трехфазному слою рассчитывали по ранее полученному критериальному уравнению. По оптимальной скорости фильтрации определяем сечение, необходимое для прохода водовоздушной смеси с учетом стесненности канала. После расчета коэффициента теплопередачи  $k$  и температурного напора  $\overline{\Delta t}$  определяем поверхность аппарата и основные конструктивные размеры. Использование газожидкостного кипящего слоя со стороны технической воды обеспечивает самоочистку поверхности теплообмена. Вследствие этого коэффициент теплопередачи рассчитывается без учета термического сопротивления отложений на поверхности, при этом уменьшаются габариты устройства по сравнению с габаритами водяных теплообменников. При заданных поверхности теплообмена и тепловой нагрузке применение трехфазного слоя приводит к снижению расхода охлаждающей воды.