УДК 536.24, 532.546

С.С. Азиханов, А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ В ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ

Широкое применение процессов теплообмена с фазовым переходом теплоносителя на непроницаемой поверхности обусловлено рядом преимуществ перед другими способами подвода и отвода тепла, применяемых в технике, и в первую очередь тем, что в таких процессах используется теплота фазового перехода, имеющая для некоторых веществ достаточно высокие параметры, и достигаются, при правильных условиях организации фазовых переходов, значения коэффициентов теплоотдачи много выше, чем, например, при конвективном теплообмене. Во многом от эффективной работы теплопередающих устройств, в которых происходит конденсация греющих или выходящих из технологических аппаратов паров, зависит эффективность многих технологических процессов (при ректификации смесей имеет место конденсация пара в кипятильнике кубовой части и дефлегматоре легкой фракции, при выпаривании – в греющей камере и поверхностном конденсаторе вторичного пара и т.д.). В связи с этим, интенсификация теплообмена при конденсации пара является актуальной задачей, особенно в случаях, когда на другой стороне теплопередающей поверхности происходит достаточно эффективный процесс кипения, связанный с высокими коэффициентами теплоотдачи в обычных стандартизованных теплообменниках.

В литературе уделяется большое внимание вопросам интенсификации теплообмена при конденсации. В большинстве случаев при решении этой задачи применяется оребрение поверхности конденсации ребрами различной конфигурации, при этом достигается эффект увеличения коэффициента теплоотдачи в 2-3 раза. Однако такой способ интенсификации теплообмена значительно усложняет конструкцию аппарата и что не менее важно применим, как правило, только для трубных пучков, расположенных горизонтально.

Одним из способов, позволяющих увеличить теплоотдачу при конденсации пара, является использование зернистого слоя [1, 2]. Исследования теплообмена при конденсации на поверхности, помещенной в зернистый слой, проведенные ранее с использованием хладонов, показали возможность использования зернистого слоя для значительной интенсификации теплоотдачи. Практически все исследования по теплообмену в зернистых средах проведены с использованием жидкостей, хорошо смачивающих поверхность, и краевой угол смачивания принимался равным нулю. Характер течения конденсата по охлаждаемой поверхности в присутствии зернистого слоя при условии действия поверхностных сил во многом

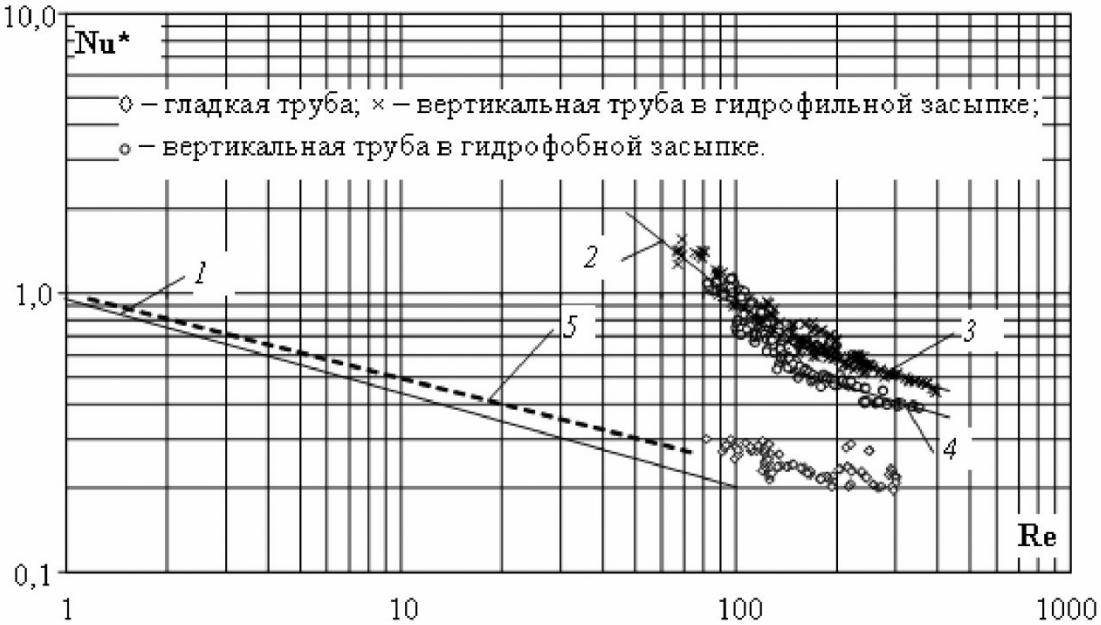

Рис. 1. Теплообмен при конденсации водяного пара на вертикальной трубе, упакованной в зернистый слой с различными свойствами поверхностей: 1 – расчет по зависимости $Nu^* = 0{,}95Re^{-1/3}$*; 2, 3, 4 – линии, осредняющие экспериментальные данные; 5 – экспериментальные данные других авторов*

зависит от значения краевого угла смачивания. На практике одним из самых распространенных теплоносителей является водяной пар (вода). Вода для многих поверхностей, используемых в технике, не является смачивающей.

Авторами данной работы были проведены экспериментальные исследования теплообмена при конденсации водяного пара на поверхности вертикальной трубы, помещенной в зернистый слой с различным краевым углом смачиваемости. Подробно схема экспериментального стенда, методика проведения экспериментов и обработки результатов описаны в [3, 4]. На рис. 1, 2 представлены результаты исследований. Полученные данные свидетельствуют об интенсификации теплообмена в 2–5 раз по сравнению с гладкой трубой без зернистого слоя. Как видно из графика на рис.1, наблюдается различные закономерности теплообмена в исследуемом диапазоне течения пленки конденсата (линии 2, 3, 4).

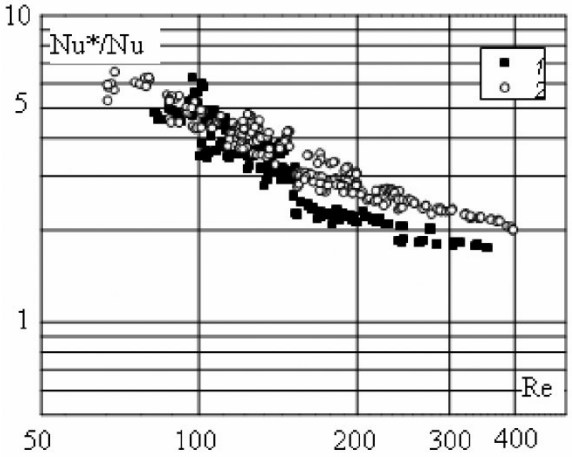

Рис. 2. Сравнение интенсивности теплоотдачи при конденсации водяного пара на вертикальной гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой: 1 – труба в гидрофобном слое; 2 – в гидрофильном слое

Линия *2* осредняет экспериментальные данные зависимостью $Nu^*=92.5Re^{-1}$ как для гидрофобного, так и для гидрофильного слоя. Переход от одной закономерности к другой происходит при значении Re ≈ 150. Экспериментальные данные для гидрофильного слоя описываются уравнением $Nu^*=3.54Re^{-1/3}$ (линия *3*), для гидрофобного слоя уравнением $Nu^*=2.92Re^{-1/3}$ (линия *4*).

Ранее, в работах [1, 2], при конденсации фреона на поверхности в зернистом слое предполагалось, что более высокая интенсификация теплообмена на вертикальной трубе происходит за счет «отсоса» части конденсата от поверхности трубы вглубь слоя за счет сил поверхностного натяжения. В работе [5] сделано предположение, что в случае тонких пленок конденсата, когда толщина пленки много меньше диаметра частиц, может быть подтягивание жидкости, а когда толщина пленки соизмерима с диаметром частиц существует возможность отвода жидкости от поверхности вглубь слоя. Но экспериментальных работ, подтверждающих данные предположения, не проводилось.

Понятия относительных «толстых» и «тонких» пленок конденсата было введено академиком Накоряковым. При «тонких» пленках считается, что толщина пленки конденсата много меньше диаметра частиц, при относительно «толстых» пленках – толщина пленки много больше диаметра частиц. Средняя толщина пленки конденсата на охлаждающей поверхности в слое определялась по формуле

$$\delta = \lambda \Delta T / q ,$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости при температуре насыщения; ΔT – температурный напор, q – удельный тепловой поток к теплопередающей поверхности.

Рис.3. Течение жидкости по вертикальной стенке

В нашем случае при конденсации водяного пара были получены относительно «тонкие» пленки конденсата в диапазоне отношения толщины пленки к диаметру частиц зернистого слоя (δ/d = 0,0037÷0,0125). Установлено, что переход от одной закономерности теплообмена к другой происходит при значении отношения толщины пленки к диаметру сферы δ/d = 0,01. Для объяснения различий в закономерностях теплообмена были проведены гидродинамические исследования на модели, которая имитировала течение сконденсированной фазы по гладкой поверхности, находящейся в контакте с отдельными сферическими частицами. В качестве рабочего участка была использована вертикальная плоская пластина размером длиной L = 1000 мм и шириной B = 128 мм, к которой крепилась сфера. Схематично рабочий участок изображен на рис. 3. Жидкость подавалась на пластину в виде пленки при помощи специального распределительного устройства. Расстояние от места подачи жидкости до места крепления сферы составляло 300 мм. Режим течения пленки по поверхности пластины изменялся соответственно с проведенными опытами по теплооб-

мену в пределах 30 < Re <400. Критерий Рейнольдса течения пленки определялся по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{Q_1}{\nu}, \qquad (1)$$

где Q_1 – объемный расход жидкости на единицу ширины пленки.

В ходе эксперимента определялось количество отводимой жидкости сферой за время τ. Использовались сферы из различных материалов с краевым углом смачивания θ и шероховатостью R_a. Характеристика сфер представлена в таблице 1.

Таблица 1.Характеристики сфер

Материал	Диаметр сферы, мм	Краевой угол смачивания θ, град	Шероховатость R_a, мкм
пластик	37,5	56	0,9
пластик	40,0	56	0,4
сталь	30,0	87	0,05

Общий расход жи дкости изменялся от 10 до 110 г/с. Количество отведенной жидкости одиночной сферой Q_2 измерялось пробоотборником, но пересчитывалось на условия теплообмена при конденсации пара на вертикальной трубе диметром 8 мм, упакованной в зернистый слой из стеклянных шариков 3,2 мм. Все исследования проводились при комнатной температуре на воде. Перед началом экспериментов сферы смачивались рабочей жидкостью.

В ходе экспериментов обнаружено, что при наличии контакта с одной сферой может происходить отток жидкости от поверхности пластины при различных режимах течения пленки по поверхности (рис. 4).

Рис. 4. Гидродинамика жидкости на вертикальной поверхности при контакте со сферой d = 40 мм, Re = 133

На рис. 5 представлена графическая зависимость доли отводимой жидкости сферой от критерия Re. Эксперименты по гидродинамике проводились в том же диапазоне Re, что и в экспериментах по конденсации на вертикальной трубе. Диапазон изменения отношения толщины пленки к диаметру сферы, совпадал с диапазоном при конденсации на вертикальной трубе. Отношение толщины пленки стекающей жидкости к диаметру сферы δ/d менялось от 0,0041 до 0,014 (практически как в опытах по теплообмену при конденсации пара). Как видно из графика (рис. 5) в исследуемом диапазоне Re отводится в среднем около 6-8 % жидкости. В данном случае не работает капиллярный эффект, а работает эффект прилипания (эффект Коанда). Причем, часть жидкости может возвратиться обратно на поверхность пластины. Можно предположить, что интенсификация теплообмена при конденсации пара на вертикальной поверхности, помещенной в зернистый слой, в условиях «тонкой» пленки (интенсификация теплообмена более 2 раз) обусловлена не отводом части конденсата в глубь зернистого слоя, а подтягиванием конденсата в местах контакта сфер зернистого материала с охлаждаемой поверхностью. Причем, чем лучше жидкость смачивает поверхность сферы, тем больше поднятие и тем выше коэффициент теплоотдачи.

При увеличении теплового потока увеличивается и толщина пленки. При этом зернистый слой оказывает тормозящее влияние на поток конденсата, особенно в зоне «жидкого» мениска. При *Re* ≈ 150 происходит переход от пленочного режима течения конденсата к струйному режиму, так как в нижней части мениска образуются вихревые образования, срывающиеся в виде пристенных струй и текущих между точками контакта. Значения критерия Рейнольдса, при котором происходит смена режимов течения конденсата, согласуются со значениями, полученными в работе [6] при исследовании течения жидкости в модели кубической шаровой засыпки методом PIV.

При числах Re свыше 380-400 наблюдался нестабильный отвод жидкости. Причем часть жидкости может возвратиться обратно на пластину, а часть, в достаточно большом количестве, может транспортироваться в глубь зернистого слоя.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что на интенсификацию теплообмена при конденсации на вертикальной поверхности в зернистом слое при относительно «тонких» пленках конденсата оказывает наибольшее влияние капиллярное поднятие жидкости и струйное течение между точками контакта.

На количество отводимой жидкости влияют такие параметры как скорость течения жидкости и толщина пленки, характеризуемая общим расходом, диаметр сферы, краевой угол смачивания, шероховатость поверхности сфер.

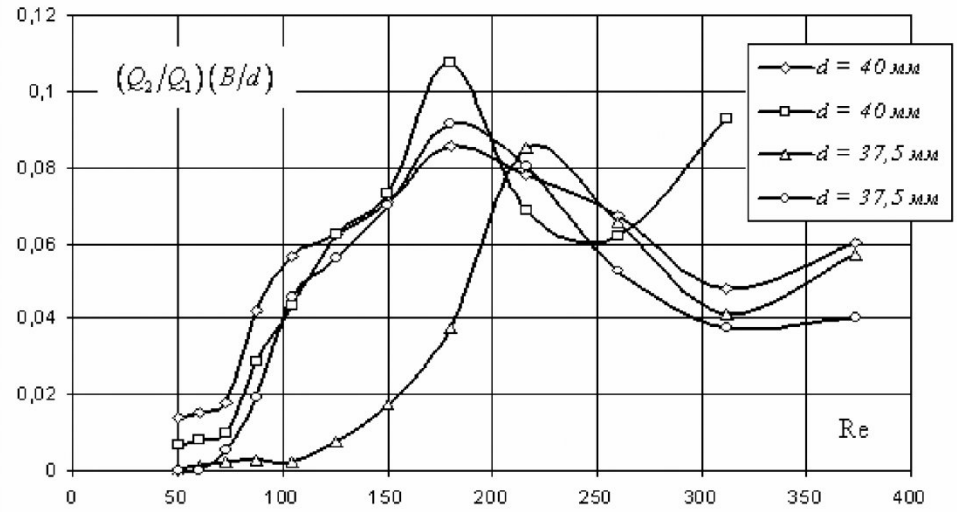

Рис. 5. Зависимость относительного отвода жидкости от числа Рейнольдса (Re) *при стекании пленки жидкости по вертикальной поверхности*

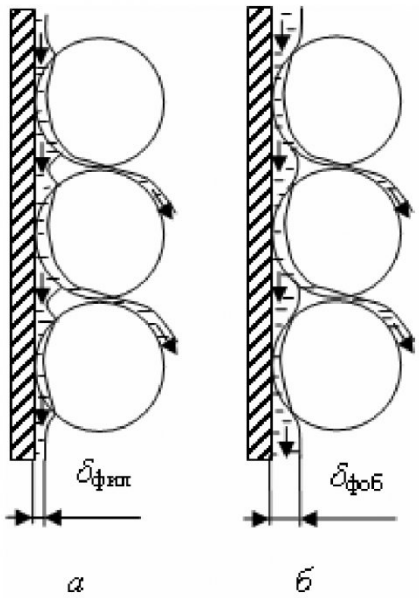

Рис. 6. Схема движения конденсата по вертикальной поверхности: а, б – случай для «тонких» пленок при гидрофильной и частично гидрофобной поверхности элементов зернистого материала, соответственно

Закономерность теплообмена $Nu^* \square Re^{-1}$ на рис. 1 объясняется тем, что эффект проскальзывания конденсата в этой области не проявляется на теплообмене.

Причиной может быть то, что теплопередающая поверхность при невысоких значениях расхода конденсата незначительно соприкасается с поверхностью шаров засыпки при смачивании, и поэтому при частичном проскальзывании его эффект будет также слабо проявляться на теплообмене.

При этом эффект прилипания практически не сказывается и закономерность для гидрофильных и для гидрофобных частиц не меняется.

В нашем случае переход от пленочного режима течения конденсата к струйному происходит при Re ≈ 150 (рис. 1).

В случае тонкой пленки конденсата при Re > 150 различие в закономерности теплообмена между гидрофильным и гидрофобным зернистым слоем связано, очевидно, с различными формами менисков вблизи контакта частиц. Для гидрофильного слоя она вогнутая, что способствует уменьшению толщины пленки, а для гидрофобного слоя – выпуклая (рис. 6).

Таким образом, основываясь на экспериментах по гидродинамике, можно сделать вывод, что при конденсации пара на вертикальной трубе в зернистом слое, причинами интенсификации теплообмена с различными его закономерностями в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса пленки (режим «тонкой» пленки) являются следующие факторы:

1 – капиллярное поднятие части жидкости в окрестности менисков, и как следствие, уменьшение средней толщины пленки;

2 – струйное течение пленки конденсата по поверхности охлаждения из нижней области мениска в местах контакта частиц с поверхностью конденсации.

Незначительный отток конденсата от поверхности охлаждения в область зернистого слоя не оказывает существенного влияния на теплообмен в исследованной области гидродинамических режимов и им можно пренебречь в инженерных расчетах. Значительный отсос конденсата, предполагаем, будет происходить при толщинах пленки, соизмеримых с размером элементов зернистого слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А*фанасьев, Ю. О*. Влияние зернистого слоя на пленочную конденсацию / Ю.О. Афанасьев, И.В. Дворовенко, С.И. Лазарев, П.Т. Петрик, Г.С. Сердаков // Теплообмен в парогенераторах: матер. Всесоюзн. конф., июнь 1988 г., Новосибирск. – Новосибирск, ИТ СО АН СССР, 1988. – С. 366-372.

2. *Богомолов, А. Р.* Теплообмен при конденсации на поверхности вертикального цилиндра, погруженного в зернистый слой / А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик, О.Н. Цой // Химия и химическая технология: сб. науч. тр. – Кемерово, 1995. – С. 60-66.

3. *Петрик, П. Т.* Теплообмен при конденсации хладона R227 на наклонных трубах, помещенных в зернистый слой / П.Т. Петрик, П.В. Дадонов, И.В. Дворовенко, А.Р. Богомолов // ИФЖ, – 2004. – Т. 77. – № 4. – С.76-78.

4. *Богомолов, А. Р.* Пленочная конденсация водяного пара на вертикальной трубе в пористой среде / А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик, И.В. Дворовенко, А.А. Богомолов // Вестник КузГТУ, – 2006. – №6. – С.110-115.

5. *Plumb, O. A.* Film condensation on a vertical flat plate in a packed bed / O.A. Plumb, D.B. Burnett, A. Shekarriz // J. Heat Transfer. – 1991. – V. 112. – P. 235-239.

6. *Белоусов, А. П.* Гидродинамическая структура двухфазного течения в окрестности точек контакта элементов шаровых засыпок / А.П. Белоусов, А.Р. Богомолов, Д.М. Маркович // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т. 11, № 3. – С. 429-440.

Авторы статьи:

Азиханов
Сергей Сейфудинович
– ст. препод. каф.,
«Процессы машины
и аппараты химических
производств»
Тел.3842-58-10-36

Богомолов
Александр Романович
– канд. техн. наук, с.н.с.,
Института теплофизики
СО РАН
Тел.3842-58-10-36

Петрик
Павел Трофимович
– докт. техн. наук,
зав. каф. «Процессы машины
и аппараты химических
производств»
e-mail: ppt@kuzstu.ru

УДК 66.067.16

В.А. Плотников

РАЗДЕЛЕНИЕ СУСПЕНЗИЙ В ФИЛЬТРЕ – ОТСТОЙНИКЕ

Примером реализации принципа совмещения процессов в одном аппарате является фильтр-отстойник, где разделение суспензии осуществляется одновременно фильтрованием и отстаиванием. Строго говоря, разделение суспензии в обычном фильтре также всегда осложнено осаждением твердых частиц на горизонтальной фильтрующей перегородке [1]. В большинстве случаев этим обстоятельством пренебрегают, полагая, что оно не оказывает существенного влияния на работу фильтра. Рассмотрим процесс разделения в фильтре-отстойнике и покажем, что при определенных условиях гравитационное осаждение частиц может существенно изменить ход процесса.

На рис. 1 показана схема фильтра–отстойника периодического действия. Цикличность работы аппарата складывается из следующих операций: заполнение аппарата до максимального уровня, выдержка под наливом, прекращение подачи суспензии и опорожнение, разгрузка образовавшегося осадка. Оставив без внимания стадию разгрузки, проанализируем процесс разделения суспензии в период заполнения, выдержки и опорожнения аппарата. Будем полагать, что подача суспензии осуществляется с невысокой скоростью и потому не оказывает заметного влияния на гидродинамическую обстановку внутри фильтра-отстойника.

В то же время в условиях спокойной подачи возможно расслоение суспензии под действием силы тяжести и осаждение частиц на фильтрующей поверхности. Оба явления, в конечном счете, влияют на скорость фильтрования, т.к. изменяют закономерность накопления осадка на фильтре.

Точное описание кинетики расслоения и осаждения полидисперсной суспензии в фильтре представляет сложную задачу, требующую учета гранулометрической характеристики частиц твердой фазы и неравномерности распределения несущего потока в поперечном и продольном направлениях [2]. Допустим, что данный процесс можно характеризовать некоторой скоростью релаксации w_t и балансным уравнением:

$$\frac{\partial(c \cdot dh)}{\partial \tau} = -w_e \cdot \frac{\partial c}{\partial h}, \qquad (1)$$

где $c = C(\tau, h)$ – временная функция распределения твердой фазы по высоте суспензии.

Исходное уравнение (1) записано в предположении, что несущий поток жидкой фазы соответствует потоку вытеснения. Его аналитическое ре-