

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 кипятыльнике 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 стандартизован-

ных 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

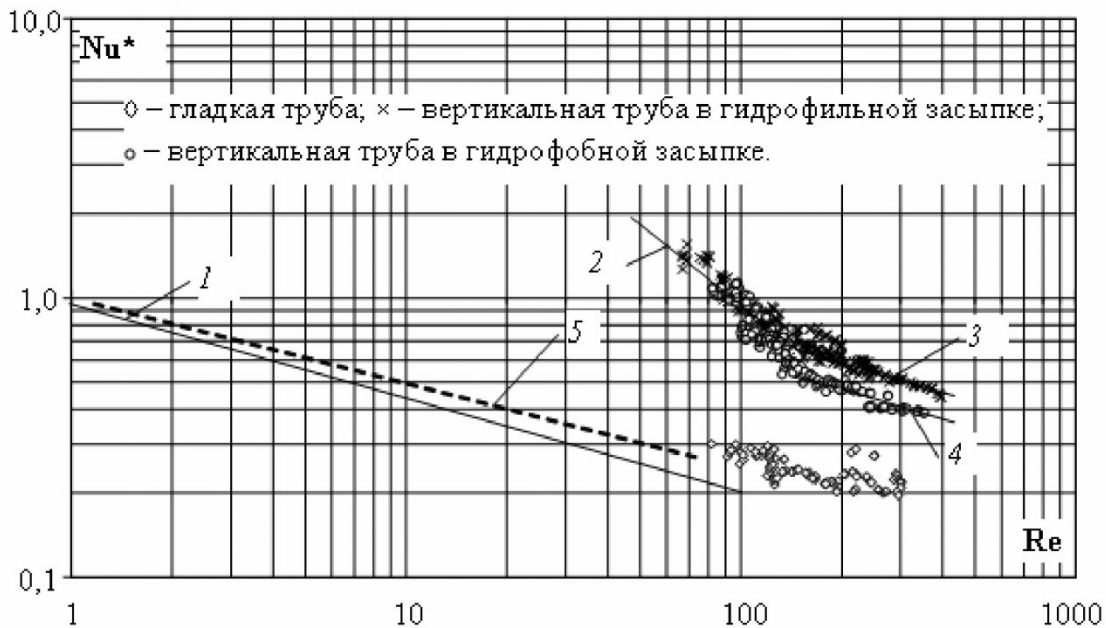


Рис. 1. Теплообмен при конденсации водяного пара на вертикальной трубе, упакованной в зернистый слой с различными свойствами поверхностей: 1 – расчет по зависимости $Nu^* = 0,95Re^{-1/3}$; 2, 3, 4 – линии, осредняющие экспериментальные данные; 5 – экспериментальные данные других авторов

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).

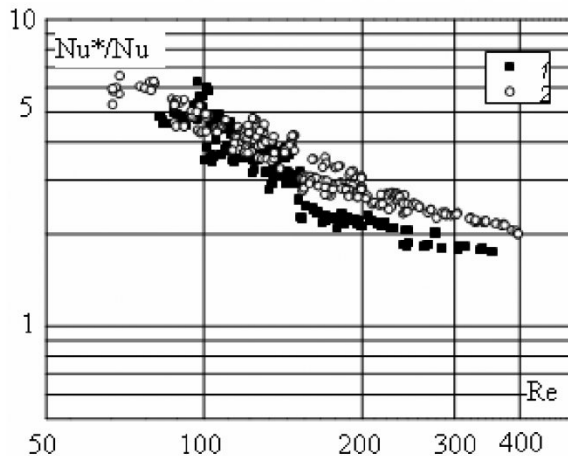


Рис. 2. Сравнение интенсивности теплоотдачи при конденсации водяного пара на вертикальной гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой: 1 – труба в гидрофобном слое; 2 – в гидрофильном слое

Линия 2 осредняет экспериментальные данные зависимостью $Nu^* = 92.5 Re^{-1}$ как для гидрофобного, так и для гидрофильного слоя. Переход от одной закономерности к другой происходит при значении $Re \approx 150$. Экспериментальные данные для гидрофильного слоя описываются уравнением $Nu^* = 3.54 Re^{-1/3}$ (линия 3), для гидрофобного слоя уравнением $Nu^* = 2.92 Re^{-1/3}$ (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 ($\delta/d = 0,0037 \div 0,0125$). Установлено, что переход от одной закономерности теплообмена к другой происходит при значении отношения толщины пленки к диаметру сферы $\delta/d = 0,01$. 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

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

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 жидкости 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 диаметром 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 $Re \approx 150$ 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 неустойчивый 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 сферы.

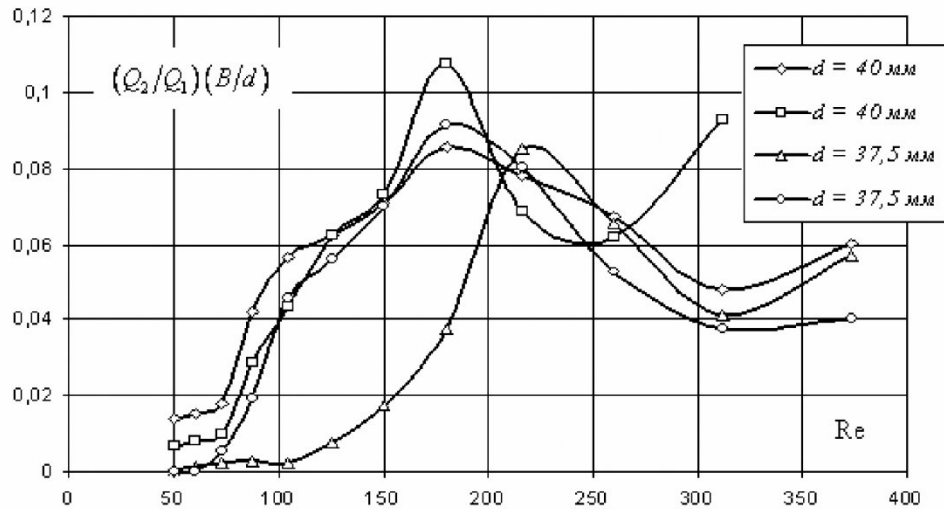


Рис. 5. Зависимость относительного отвода жидкости от числа Рейнольдса (Re) при стекании пленки жидкости по вертикальной поверхности

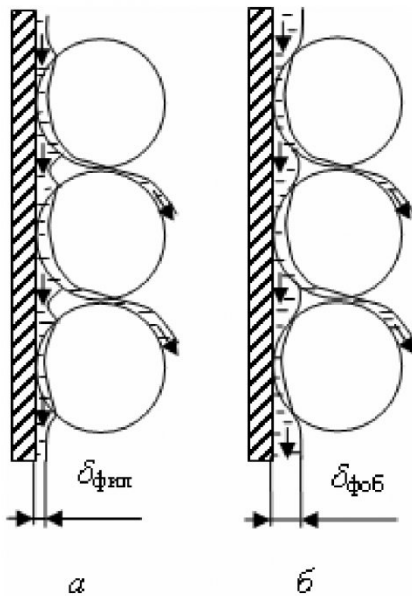


Рис. 6. Схема движения конденсата по вертикальной поверхности: а, б – случай для «тонких» пленок при гидрофильной и частично гидрофобной поверхности элементов зернистого материала, соответственно

Закономерность теплообмена $Nu^* \propto Re^{-1}$ 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 $Re \approx 150$ (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. *Афанасьев, 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.V. 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_e и балансным уравнением:

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

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-