

УДК 536.24, 532.546

А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик, И.В. Дворовенко, А.А. Богомолов

ПЛЕНОЧНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

При изменении агрегатного состояния теплоносителя (чистого пара) у охлаждаемой стеки освобождается большое количество тепла (теплота конденсации), но дальнейший переход тепла встречает сопротивление со стороны образовавшегося слоя конденсата. Интенсивность передачи теплоты через этот слой зависит не только от теплопроводности конденсата, но и от толщины его слоя. Способ отведения конденсата от поверхности охлаждения в этом случае играет решающую роль.

Чем больше отклоняется от вертикали поверхность теплообмена, тем труднее стекает конденсат и тем толще слой его на поверхности. Если поверхность высока, то конденсат собирается толстым слоем внизу. Конструкторам конденсирующих устройств приходится считаться с этим явлением.

К теплообменному аппарату (ТА) обычно включают требования по ограничению его массогабаритных характеристик. В случаях установок аэрокосмического или транспортного назначения массогабаритные ограничения могут иметь важное и решающее значение. Уменьшения размеров теплообменника можно достичь за счет интенсификации процессов теплообмена.

При конденсации пара стремятся уменьшить термическое сопротивление пленки конденсата, для чего организуют процесс в каналах с малыми поперечными размерами повышают скорость движения пара, осуществляют отсос конденсата через пористые и зернистые покрытия поверхности, либо периодический отвод на вертикальных значительной длиной трубах установкой «юбочек», улучшают условия его отвода с

помощью сил поверхностного натяжения, выполняя на поверхности конденсации канавки, покрывают поверхность гидрофобными веществами, ухудшающими смачиваемость поверхности для перехода от пленочной к капельной конденсации. Часто применяются специальные наклонные перегородки, отводящие конденсат и исключающие его стекание на ниже расположенные поверхности теплообмена, либо используется обрезание поверхности конденсации, позволяющее уменьшить толщину слоя конденсата.

Энергетика России в основном продолжает использовать гладкие кожухотрубные ТА, имеющие значительные размеры, высокую степень загрязненности и малый срок службы трубного пучка. Применение различного рода энергетического оборудования все возрастающей мощности приводит к увеличению термических и динамических нагрузок. Поэтому стремятся найти такие способы интенсификации теплообмена, которые позволяют уменьшать массогабаритные характеристики теплообменника без существенного увеличения затрат энергии на транспортировку теплоносителей. Для оценки качества ТА используют показатель энергетической эффективности $E=Q/(N_1+N_2)$, где Q – тепловая нагрузка (теплосъем) ТА; N_1 и N_2 – циркуляционные мощности для прокачивания соответственно горячего и холодного теплоносителей.

В конечном итоге, при выборе способа интенсификации принимают во внимание степень сложности его реализации, технико-экономический эффект от его введения и эксплуатационные характеристики поверх-

ности теплообмена: склонность к загрязнению, простота очистки, сохранение геометрической конфигурации канала, степень износа поверхности и др.

Проблемы снижения массогабаритных характеристик теплообменного оборудования и увеличения теплогидравлической эффективности для случая процесса конденсации паров на вертикальных трубах могут успешно решаться с помощью использования мелкодисперсных частиц, например, стеклянных шариков, которыми заполняют межтрубное или трубное пространство вертикального ТА. Проблема заключается в том, чтобы при $N_1 + N_2 = \text{const}$ уменьшить поверхность теплообмена.

Авторы настоящей работы в своих предыдущих исследованиях [1] по конденсации чистых паров различных фреонов на наружной поверхности вертикальной трубы, упакованной в засыпку из сферических частиц, показали, что зернистый слой выполняет функцию «насоса», откачивающего часть сконденсированной фазы от охлаждаемой поверхности. В результате этого толщина слоя конденсата уменьшается, а средний коэффициент теплоотдачи значительно возрастает по сравнению с конденсацией на гладкой вертикальной поверхности.

Результаты упомянутых исследований касаются жидкостей, достаточно хорошо смачивающих поверхность конденсации и зернистый материал. Для всех фреонов практически нет материала, который бы был не смачиваемым. Краевой угол смачивания близок к нулю. Поэтому за счет капиллярных и гравитационных сил отводимая часть сконденсированной фазы от поверхности конденсации

движется по поверхности зернистого материала в виде пленки.

Иначе может быть представлена картина течения по поверхности зернистого материала при отводе конденсата водяного пара. В технике часто используются насадки для тепло-массообменных аппаратов из гидрофобного материала, когда рабочим веществом выступает вода. Поверхность конденсации и пористой среды при фильтрации через зернистые слои для воды может быть практически полностью гидрофильной, когда краевой угол смачивания близок к нулю или частично гидрофобной при контактном угле, близком к 90° .

Экспериментальных исследований по изучению фазовых переходов водяного пара на поверхности, упакованной в зернистый материал с различными свойствами его поверхности, в литературе не обнаружено.

Целью работы является определение закономерности теплообмена при конденсации водяного пара на охлаждаемой вертикальной поверхности трубы, помещенной в зернистый материал с различным контакт-

ным углом смачивания. Проведены опыты процесса конденсации неподвижного водяного пара на вертикальных гладкой трубе и трубе, размещенной в зернистом слое. Экспериментальный стенд, на котором проводились исследования, описан в [2].

В ходе эксперимента измерялись параметры: температура поверхности трубы хромель-копелевыми термопарами, установленными в двух сечениях трубы; расход охлаждающей воды внутри трубы поплавковым расходомером объемным методом; температура воды на входе и выходе хромель-копелевыми термопарами; давление в стенде образцовым манометром. В качестве парогенератора использовался электрический нагреватель с регулировкой мощности от 0 до 6 кВт. Материал рабочих труб — медь. Размеры труб: рабочая длина — 400 мм, наружный диаметр — 8 мм. Зернистый слой состоял из стеклянных шариков диаметром 3,2 мм.

Краевой угол смачивания поверхности зернистого слоя в одном случае составлял $\sim 17\text{--}19^\circ$, а в другом — $87\text{--}90^\circ$. Таким

образом, можно с уверенностью говорить о практически полной смачиваемости поверхности стеклянных частиц для первого опыта и частично гидрофобной поверхности во втором эксперименте.

Перед проведением опытов методом мгновенного вскипания из рабочего объема стендда удалялись неконденсирующиеся примеси. Эксперименты на гладкой трубе проводились для проверки правильности методики измерений и чистоты рабочего вещества.

Результаты экспериментальных исследований представлены в координатах $Nu^* = f(Re)$ на рис. 1. Число Нуссельта, построенное по вязкостно-гравитационной постоянной, рассчитывалось по зависимости

$$Nu^* = (\bar{a}/\lambda)(v^2/g)^{1/3},$$

где второй множитель выступает в качестве некоторого масштаба линейного размера пленки конденсата (эквивалентный поперечный размер), а число Рейнольдса пленки определялось как $Re = ql/(\mu r)$, где в качестве линейного размера l для вертикальной трубы выступает ее длина L . Средний коэффици-

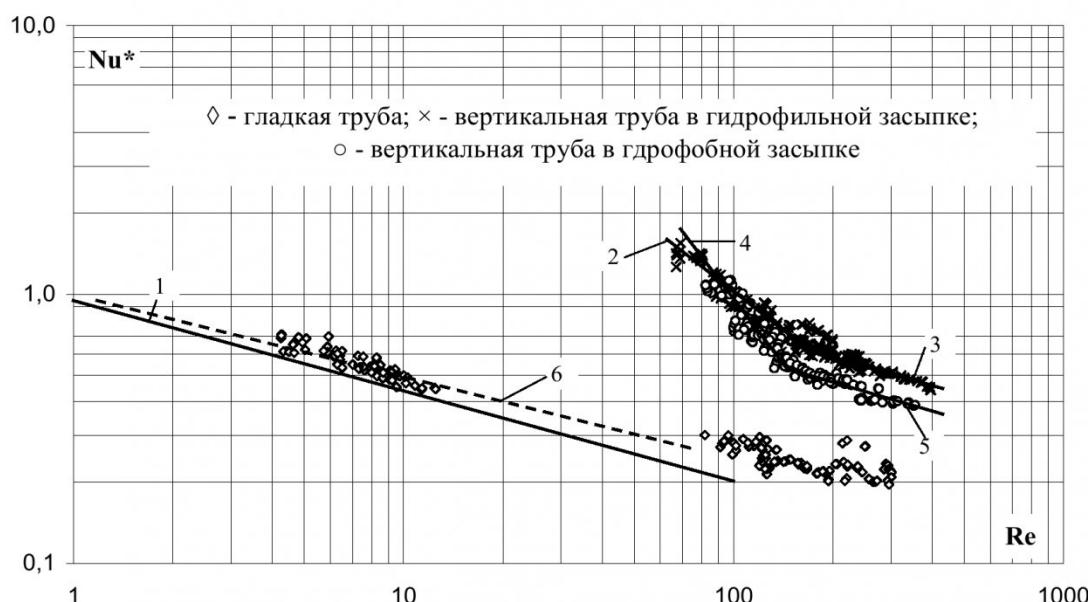


Рис. 1. Теплообмен при конденсации водяного пара на вертикальной трубе, упакованной в зернистый слой с различными свойствами поверхностей: 1 — расчет по зависимости $Nu^* = 0,95Re^{-1/3}$; 2, 3, 4, 5 — линии, осредняющие экспериментальные данные; 6 — экспериментальные данные других авторов

ент теплоотдачи рассчитывался по отношению измеряемого удельного теплового потока к температурному напору, определяемому как разность между температурой насыщенного пара T_s и температурой стенки трубы T_c , т.е. $\bar{a} = q/(T_s - T_c)$.

Можно отметить, что опытные данные по конденсации на гладких горизонтальной и вертикальной трубах удовлетворительно согласуются с теоретической зависимостью, предложенной Нуссельтом и опытными данными других авторов.

Значения безразмерного коэффициента теплоотдачи при конденсации на поверхности в засыпке, полученные для вертикальной трубы в диапазоне чисел Рейнольдса от 70 до 400, превышают значения Nu^* для гладкой трубы в 2-3 раза.

Что касается случая с гидрофильтрной засыпкой, для диапазона чисел $Re = 70-150$ коэффициент теплоотдачи соответствует закономерности $Nu^* \sim Re^{-1}$, а в диапазоне $Re = 150-400$ соответствует закономерности $Nu^* \sim Re^{-1/3}$. Повторяемость результатов исследований

достаточно устойчивая и переход от одной закономерности к другой происходит при числе Re , близком к 150 как при повышении теплового потока, так и в обратном направлении. Для случая же с частично гидрофобной засыпкой при контактном угле $87^\circ-90^\circ$ в диапазоне чисел $Re = 80-150$ коэффициент теплоотдачи соответствует закономерности $Nu^* \sim Re^{-5/3}$, а в диапазоне $Re = 150-350$ соответствует закономерности, как и с гидрофильтрной засыпкой, $Nu^* \sim Re^{-1/3}$. Здесь также хорошая повторяемость результатов как с увеличением так и с уменьшением тепловых потоков. Из графика видно, что безразмерный коэффициент теплоотдачи на вертикальной трубе с засыпкой из гидрофобных шариков при числах Рейнольдса более 90 меньше, чем для гидрофильтрной поверхности элементов засыпки. Необходимо отметить, что хотя и авторам не удалось получить данные при низких тепловых потоках (числа Рейнольдса менее 90), видна тенденция получения больших коэффициентов теплоотдачи при конденса-

ции водяного пара на вертикальной поверхности с засыпкой из гидрофобного зернистого материала, чем при гидрофильтрной засыпке.

Все режимы, полученные при исследовании теплообмена, объясняются гидродинамикой пленки по поверхности конденсации и течением в поровом пространстве зернистого материала в зависимости от массового расхода конденсата, свойств поверхности зернистого материала и удельного теплового потока.

Оценим среднюю толщину пленки δ жидкости сконденсированного водяного пара на гладкой вертикальной трубе при удельных тепловых потоках q от 123 до 318 кВт/м², полученных в эксперименте. Коэффициент теплоотдачи \bar{a} изменялся в пределах от 7.1 до 9.8 кВт/(м²·К). При оценке толщины пленки примем коэффициент теплопроводности λ воды при температуре насыщения. Расчет средней толщины пленки ведем по формуле $\delta = \lambda \Delta T / q$, где ΔT – температурный напор – разница между температурой

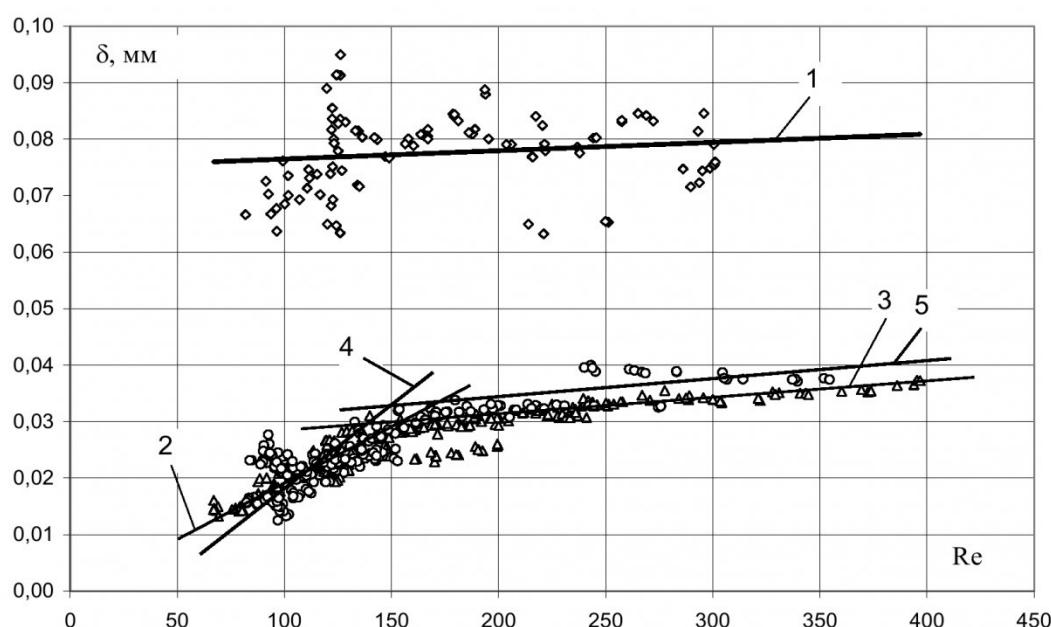


Рис. 2. Изменение средней толщины пленки при конденсации водяного пара на вертикальной трубе от числа Рейнольдса пленки

◊ – гладкая труба; Δ – труба в гидрофильтрной засыпке 3,2 мм; ○ – труба в частично гидрофобной засыпке 3,2 мм; 1, 2, 3, 4, 5 – линии, осредняющие экспериментальные данные

Таблица 1
Диапазоны изменения основных параметров при конденсации водяного пара на вертикальной трубе

Исследуемая поверхность	Температура насыщения T_s , °C	Удельный тепловой поток q , кВт/м ²	Коэффициент теплоотдачи α , кВт/(м ² ·К)	Температурный напор ΔT , К
Гладкая труба	100-138	123-318	7.1-9.8	12.0-38.9
Труба в гидрофильтном слое	101-139	105.6-415.6	18.3-48.3	2.1-22.7
Труба в гидрофобном слое	100.0-125.3	129.7-427.2	14.0-44.7	3.3-28.6

пленки жидкости на границе раздела пар-пленка (температура насыщения T_s) и температурой поверхности трубы T_c (стенки). Температурный напор изменялся от 12 до 38.9°C. При этом, средняя толщина пленки на гладкой вертикальной трубе была в пределах 62-95 мкм, а на трубе, находящейся в слое стеклянных шариков как гидрофильтрных, так и гидрофобных – 12-40 мкм. Зависимость средней толщины пленки от числа Рейнольдса представлена на рис. 2.

Число Рейнольдса пленки конденсата выражается через его массовый расход:

$$Re = \frac{\bar{\omega}\delta}{\nu} = \frac{G}{\mu} = \frac{\bar{\alpha}\Delta TL}{r\mu} = \frac{qL}{r\mu},$$

где G – плотность орошения – количество конденсата, протекающее через данное сечение на полосе 1 м, кг/(м·с); $\bar{\omega}$ – средняя скорость пленки, м/с; δ –

толщина пленки, м. Плотность орошения G при этом изменялась в пределах 0.022–0.06 кг/(м·с).

Диапазоны изменения основных параметров в ходе эксперимента см. в табл. 1.

На рис. 3 представлена зависимость удельного теплового потока от температурного напора при конденсации водяного пара на вертикальной гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой раздельно с гидрофильтрной и гидрофобной засыпкой.

Результаты опытов, полученные при конденсации водяного пара на поверхности вертикальной трубы, упакованной в зернистый слой, были проведены практически при тех же удельных тепловых потоках (числах Рейнольдса), что и на гладкой трубе, а значит и при тех же плотностях орошения.

Но коэффициент теплоотдачи для трубы в упакованном слое, как видно из рис. 1, был значительно выше. Так как $\bar{\alpha} \sim \delta^l$, при достаточно близкой к постоянной величине коэффициента теплопроводности воды в исследуемом диапазоне температур насыщения ($\lambda = 0.679-0.683$ Вт/м·К), можно говорить для условий засыпки о меньшей толщине пленки конденсата, являющейся термическим соотивлением в теплообмене. В работе авторов [2] было отмечено, что в местах контакта на экваториальном диаметре орошаемого шара осесимметричной струей воды с неорошаемыми шарами, происходит отток части жидкости на последние. В диапазонах чисел Рейнольдса 50-250, рассчитанных по плотности орошения на экваториальном диаметре шарика, относительная величина отводимой

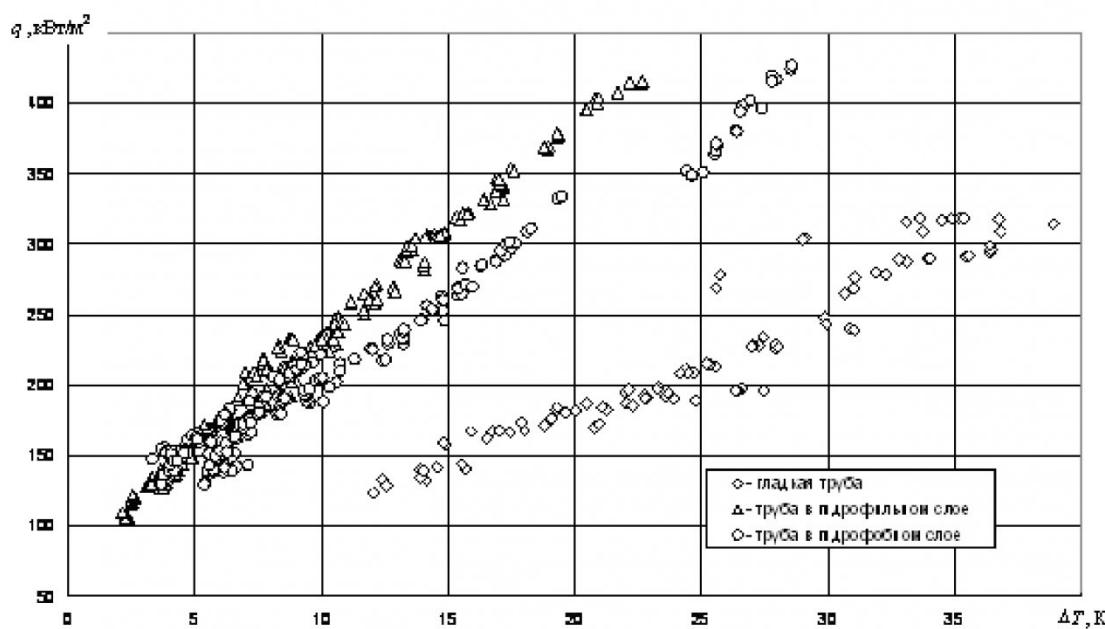


Рис. 3. Зависимость удельного теплового потока от температурного напора при конденсации водяного пара на гладкой вертикальной трубе и трубе в зернистом слое

части жидкости зависит как от числа контактов в слое, так и от числа слоев. В условиях проведенных исследований относительный отток конденсата колебался в диапазоне 7 до 65 % от общего расхода жидкости.

Рассмотрим закономерность теплообмена при конденсации водяного пара на вертикальной трубе, наружная поверхность которой соприкасается с неподвижным зернистым слоем толщиной более четырех диаметров сферических частиц, привлекая поведение сконденсированной части на поверхности конденсации и в поровом пространстве зернистого материала, описанное в работе [3]. Схема движения конденсата по вертикальной поверхности, упакованной в пористую среду, представлена на рис. 4.

По проведенной оценке средней толщины пленки конденсата (см. рис. 2) можно сказать, что она значительно меньше размера элемента зернистого слоя (диаметра шарика D), так что $\delta \ll D$.

В случае гидрофильтрной поверхности элементов засыпки (рис. 4, а), пленка за счет капиллярных сил подтягивается в местах контакта сферических

частиц, образуя своего рода вогнутые мениски. В результате поднятия части конденсата и удерживания его в многочисленных контактах сфер на поверхности конденсации, свободная поверхность конденсации заполнена конденсатной пленкой, толщина которой будет меньше, чем при теплообмене на гладкой поверхности при тех же тепловых потоках. Поверхность конденсации занимает значительно большую долю площади по сравнению с площадью, занятую областями контакта сфер.

Кроме того, на основе результатов работы [3] полагаем, что часть конденсата отводится от поверхности конденсации вглубь зернистого слоя (см. рис. 4, а), что также сказывается на уменьшении толщины пленки на охлаждаемой поверхности.

В работе авторов [4] показано, что в зависимости от расхода жидкости (конденсата) картина течения в окрестности боковой точки контакта существенно изменяется. При числе Рейнольдса, также рассчитанном по течению пленки на экваториальном диаметре и приблизительно равному 6-10, наблюдается безвихревое обтекание точки контакта. За точкой контакта образуется застойная зона, где скорость жидкости мала. При $Re = 10-24$ в этой зоне формируется вихревая пара, а при $Re = 24-83$ вихревая пара становится неустойчивой, что проявляется в осцилляции вихрей, амплитуда которой растет с увеличением расхода жидкости. При дальнейшем повышении чисел $Re > 83$ наблюдается срыв жидкости в виде стекающей между шарами свободной струи. При числах $Re \sim 100$ течение становится нестационарным и вихри срываются поочередно, образуя периодическую цепочку. При изучении однородного фильтрационного течения в кубической засыпке устойчивые вихревые образования в застойной области были зарегистрированы для $Re < 100$ в

[5].

Перечисленные выше факты позволяют полагать, что интенсификация теплообмена на вертикальной трубе, помещенной в зернистый слой обусловлена несколькими взаимосвязанными явлениями: 1 – капиллярным поднятием части жидкости в окрестности менисков, и как следствие, уменьшением средней толщины пленки; 2 – турбулизацией пленки в местах контакта шаров с поверхностью конденсации при $Re > 10$; 3 – отводом части жидкости пленки зернистым слоем и одновременно сопровождающимся срывом пленки в местах контакта сфер с поверхностью охлаждения при $Re > 83$.

Что касается случая, когда в качестве элементов зернистого материала применялись частично смачиваемые поверхности, то менее интенсивный теплообмен в сравнении с гидрофильтрной поверхностью засыпки объясняется более «толстой» пленкой на поверхности конденсации в присутствии слоя зерен в виде выпуклой поверхности пленки в области менисков (мест контактов шаров), как это показано на рис. 4, б. При этом толщина $\delta_{\text{фоб}}$ незначительно больше $\delta_{\text{фил}}$.

Средняя толщина пленки δ жидкости сконденсированного водяного пара на вертикальной трубе погруженной в зернистый слой из элементов с гидрофильтрной поверхностью засыпки изменилась в пределах 13-38 мкм при тепловых потоках, перекрывающих диапазон на гладкой трубе. С увеличением чисел Рейнольдса с 70 до 150 толщина пленки увеличилась с 13 до 29 мкм, а на гладкой трубе – с 62 до 78 мкм. Таким образом, при числах $Re \sim 70$ относительный отвод конденсата составлял 79%, и снизился до 63% при числах $Re \sim 150$. Интенсивность снижения относительного отвода жидкости зернистым слоем в этом диапазоне чисел Рейнольдса составляла 0.2% на каждую единицу Re . В диапазоне

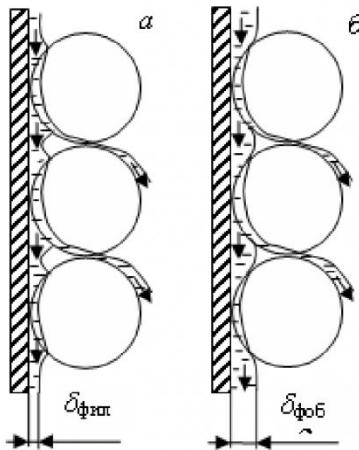


Рис. 4. Схема движения конденсата по вертикальной поверхности

а, б – случай для «тонких» пленок при гидрофильтрной и частично гидрофобной поверхности элементов зернистого материала, соответственно

чисел $Re = 150\text{-}400$ относительный отвод оставался постоянным и составлял 62-63% от общего количества образовывающегося конденсата. В связи с этим в первом интервале чисел Рейнольдса рост толщины пленки был более интенсивным, чем во втором интервале.

Анализ средней толщины пленки и относительного оттока конденсата в зернистый слой,

состоящий из элементов с частично смачиваемой поверхностью показывает подобную картину, что и с гидрофильтной засыпкой с тем лишь отличием, что рост толщины пленки, а следовательно, и снижение относительного отвода конденсата в этом случае происходит более интенсивнее в диапазоне чисел $Re = 70\text{-}150$.

Таким образом, зернистый

слой, нанесенный на вертикальную поверхность, оказывает существенное интенсифицирующее влияние на процесс теплообмена при конденсации водяного пара и при $N_1 + N_2 = \text{const}$ можно уменьшить поверхность теплообмена, т.е. сократить массогабаритные характеристики ТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Ю.О., Дворовенко И.В., Лазарев С.И., Петрик П.Т., Сердаков Г.С. Влияние зернистого слоя на пленочную конденсацию / Теплообмен в парогенераторах: Мат-лы Всес. конф., Новосибирск. 1988. С.366-372.
2. Петрик П.Т., Дадонов П.В., Дворовенко И.В., Богомолов А.Р. Теплообмен при конденсации хладона R227 на наклонных трубах, помещенных в зернистый слой. - ИФЖ. 2004. Т. 77. № 4. С. 76-78.
3. Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Гуцал К.В., Темникова Е.Ю. Гидродинамика в конденсаторах с зернистым слоем / Тематический выпуск: Труды II-го семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. Томск, 2002. Т.305, Вып. 2. С.66-71.
4. Белоусов А.П., Богомолов А.Р., Маркович Д.Д. Гидродинамическая структура двухфазного течения в окрестности точек контакта элементов шаровых засыпок. - Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т.11. № 3. С. 429-440.
5. Волков В.И., Мухин В.А., Накоряков В.Е. Исследование структуры течения в пористой среде. - ЖПХ. 1981. Т.54. № 4. С. 838-846.

□ Авторы статьи:

<p>Богомолов Александр Романович - канд. техн. наук, с.н.с. Института теплофизики СО РАН, доц. каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств»</p>	<p>Петрик Павел Трофимович - докт. техн. наук, проф., зав. каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств»</p>	<p>Дворовенко Игорь Викторович - канд. техн. наук, доц.каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств»</p>	<p>Богомолов Артем Александрович - аспирант каф. «Процессы, машины и аппараты химических производств»</p>
---	---	---	--

УДК 543.544+615.00

А.С. Сухих, П.В. Кузнецов

К ПРОБЛЕМЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГУМАТА НАТРИЯ (Aldrich, Германия) НА ПЕРЕШИТЫХ ПОЛИСАХАРИДНЫХ ГЕЛЯХ

По современным представлениям, гуминовые вещества (ГВ) вездесущи, они обнаруживаются даже в атмосферном воздухе и рассматриваются как мощные эндогенные загрязнители атмосферы, питьевой воды и т.д. [2,6].

Гумат натрия (ГМН) фирмы «Aldrich» (Германия), полученный еще в 90-е годы XX века из бурого угля, - один из немногих стандартизованных образцов

гуминовых кислот (ГК), активно используемый в химии ГВ в качестве вещества – стандарта [2]. Известно, что его химический состав изучался различными методами, в том числе и хроматографическими (гель-проникающая, ионообменная, высокоэффективная жидкостная хроматография) [1,3,4]. Так, по данным [12], в условиях аналитической обращенно-фазной высокоэффективной жидкост-

ной хроматографии (ВЭЖХ) ГМН хроматографируется в виде двух разделенных пиков, имеющих дополнительно сильное расщепление общей площади пиков. Интересно, что ГМН, после доочистки на сефадексе G-25, использовали для изучения фармакологических эффектов так называемого «синдрома чёрной ноги» [11]. В обзоре [2] показано, что ГМН Aldrich имеет молекулярную