

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

**УДК 536.24, 532.546**

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

### **ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ**

В теплоэнергетике, химической технологии и других областях техники находит широкое применение процесс конденсации пара на различных поверхностях.

Конденсация пара на гладких поверхностях изучена достаточно хорошо, а теоретические и экспериментальные исследования в этой области позволили расширить представления о процессах, происходящих при конденсации пара и создать методики для инженерных расчетов конденсационных устройств.

В последнее время в ряде областей техники приходится сталкиваться с конденсацией пара в узких щелях или на поверхностях, помещенных в пористую среду.

Для интенсификации теплотдачи при конденсации пара на практике часто используют оребрение поверхности теплообмена. При этом может происходить увеличение теплосъема за счет более развитой поверхности, за счет влияния капиллярных сил, которые приводят к локальному уменьшению толщины пленки конденсата, что положительно отражается на процессе теплообмена. С другой стороны, капиллярные эффекты могут сдерживать течение конденсата и отрицательно влиять на теплоотдачу.

Систематические экспериментальные исследования по теплообмену при пленочной конденсации пара на оребренной поверхности были представлены, в частности, в работах [1,2]. Авторами указанных

работ было показано, что при конденсации на пакетах оребренных труб наибольшая интенсификация теплосъема имеет место на трубах с безразмерным расстоянием между ребрами в диапазоне  $0.4 < \bar{a} = a/l < 1$ , где  $a$  – расстояние между ребрами, м;  $l = \sqrt{\sigma / (\rho' - \rho'')} g$  – капиллярная постоянная жидкости, м;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho', \rho''$  – плотность жидкости и пара, кг/м<sup>3</sup>.

При конденсации ходильных и криогенных жидкостей можно добиться интенсификации теплосъема на порядок с помощью оребрения по сравнению с пакетом гладких труб, так как при больших плотностях теплового потока высота удерживающегося слоя жидкости в межреберной впадине уменьшается. При значениях  $\bar{a} < 0.4$  и числах Рейнольдса пленки  $10 < Re < 50$  происходит полное затопление межреберной впадины, а при  $Re > 50$  наблюдается увеличение высоты слоя жидкости, удерживающейся в межреберной впадине.

Дополнительное затопление межреберных впадин с увеличением числа Рейнольдса для горизонтальных труб с параметром  $\bar{a} < 0.4$  приводит к существенному ухудшению теплообмена при конденсации пара на пакетах.

В упомянутых работах [1,2] представлена зависимость средней безразмерной высоты затопления  $\hat{H}/l$  от обратной вели-

чины безразмерного расстояния между ребрами  $\bar{a}$ , полученная при обобщении данных при конденсации хладона R12 и при моделировании процесса конденсации орошением. Для значения  $\bar{a} < 1$  высота удерживающегося на цилиндре слоя жидкости хорошо совпадает с высотой капиллярного поднятия жидкости в бесконечной вертикальной щели с шириной, равной расстоянию между ребрами и описывается зависимостью  $\hat{H}/l = 2 \bar{a}^{-1}$ . Для значений  $\bar{a} \geq 1$  высота затопления боковой поверхности ребра не зависит от расстояния между ребрами и равна значению  $\hat{H}/l = 2$ . Имеет место четкий переход одной области зависимости в другую.

В технике распространено явление взаимодействия системы дисперсных тел с протекающей через эту систему средой – жидкостью или газом. Эти системы называют зернистыми или пористыми слоями.

Насадки аппаратов, используемые в технике, часто представляют собой монодисперсные слои, состоящие из одинаковых и близких по размерам сферических элементов.

Реальные зернистые слои редко бывают упорядоченными. Средняя концентрация  $\tau$  случайной засыпки шаров зависит от способа образования слоя, но незначительно. В обычных условиях, если не принимать специальных мер, случайная упаковка одинаковых шаров характеризуется средней концентрацией, близкой к  $\tau = 0.6$  и порозностью (пористостью)  $\varepsilon = 1 -$

$\tau=0.4$  [3,4]. Опыты, проведенные авторами представляемой работы подтвердили, что порозность случайной упаковки (стандартный случай) близка к значению  $\varepsilon=0.4$ .

Случайные упаковки значительно более изотропны, чем упорядоченные. В однородной изотропной среде плоскости равноправны и использование в качестве определяющего лишь одного параметра  $\tau$  оправдано. В [3-5] показано, что среднее проходное сечение в зернистом слое составляет величину  $\varepsilon$  и определяет среднюю расходную скорость. Обычно слой частиц рассматривается либо как система каналов (каналов) с гидравлическим диаметром  $d_3$  (внутренняя задача), либо как совокупность обтекаемых частиц (внешняя задача) [4]. В настоящее время наиболее распространенной является канальная модель. В монографии [3] эта модель принята за основу.

Одним из важных свойств

зернистого материала является проницаемость, которая представляет собой проводимость слоя по отношению к жидкости.

Известно много попыток создать теорию, связывающую геометрическую структуру пористого материала с проницаемостью.

В [6] приведена теория Коэзени, в которой пористая среда представляется в виде связки капиллярных трубок равной длины. Поперечное сечение трубок может быть произвольным.

Авторы работы [7] представили процессы конденсации пара, протекающие в сложных условиях, таких как конденсация на поверхности, упакованной в зернистый слой, в виде узкой щели и получили теоретические зависимости, описывающие такие процессы и совпадающие с результатами теоретической работы [8] по пленочной конденсации на наклонной поверхности в пористой среде.

Таким образом, зернистый

материал, плотно находящийся на охлаждаемой поверхности, на которой происходит процесс конденсации пара, можно представить в виде ребер, расположенных на конденсационной поверхности, а поровое пространство является геометрической характеристикой – межреберным пространством. В зависимости от материала зернистого слоя эти ребра могут быть как хорошо теплопроводными, так и нет.

Необходимо отметить, что контакт элементов зернистого материала с поверхностью конденсации пренебрежимо мал, поэтому можно считать, что материал частиц слоя не оказывает существенного влияния на процесс теплообмена.

Это подтверждено в работе [9], где исследовалось влияние теплопроводности частиц зернистого слоя на интенсивность теплообмена. Опыты со слоями, состоящими раздельно из стеклянных и стальных шариков одинакового размера ( $D = 3.2$  мм), отличающимися теплопро-

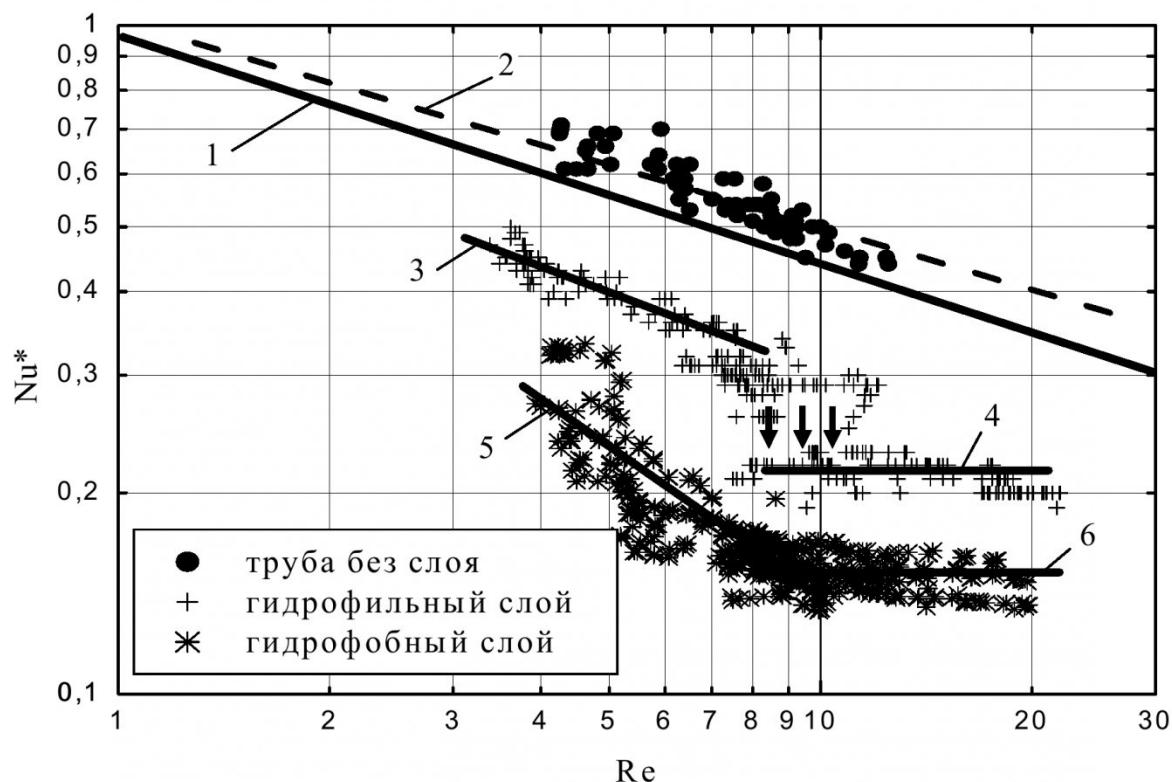


Рис. 1. Теплообмен при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе, погруженной в зернистый слой с различными свойствами поверхности: 1 – расчет по зависимости  $Nu^*=0.95Re^{-1}$ ; 2 – экспериментальные данные других авторов; 3, 4, 5, 6 – линии, осредняющие экспериментальные данные

водностью материала более чем в 40 раз, показали, со стальными шариками теплообмен интенсивнее примерно на 30%.

Авторы настоящей работы в своих предыдущих исследованиях [9,10] по конденсации чистого пара различных фреонов на наружных поверхностях труб (вертикальных, горизонтальных, наклонных), упакованных в засыпку из сферических частиц показали, что зернистый слой выполняет роль «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 поверхности без засыпки.

Результаты упомянутых исследований касаются жидкостей, достаточно хорошо смачивающих поверхность конденсации и зернистый материал. Для всех фреонов краевой угол смачивания близок к нулю, поэтому отводимая часть сконденсированной фазы от поверхности конденсации движется внутри порового пространства зернистого материала в виде пленки.

Целью работы является определение закономерности теплообмена при конденсации водяного пара на охлаждаемой горизонтальной поверхности трубы, помещенной в монодисперсный зернистый материал, состоящий из стеклянных шариков диаметром 3.2 мм, имеющих различный контактный угол смачивания. В первом случае поверхность засыпки имела угол смачивания  $\theta = 17-19^\circ$ , а во втором  $\theta = 87-90^\circ$ . Краевой угол смачивания  $\theta = 87-90^\circ$  для стеклянной поверхности элементов засыпки был получен модифицированием поверхности по методике, представленной в работе [11], а  $\theta = 17-19^\circ$  – это угол смачивания стеклянной поверхности элементов слоя без какой-либо дополнительной обработки. Шероховатость модифицированной

поверхности и поверхности элементов слоя без обработки была одинакова. Измерения краевых углов смачивания при контакте воды и стекла проводились при температуре 25°C в атмосфере воздуха. Процесс конденсации водяного пара проводили в диапазоне температур насыщения  $T_s=100-140^\circ\text{C}$ . В [12] при обзоре экспериментальных исследований температурной зависимости краевых углов показано на постоянство краевых углов смачивания воды на кварце при изменении температуры от комнатной до 200°C. Таким образом можно принять, что при исследовании процесса конденсации водяного пара краевой угол смачивания воды на стеклянной поверхности элементов засыпки оставался неизменным для наших двух случаев.

Методика проведения измерений и эксперимента, схема экспериментального стенда достаточно подробно описаны в работе [10]. Результаты экспериментальных исследований представлены в координатах  $\text{Nu}^*=\text{f}(\text{Re})$  на рис. 1. Число Нуссельта рассчитывалось по зависимости

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

где второй множитель выступает в качестве некоторого масштаба линейного размера пленки конденсата. Число Рейнольдса пленки определялось как  $\text{Re}=ql/(\mu r)$ , где в качестве линейного размера  $l$  для горизонтальной трубы выступает периметр ее окружности  $\pi D$ . Средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  рассчитывался по отношению измеряемого удельного теплового потока  $q$  к температурному напору  $\Delta T$ , определяемому как разность между температурой насыщенного пара  $T_s$  и температурой стенки трубы  $T_c$ , т.е.

$$\bar{\alpha} = q/\Delta T = q/(T_s - T_c).$$

Как видно из рис. 1, опытные данные по конденсации на

гладкой горизонтальной трубе удовлетворительно согласуются с теоретической зависимостью, предложенной Нуссельтом и опытными данными других авторов.

Для процесса конденсации на горизонтальной трубе в условиях хорошо смачиваемого зернистого слоя при  $\theta = 17-19^\circ$  имеет место три диапазона чисел  $\text{Re}$ , где закономерность теплообмена отличается одна от другой. При  $\text{Re}$  пленки от 3.5 до 8 с увеличением теплового потока безразмерный коэффициент теплоотдачи уменьшается пропорционально  $\text{Re}^{-1/3}$  с точностью до постоянной. В диапазоне чисел  $\text{Re} = 8-12$  коэффициент теплоотдачи не зависит от  $\text{Re}$ . Но в указанном диапазоне с увеличением теплового потока происходит скачкообразное снижение числа  $\text{Nu}^*$ , причем случайным образом. Это может произойти и при числе Рейнольдса как 8 или 12, так и при любом его значении в указанном диапазоне. При дальнейшем увеличении теплового потока, начиная с числа  $\text{Re} = 8-12$  и вплоть до  $\text{Re} = 22$ , безразмерный коэффициент теплоотдачи практически не изменяется и остается равным постоянной величине  $\text{Nu}^* = 0.21$ .

В условиях слабой смачиваемости поверхности зернистого слоя при  $\theta = 87^\circ-90^\circ$  процесс конденсации водяного пара характеризуется двумя режимами, и как следствие, закономерностями в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса от 4 до 20.

Характерно, что в диапазоне чисел от 4 до 8 коэффициент теплоотдачи уменьшается пропорционально  $\text{Re}^{-1}$ . Численные значения безразмерного коэффициента теплоотдачи находятся ниже значений, соответствующих процессу конденсации в присутствии гидрофильного слоя. Начиная с чисел Рейнольдса, больших 8, с увеличением теплового потока безразмерный коэффициент теплоотдачи остается постоянным и

Таблица 1

Диапазоны изменения основных параметров при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе

Исследуемая поверхность	Температура насыщения $T_s, ^\circ\text{C}$	Удельный тепловой поток $q, \text{kVt}/\text{м}^2$	Коэффициент теплоотдачи $\alpha, \text{kVt}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	Температурный напор $\Delta T, \text{K}$
Гладкая труба	100-120	95-272	15,4-24,4	3,78-17,65
Труба в гидрофильтрном слое	100-140	83-360	7-16	5-44
Труба в гидрофобном слое	102-140	92-330	4,5-11	9-62

равным 0,15 вплоть до чисел Рейнольдса, равных 20. Видно, что теплообмен происходит хуже, чем в засыпке при хорошей смачиваемости поверхности.

Необходимо отметить, что интенсификации процесса теплообмена при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе, помещенной в зернистую среду как хорошо смачиваемую, так и частично, не происходит в исследуемом диапазоне тепловых потоков (чисел Re). Кроме того, если процесс конденсации водяного пара проводить, начиная с больших тепловых потоков с постепенным уменьшением тепловой нагрузки, безразмерный коэффициент теплоот-

дачи практически остается постоянным (для гидрофобного слоя он равен 0,15, а для гидрофильтрного – 0,21) и процесс не следует закономерностям, соответствующим процессу при увеличении тепловых потоков, начиная с малых. Дополнительно можно отметить, что процессы теплообмена, описанные для горизонтальной трубы, достаточно неустойчивы и проявляются в большом разбросе экспериментальных данных по числу Нуссельта в указанном диапазоне чисел Рейнольдса.

Оценим среднюю толщину пленки  $\delta$  жидкости сконденсированного водяного пара на гладкой горизонтальной трубе и трубе в слое с различными

свойствами поверхности элементов засыпки. Диапазоны изменения основных параметров в ходе эксперимента представлены в табл. 1.

При оценке толщины пленки примем коэффициент теплопроводности  $\lambda$  воды при температуре насыщения. Расчет средней толщины пленки проведем по формуле  $\delta = \lambda \Delta T / q$ . Зависимость условно-средней толщины пленки от числа Рейнольдса представлена на рис. 2.

Для гладкой горизонтальной трубы в действительности стекание конденсата происходит периодически, отдельными каплями, что не отражается на средней теплоотдаче по всей

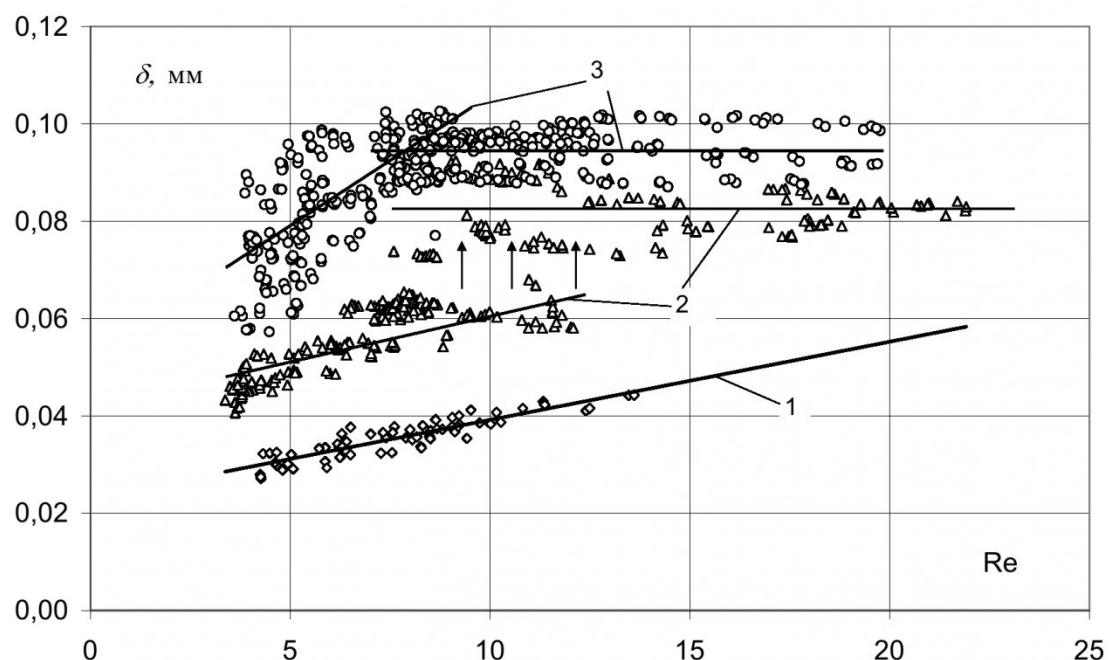


Рис. 2. Изменение условно-средней толщины пленки при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе от Re пленки:  $\diamond$  – гладкая труба;  $\Delta$  – труба в гидрофильтрной засыпке 3,2 мм;  $\square$  – труба в частично гидрофобной засыпке 3,2 мм; 1, 2, 3 – линии, осредняющие экспериментальные данные в различных диапазонах чисел Re

трубе, поскольку число капель велико и течение в среднем сохраняется симметричным. На верхней образующей трубы толщина пленки конденсата имеет конечное значение. На рис. 2 для гладкой горизонтальной трубы представлены расчетные средние толщины пленки, которые в диапазоне чисел  $Re = 4-14$  изменяются в пределах от 27 до 43 мкм. Представленное изменение толщины пленки при конденсации на горизонтальной трубе, упакованной в гидрофильтруюю или частично гидрофобную засыпку, носит качественный или демонстрационный характер и не несет действительной картины толщин пленки, а говорит о количестве конденсата, распределенного на трубе.

Здесь важно обратить внимание на различный характер зависимости условно-средней толщины пленки от числа Рейнольдса.

Если для частично гидрофобной засыпки в диапазоне чисел  $Re = 4-8$  прослеживается зависимость  $\delta \sim Re$ , то для гидрофильтрной она соответствует близкой к  $\delta \sim Re^{1/3}$ , причем условно-средние толщины пленки больше для частично гидрофобной поверхности шаров.

Таким образом, качественно можно говорить о меньшем количестве находящегося конденсата на трубе с гидрофильтрной засыпкой при одинаковых тепловых потоках.

Кроме того, рост количества конденсата с увеличением теплового потока, более интенсивно происходит в присутствии частично гидрофобной засыпки. Для гидрофильтрной засыпки в диапазоне  $Re = 8-12$  происходит скачкообразное увеличение количества удерживаемого конденсата. При  $Re > 8-12$ , вплоть до  $Re = 22$ , количество удерживаемого конденсата остается практически постоянным. Количество конденсата для гидрофильтрного материала упаковки меньше, чем для частично гидрофобного на 10%, но больше,

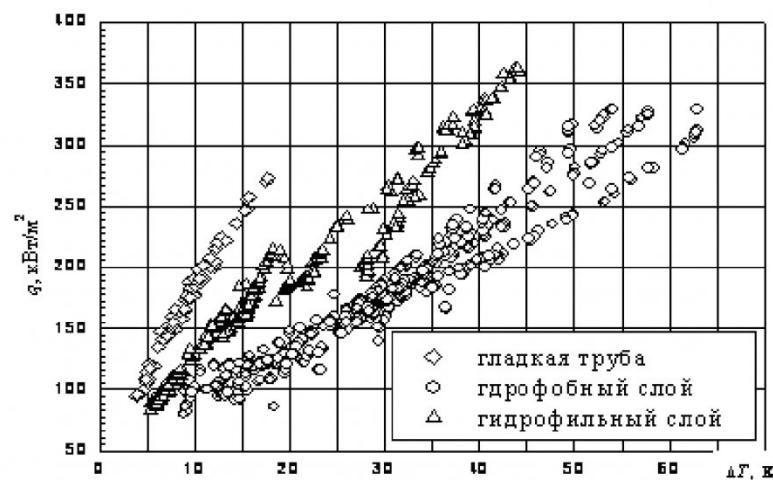


Рис. 3. Зависимость удельного теплового потока от температурного напора при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе

чем на гладкой трубе примерно в 2 раза.

На рис. 3 представлена зависимость удельного теплового потока от температурного напора при конденсации водяного пара на горизонтальной гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слойдельно с гидрофильтрной и гидрофобной засыпке.

Задача о теплообмене при пленочной конденсации пара на горизонтальной трубе, помещенной в зернистый слой, значительно усложняется существованием влияния сил поверхностного натяжения на гидродинамику конденсатной пленки.

Пористую структуру или стеклянную засыпку можно представить как искусственное обременение поверхности конденсации трубы.

Ребро будем считать нетеплопроводным по сравнению с медной поверхностью трубы, так как теплопроводность меди в 400 раз превышает теплопроводность стекла. Однако зернистый материал может оказывать существенное влияние на теплообмен способностью удерживать между шариками часть конденсирующейся жидкости, который может исключать из теплообмена значительную долю общей поверхности теплообмена.

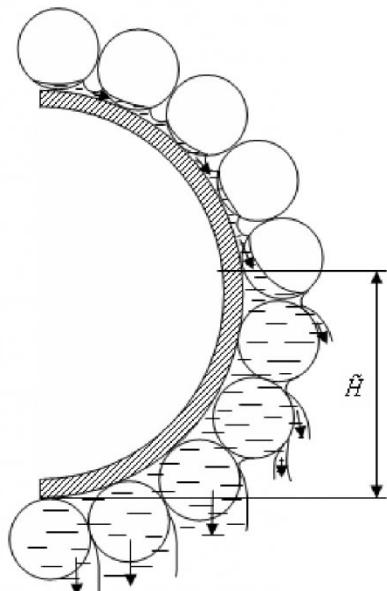


Рис. 4. Схема движения конденсата на горизонтальной трубе в присутствии гидрофильтрной поверхности элементов зернистого материала

Схема течения конденсата на горизонтальной трубе в присутствии зернистого материала представлена на рис. 4.

За расстояние между ребрами  $a$  примем размер, равный  $\varepsilon D$ . Безразмерное расстояние между ребрами согласно работ [1, 2] при температуре насыщения  $T_s = 140^\circ C$  согласно зависимости

$$\tilde{a} = \varepsilon D / l = \varepsilon D / \sqrt{\sigma / (\rho' - \rho'')} g$$

для воды равно 0.54. По зависимости для средней безразмерной высоты затопления  $\tilde{H}/l = 2\tilde{a}^{-1}$  при  $\tilde{a} < 1$  определим среднюю высоту затопления зернистого слоя, которая равна ( $l = 2.45$  мм) 9.07 мм, т.е. практически вся труба должна быть затоплена конденсатом.

Зернистый слой, уложенный на боковой поверхности трубы, на основании результатов работы [9] выполняет роль насоса, перемещающего радиально часть конденсата от поверхности конденсации. Вследствие этого затопленной может быть не вся труба, а только часть ее.

Таким образом, согласно опытным данным авторов [1,2,9] в нашем случае около 1/2 диаметра трубы  $D_{tr}$  будет затоплена конденсатом, как показано на рис. 4.

Такой режим течения подтверждает наши данные по теплообмену. Зернистый слой с точки зрения интенсифицирующего фактора по теплообмену при конденсации водяного пара на горизонтальных трубах, как это имеет место для фреонов [6], является непригодным.

Меньший коэффициент теплоотдачи в присутствии частично гидрофобного слоя по

сравнению с гидрофильным в исследуемом диапазоне тепловых потоков на горизонтальной трубе, полагаем, связан с большей толщиной пленки в верхней части трубы из-за наличия выпуклых менисков, и как следствие, увеличенной средней толщиной пленки.

Отличие закономерностей теплообмена с различными свойствами поверхностей зернистого материала при небольших числах  $Re = 3.5-8$  связано с различием гидродинамики течения сконденсированной части водяного пара в слое.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гогонин И.И., Кабов О.А. Экспериментальное исследование теплообмена и капиллярного удерживания жидкости при конденсации неподвижного пара на горизонтальном оребренном цилиндре / Современные проблемы теплофизики: Материалы III Всесоюз. шк. молодых ученых и специалистов, Новосибирск, 1984. С. 21-28.
2. Гогонин И.И., Кабов О.А. Пленочная конденсация пара на пакетах оребренных труб / Теплофизика и гидродинамика в процессах кипения и конденсации: Сб. науч. тр. Новосибирск, 1985. С. 81-90.
3. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. 512 с.
4. Гольдштник М.А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск, 1984. 164 с.
5. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. 351 с.
6. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды.- М.: Гостоптехиздат, 1960. 250 с.
7. Накоряков В.Е., Мухин В.А., Петрик П.Т. Теплообмен при конденсации неподвижного пара в узких щелях. / Тепломассоперенос при испарении: Сб. научн. тр. Новосибирск, 1982. С. 61-69.
8. Cheng P. Film condensation along an inclined surface in a porous medium. – Int. J. Heat Mass Transfer, 1981. V. 24. № 6. P. 983-990.
9. Афанасьев Ю.О., Дворовенко И.В., Лазарев С.И., Петрик П.Т., Сердаков Г.С. Влияние зернистого слоя на пленочную конденсацию / Теплообмен в парогенераторах: Материалы Всесоюз. конф., Новосибирск, 1988. С. 366-372.
10. 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.
11. Богомолов А.Р., Петрик П.Т., Азиханов С.С., Темникова Е.Ю. О модифицировании стеклянных поверхностей. – Теплофизика и аэромеханика, 2002. Т. 9. № 3. С. 477-480.
12. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. 232 с.

□ Авторы статьи:

Богомолов Александр Романович - канд. техн. наук, с.н.с. Института теплофизики СО РАН, доц. каф. «Про- цессы, машины и аппараты химических производств»	Петрик Павел Трофимович - докт. техн. наук, проф., зав. каф. «Процессы, ма- шины и аппараты химиче- ских производств»	Дворовенко Игорь Викторович - канд. техн. наук, доц. каф. «Процессы, машины и аппараты химических про- изводств»	Богомолов Артем Александрович - аспирант каф. «Процес- сы, машины и аппараты химических производств»
---	--	---	--