

# РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ СКОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА, ПОМЕЩЕННОЙ В ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ

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

При тепло и массопереносе в пористой среде существенную роль играет гидродинамика жидкости. Различные режимы течения жидкости могут существенно влиять на эффективность процессов. Теплообмен при конденсации пара на трубах в зернистом слое в зависимости от характера течения сконденсированной фазы может осуществляться, как с интенсификацией процесса, так и наоборот - с ухудшением. Интенсификация теплопереноса происходит вследствие оттока конденсата от охлаждаемой поверхности [1]. Ухудшение может происходить за счет преобладающего влияния капиллярных сил над гравитационными при тении жидкости в пористой среде. В результате происходит увеличение толщины пленки конденсата, следовательно, и термического сопротивления.

При экспериментальном исследовании гидродинамики жидкости от вертикального цилиндра и вертикальной пластины, упакованных в зернистый слой, было показано, что распределение жидкости в объеме слоя имеет сложный волновой характер [2]. Зернистый слой состоял из стеклянных сферических частиц диаметром 0,8 и 1,1 мм. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду. Были получены данные о распределении жидкости по объему слоя. Определить характер и режим течения жидкости в слое не представлялось возможным.

Целью данной работы является попытка объяснить природу работы зернистого слоя как фильтрационной структуры, способствующей интенсификации теплообмена при конденсации пара, либо снижению эффективности теплообмена, а также попытка получить карту режимов течения жидкости в зернистом слое. Для этого авторы разделили задачу на несколько подзадач:

- количественной и качественной оценки механизма течения конденсата в зернистом слое;
- визуального изучения режимов течения жидкости через монослой зернистого материала в плоском канале с прозрачными стенками;
- исследования влияния краевого угла смачивания, геометрических характеристик

зернистой структуры, физических параметров жидкости на гидродинамику;

- установления зависимости режимов течения от перечисленных параметров.

Для исследования структуры течения жидкости в данных условиях были созданы физические модели, которые позволили визуально определять картину потоков и количественно – распределение их по объему [2-4].

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Рабочая жидкость из бака постоянного уровня 2 через ротаметр 4 и сопло 6 подавалась на рабочий участок 1. Проходя через рабочий участок, стекала в сепаратор 5. Рабочий участок представляет собой щель, образованную из двух параллельных друг другу пластин из органического стекла размером 100×100 мм, между которыми помещался тщательно уложенный монодисперсный слой шариков. В качестве рабочего вещества использовались дистиллированная вода и этиловый спирт.

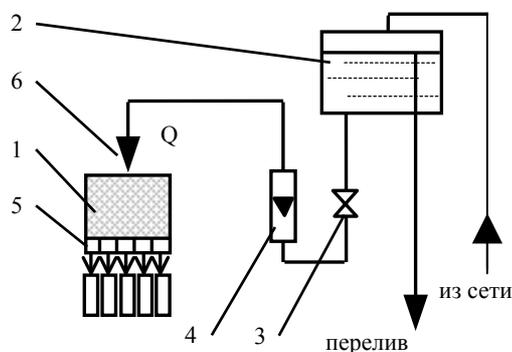


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики жидкости в щелевом канале

В ходе эксперимента использовались гидрофильные и гидрофобные стеклянные поверхности диаметром 1,1 и 3,2 мм и пластмассовые диаметром 6,8 и 10 мм. Краевой угол смачивания для жидкостей на исследуемых поверхностях сфер изменялся от 3° до 87°. Сепаратор состоял из 10 отделений. Жидкость подавалась в центр верхней кромки щели. Эксперименты проводились в прямом (увеличивая расход) и в обратном

## РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ СКОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА, ПОМЕЩЕННОЙ В ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ

(уменьшая расход) направлении. Расход жидкости регулировался вентилем 3. Максимальный расход ограничивался переливом жидкости из щели. Перед началом эксперимента зернистый слой смачивался рабочей жидкостью. Предварительное смачивание позволяло в любой точке зернистой структуры за счет капиллярных и иных сил иметь связанную влагу (начальную насыщенность) в соответствии с геометрией и поверхностными явлениями, которая не участвовала в процессе течения движущейся жидкости и не оказывала влияние на общую насыщенность.

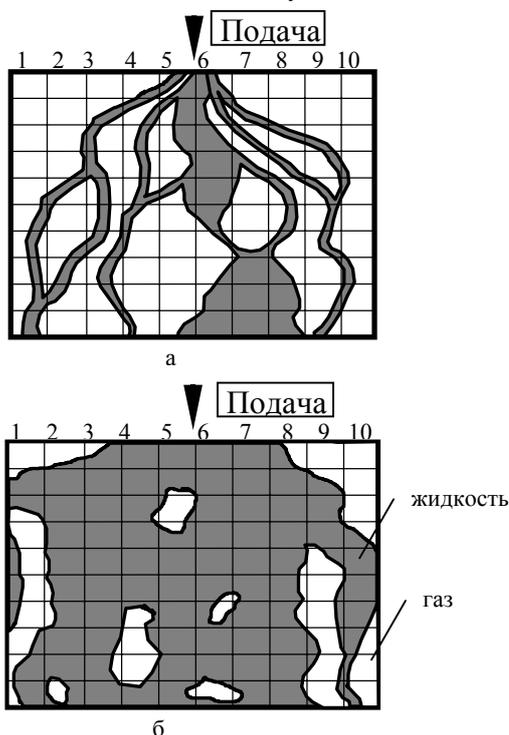


Рис.2. Профиль течения при максимальных расходах жидкости: а - на гидрофильной, б - на гидрофобной поверхности (прямой ход)

Во время опытов определялся расход жидкости в каждом отделении сепаратора  $Q_n$  объемным методом, а также наблюдался и фиксировался профиль течения жидкости при прямом и обратном ходе эксперимента. В случае с шариками  $d=3,2$ мм (вода), уложенными плотно упорядочено по сторонам правильного шестиугольника или по сторонам квадрата, наблюдался режим струйного течения жидкости (жидкость течет в виде отдельных струй) на гидрофильных поверхностях (рис.2,а), и квазифильтрационный режим (жидкость заполняет практически все свободное пространство и течет сплошным потоком) на гидрофобной поверхности (рис.2,б).

В ходе эксперимента на сферах  $d=10$  мм были зафиксированы пленочный и эжекционный режимы течения. При пленочном режиме жидкость стекала тонкой пленкой по поверхности сфер, при эжекционном – жидкость захватывала пузырьки воздуха и транспортировала вниз по течению. В эксперименте на сферах  $d=3,2$  мм (спирт) был получен режим эжекции. Отмечено, что режимы течения зависят от: свойств рабочей жидкости, краевого угла смачивания, размера и материала частиц и др. По профилям течения определялась насыщенность жидкости  $S$  через отношение объемов жидкой фазы, находящейся в канале, к свободному объему канала.

На рис.3 представлены зависимости  $S$  от критерия  $Re$ .

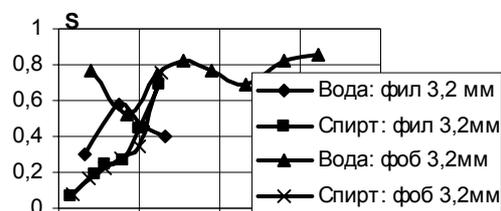


Рис.3. Зависимость насыщенности зернистого слоя от критерия Рейнольдса

Максимальный расход жидкости (вода и спирт) для гидрофобной засыпки, как видно из рис. 3, который ограничивался началом перелива через верхнюю грань канала, примерно в два раза выше, чем для гидрофильной засыпки.

Соответственно этому и насыщенность для воды отличается в такой же пропорции. Для спирта, т.к. режим течения был эжекционный, сопротивление слоя потоку резко возрастало, следовательно, перелив наступал значительно раньше. Измерение расходов по ширине участка в нижней части канала производилось сепарационным устройством 5. Распределение жидкости в нижней части рабочего участка носит волновой характер и зависит от траектории струй, либо от расположения небольших пустот при квазифильтрационном режиме течения. Обращает внимание тот факт, что для гидрофобной и гидрофильной матрицы с увеличением расхода вначале происходит увеличение относительного отвода в центральных пятом-шестом отделениях сепаратора, а затем его снижение. При рассмотрении двухфазного движения (жидкость-твердое тело или газ-твердое тело) гидродинамика описывается уравнением [5]:

$$\varepsilon\rho \frac{dV_i}{d\tau} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial P_{ij}^T}{\partial x_j} + \mu\Delta V_i - F_i + \varepsilon\rho g_i \quad (1)$$

Т.к. в нашем случае рассматривается трехфазная система (жидкость-газ-твердое тело), то данное уравнение не может описать движение потоков с учетом поверхностных сил. Применяв теорию подобия и метод анализа размерностей, получили в общем виде следующую критериальную зависимость:

$$Eu = f(Re, We, Str, \cos\theta). \quad (2)$$

За характерный линейный размер приняли проницаемость среды, которую рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2}.$$

Т.к. в экспериментах рассматривается стационарный процесс, критерием Str можно пренебречь. Тогда зависимость запишется в виде:

$$Eu = f(Re, We, \cos\theta). \quad (3)$$

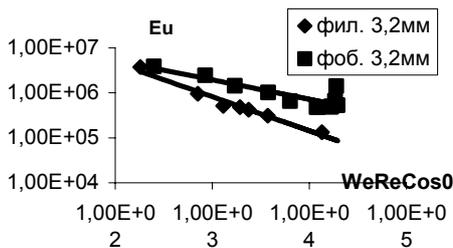


Рис. 4 Зависимость критерия  $Eu$  от комплекса  $WeReCos\theta$  (вода)

На рис. 4 представлена в графическом виде зависимость (3) для воды.

Во всем диапазоне измерений для гидрофильной поверхности наблюдалось струйное течение, а для гидрофобной – квазифильтрационное.

На основании полученных первичных данных можно сделать следующие выводы:

- полученные профили течения жидкости (вода) на сферах  $d=3,2\text{мм}$  свидетельствуют о наличии: струйного течения в зернистом слое с гидрофильной поверхностью; фильтрационного в слое с гидрофобной поверхностью; при тех же скоростях подачи жидкости на сферах  $d=10\text{ мм}$  - пленочного и режима эжекции;

- полученная картина течения жидкости (спирт) на сферах  $d=3,2\text{мм}$  свидетельствуют о наличии эжекционного течения;

- на сферах  $d=6,8\text{мм}$  со спиртом получено пленочное течение, которое при увеличении скорости подачи жидкости перешло в эжекционное;

- краевой угол смачивания оказывает большое влияние на гидродинамику жидкости;

- пропускная способность зернистого слоя с гидрофильной поверхностью примерно в два раза меньше, чем с гидрофобной;

- насыщенность в щели в случае с гидрофильной поверхностью (для воды) в 2 раза меньше, чем в случае с гидрофобной;

- при использовании гидрофобной поверхности (для воды) при обратном ходе эксперимента изменение расхода практически не оказывает существенного влияния на режим течения, который остается квазифильтрационным до достижения минимального расхода;

- в случае с гидрофильной поверхностью жидкость (вода) выбирает пути течения случайным образом. В процессе обратного хода эксперимента сохраняется струйный режим течения с тенденцией уменьшения насыщенности до начального состояния.

В заключении можно отметить, что режимы течения жидкости в зернистой среде применительно к поверхностям, помещенным в зернистый слой, могут оказывать влияние на работу теплообменников как в сторону интенсификации, так и в сторону ухудшения (квазифильтрационный), когда жидкость движется сплошным потоком, примыкая к теплообменной поверхности. Это приведет к многократному увеличению толщины слоя жидкости на поверхности теплообмена, и, следовательно, к росту термического сопротивления.

Получение карты режимов течения жидкости в зернистой среде для вышеуказанных условий является актуальной задачей, и рис. 4 – это первая попытка авторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

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: Материалы Всесоюзной конференции – Новосибирск, 1988. -С.366-372.

2. Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Гуцал К.В., Темникова Е.Ю. Гидродинамика в конденсаторах с зернистым слоем // Известия Томского политехнического университета – Томск, 2002, Вып. 2, Т.305. - С. 66-71.

3. Азиханов С.С., Тубольцева О.А. О пленочном обтекании сферической поверхности, имеющей контакты с другими сферическими поверхностями // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: V Всероссийская конференция молодых ученых ИТ СО РАН. – Новосибирск, 2002.- С. 101-102.

4. Богомолов А.Р., Петрик П.Т., Азиханов С.С., Тубольцева О.А. Гидродинамика при двухфазном течении в щелевом канале с зернистым слоем // XXVI Сибирский теплофизический семинар – Новосибирск, 2002.- С. 45-46

5. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое.- Новосибирск, 1984. – 163 с.