

6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. -М.: Физматлит, 1995.
8. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. - М.: Наука, 1994.

УДК 532.546

ГИДРОДИНАМИКА В КОНДЕНСАТОРАХ С ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ

А.Р. Богомолов, С.М. Азиханов, К.В. Гуцал, Е.Ю. Темникова
Кузбасский Государственный Технический Университет, г. Кемерово
Институт теплофизики СО РАН, г. Кемерово
E-mail: santa@kuzbass.net

Представленная работа посвящена изучению гидродинамики жидкости при осесимметричном обтекании сферической поверхности на примере двумерной и трехмерной укладки шаров диаметром 37,5 мм, а также при фильтрации жидкости от вертикальной поверхности, помещенной в зернистый слой. В обоих случаях наблюдается отвод жидкости в радиальном направлении относительно основного течения. При осесимметричном обтекании отток жидкости увеличивается пропорционально увеличению числа контактов с другими сферами. В случае фильтрации жидкости от вертикальной поверхности зависимость насыщенности от высоты и длины зернистого слоя носит сложный волновой характер, а от скорости подачи жидкости – линейный.

Исследованию гидродинамических и тепловых процессов с фазовым превращением на поверхностях в плотных монодисперсных зернистых слоях посвящено большое количество работ. Эти процессы находят применение в химической технологии, тепловых трубах, конденсаторах и атомной энергетике.

Первые исследования по теплообмену при конденсации пара на поверхности вертикального и горизонтального цилиндра в пористой среде были представлены в экспериментальной работе [1], где высказано предположение об отводе части сконденсированного пара от поверхности конденсации. Авторы в статье [2], где была экспериментально исследована пленочная конденсация на вертикальной изотермической поверхности, погруженной в упакованный слой, предполагают существование отсоса части жидкости внутрь слоя под действием капиллярных сил. В работе [3] предлагается физическая модель теплообмена при пленочной конденсации насыщенного пара на вертикальном цилиндре в зернистом материале с учетом оттока конденсата. Принятая модель позволила достаточно точно описать экспериментальные результаты.

В представленной работе объясняется природа работы зернистого слоя как структуры, способствующей отводу жидкости в радиальном направлении относительно основного течения и, соответственно, интенсификации теплопередачи.

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда, на котором проводились опыты. Основными узлами стенда являются вентиль 1, бак постоянного уровня 2, ротаметр 3, сопло 4, решетка 5, емкости для сбора жидкости 6. Из бака постоянного

уровня жидкость, проходя через ротаметр и сопло, поступала на соответствующий ряд решетки, откуда жидкость стекала, образуя на поверхности шариков пленку, в сборочные емкости. Расход жидкости изменялся регулировочным вентилем в диапазоне $(1-8) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Для опытов использовали решетку, собранную из шариков диаметром $d_{ш}=37,5 \text{ мм}$. Диаметр сопла $D=2,5 \text{ мм}$. Отношение $D/d_{ш}$ соответственно равно $0,0667$. В качестве жидкости использовалась вода. Применяли двумерную и трехмерную решетку (укладку). В случае двумерной решетки, состоящей из трех рядов, количество слоев по глубине менялось от 1 до 7, и жидкость подавали на крайний или средний ряд. Тогда обтекаемая сфера соответственно имела один или два контакта с соседними сферами. Для трехмерной решетки, имеющей вид кубической укладки, испытывали от 1 до 4 слоев, жидкость поступала на центральный ряд, и обтекаемая сфера имела четыре контакта с соседними сферами.

В ходе эксперимента измерялись объемные расходы жидкости Q_1 и Q_2 мерными цилиндрами и время наполнения цилиндров жидкостью с помощью секундомера, где Q_1 - объемный расход стекаемой жидкости с ряда, на который подавалась жидкость, Q_2 - объемный расход отведенной жидкости с соседних рядов (сфер).

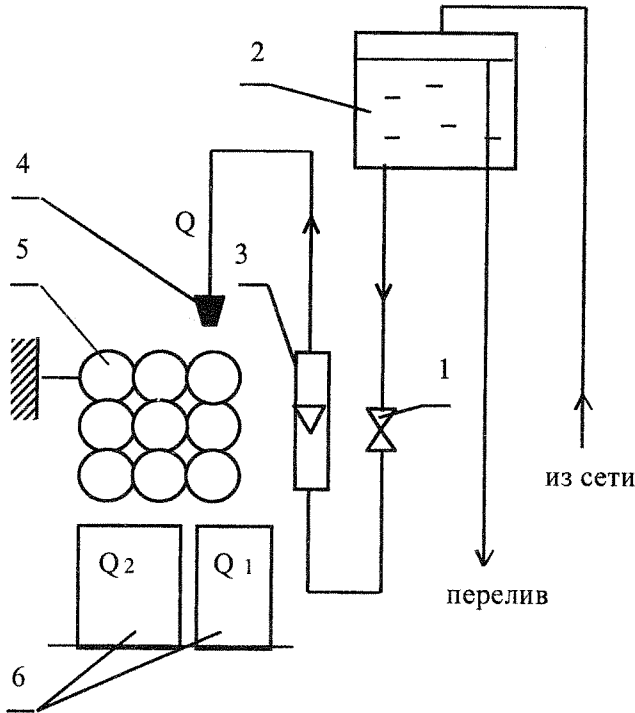


Рис. 1. Схема стенда для исследования гидродинамики жидкости

Полученные результаты были представлены зависимостью $Q_2/Q=f(Q)$, где Q - общий объемный расход жидкости.

Была проведена статистическая обработка этих данных при доверительной вероятности $0,95$. Для этого определяли доверительные интервалы, которые представлены в табл. 1, по методике, изложенной в [4].

Из табл.1 видно, что наибольшие доверительные интервалы (наибольший разброс измеряемых величин) соответствуют экспериментальным данным, полученным на четырех слоях с одним контактом. Кроме того, с увеличением общего расхода доверительные интервалы уменьшаются, что свидетельствует о стабилизации течения пленки жидкости, вся поверхность обтекаемых сфер ряда покрыта пленкой жидкости, в то время как при расходах меньше $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ наряду с

пленочным течением присутствует и струйное.

Были построены линии, осредняющие данные, по зависимости $Q_2/Q=f(Re)$, где Re рассчитан по плотности орошения на экваториальном диаметре шарика.

Таблица 1. Средний доверительный интервал ϵ_p^{mid}

Кол-во контактов	Число слоев						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,0266	0,0673	0,0768	0,1165	0,0575	0,0347	0,0676
2	0,0496	0,0372	0,0634	0,0429	-	-	0,0429
4	0,0910	0,0296	0,0211	0,0325	-	-	-

Из графиков видно, что при исследовании гидродинамики жидкости на двумерной решетке при подаче жидкости на крайний ряд (рис. 1а) в указанном выше диапазоне

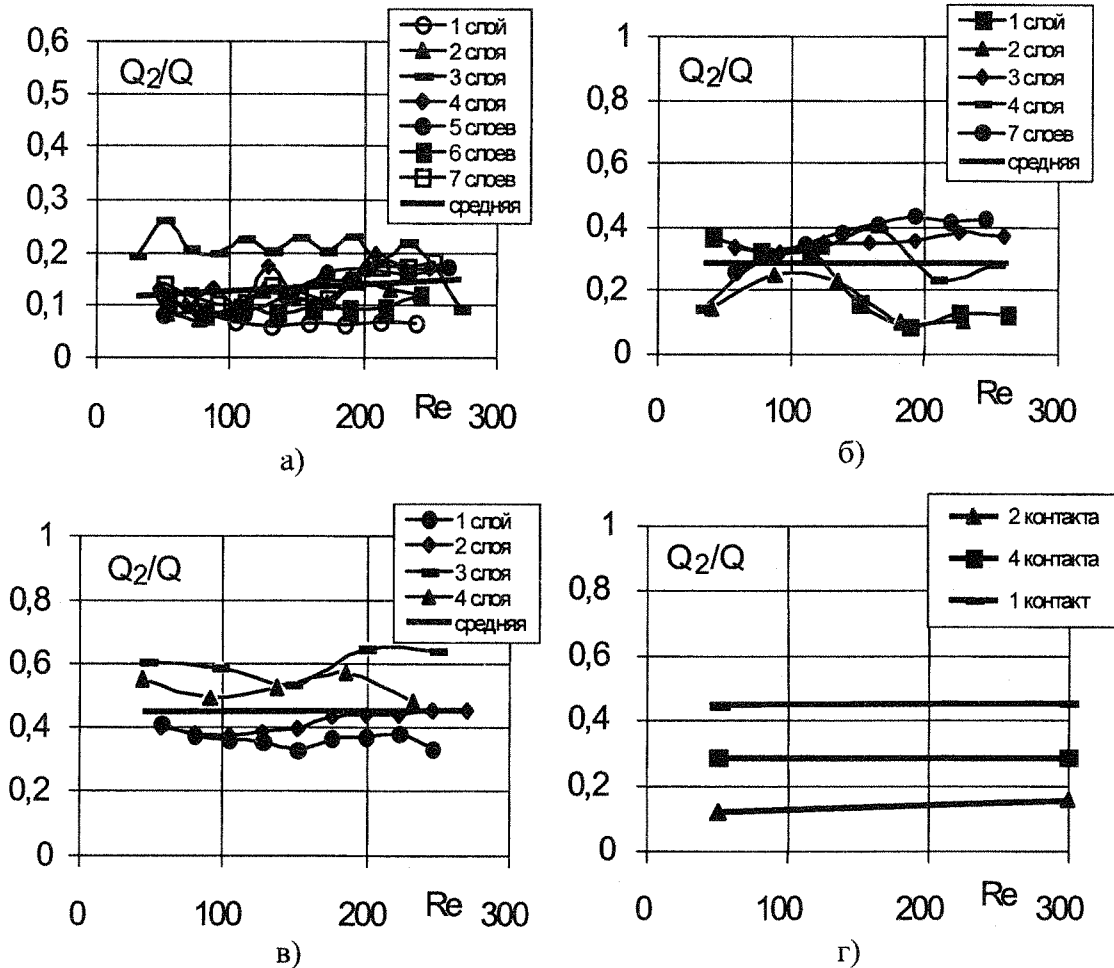


Рис. 2. Зависимость относительного отвода жидкости от числа Re пленки на экваториальном диаметре шарика: а) с 1 контактом, контактов. б) с 2, в) с 4, г) средние линии при разном числе

расходных характеристик количество отводимой жидкости изменялось от 7 до 26 %. При подаче жидкости на средний ряд двумерной решетки (рис. 1б) количество отводимой жидкости менялось от 10 до 45 %. А когда применялась трехмерная решетка (рис. 1в) отводилось от 32 до 65 % жидкости. Можно сделать вывод, что в местах контакта шаров наблюдается отток жидкости на неорошаемые шары, относительная величина которого слабо зависит от общего расхода жидкости, и что число контактов по глубине ряда оказывает существенное влияние на величину отводимой жидкости.

В работе [5] сделана попытка смоделировать экспериментально процесс конденсации пара на вертикальной стенке, упакованной в слой зернистого материала, где цилиндр был помещен в упаковки из стеклянных шариков диаметром 0,8 и 1,1 мм, рабочей жидкостью являлась дистиллированная вода. Были получены зависимости насыщенности S от различных параметров.

Данные, полученные на цилиндре, свидетельствуют о том, что в окрестностях стенки насыщенность не достигает предельного значения, максимальная насыщенность находится на некотором расстоянии от нее. Зависимость от высоты и длины зернистой среды носит сложный колебательный (волновой) характер с постепенным затуханием, зависимость от скорости подачи жидкости имеет линейный характер.

Исследование гидродинамики течения пленки жидкости от вертикальной пластины в зернистом слое проводилось на экспериментальном стенде (рис.3). Жидкость подавалась под давлением через пористую стенку (рис.4), что позволило смоделировать процесс конденсации. Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый циркуляционный контур, состоящий из рабочего участка 1, бака постоянного уровня 8, насоса 6, ротаметра 3, бака-сборника 5.

Из бака постоянного уровня жидкость подавалась на центральную перегородку рабочего участка, стекала по зернистому слою, проходила через пробоотборник (сепаратор) и попадала в бак-сборник. Из бака-сборника насосом жидкость закачивалась в бак постоянного уровня. Рабочий участок состоит из центральной перфорированной перегородки, закрепленной в коробчатой обечайке. В пространство между перегородкой и внешней стенкой засыпался зернистый слой. В нижней части рабочего участка установлен пробоотборник, который состоит из двенадцати отделений. В каждом отделении имеются штуцера для отвода жидкости. В качестве зернистого материала использовали стеклянные шарики $d=0,8$ и 1,1 мм. Рабочая жидкость - дистиллированная вода. Замеры производились в стационарном режиме в интервале расходов жидкости от $2,25 \cdot 10^{-6}$ до $7,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ и для различных высот зернистого слоя от 0,05 до 0,5 м. В процессе эксперимента производили замеры расхода жидкости в каждом отделении сепаратора и ее общий расход. Расход воды в отделениях определяли весовым методом. В ходе эксперимента определялась насыщенность S зернистого слоя жидкостью, как отношение скорости потока в свободном сечении отделения сепаратора U_i к максимально возможной скорости течения жидкости (зернистый слой полностью затоплен):

$$S = \frac{U_i}{U_{max}} \quad (1)$$

По закону Дарси

$$U_{max} = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (2)$$

Согласно [6]

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

$$U_i = \frac{Q_i}{F_{нов.i}} \quad (4)$$

$$F_{нов.i} = bl \quad (5)$$

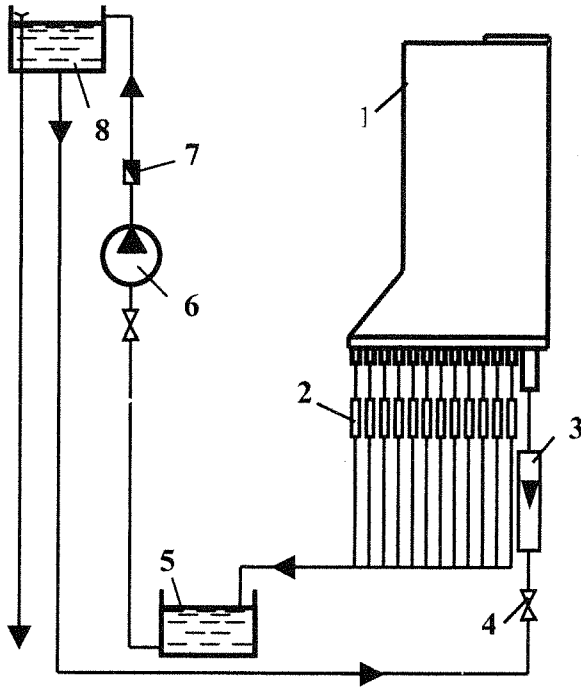


Рис.3. Экспериментальный стенд:
1 – рабочий участок, 2 – мерная колба,
3 – ротаметр, 4 – вентиль, 5 – бак -
сборник, 6 – насос, 7 – клапан
обратный, 8 – бак постоянного уровня

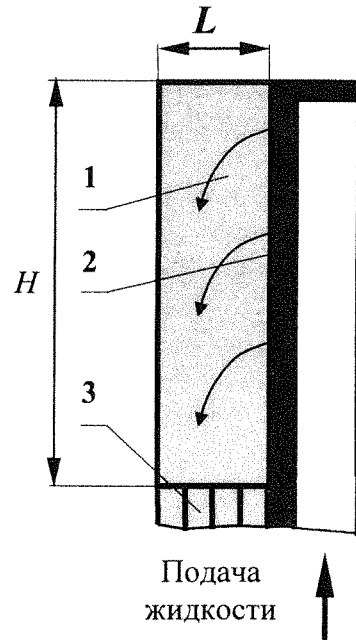


Рис.4. Рабочий участок
экспериментального стенда:
1 - зернистый слой,
2 - пористая стенка,
3 - пробоотборник.

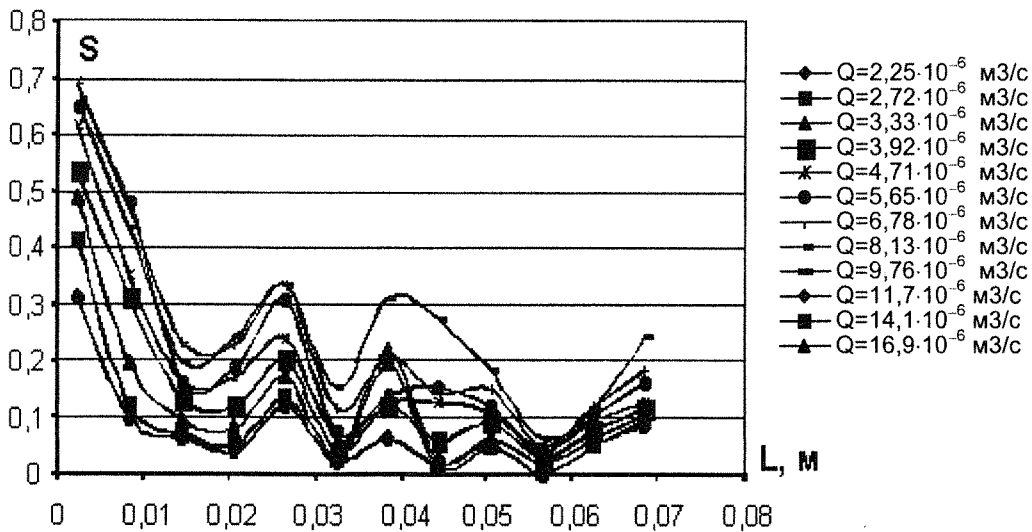


Рис.5. Зависимость насыщенности S зернистого слоя жидкостью от толщины слоя; $H=200$ мм, Q – idem, $D_{\text{част}}=1,1$ мм.

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; k – проницаемость пористой среды, м^2 ; μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$; ε – пористость; d – диаметр частиц, м; Q_i – расход жидкости в отделении, $\text{м}^3/\text{с}$; $F_{\text{нов.}i}$ – площадь сечения

отделения сепаратора, m^2 ; l – длина отделения сепаратора, м; b – ширина отделения сепаратора, м.

По результатам опытов были построены графические зависимости насыщенности зернистого слоя от других параметров (толщины, высоты зернистого слоя, расхода жидкости).

На основании полученных данных можно сделать вывод, что распределение насыщенности по толщине зернистого слоя носит сложный волновой характер. Отмечено, что до высоты $H=150$ мм распределение насыщенности имеет неустойчивый (случайный) характер. От высоты слоя $H=200$ мм до 300 мм максимум насыщенности находится вблизи стенки (рис. 5), и распределение насыщенности волнообразно с постепенным затуханием на периферии. Начиная с $H=350$ мм и более зависимость S от L кардинально меняется (рис. 6), максимальное значение насыщенности находится на некотором расстоянии от стенки. Зависимость насыщенности от скорости подачи жидкости линейная при прочих равных условиях.

Авторы благодарны за участие в исследованиях студентам Самойленко А.В., Снегиревой О.Г., Тубольцевой О.А., Барабановой Е.С. и признательны за пристальное внимание и обсуждение доктору технических наук профессору Дорохову А.Р.

Литература:

1. Влияние зернистого слоя на пленочную конденсацию./ Ю.О. Афанасьев, И.В. Дворовенко, С.И. Лазарев, П.Т. Петрик, Г.С. Сердаков// Теплообмен в парогенераторах: Материалы Всесоюз. Конферен. - Новосибирск: Ин-т ТФ СО АН СССР, 1988.
2. Plamb O.A., Burnett D.B., Shekarriz A. Film condensation on a vertical flat plate in a packed bed // J. Heat Transfer, 1990, V. 112.
3. Богомолов А.Р., Петрик П.Т., Цой О.Н. Теплообмен при конденсации на поверхности вертикального цилиндра, погруженного в зернистый слой // Химия и химическая технология: Сб. науч. тр. - Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т, 1995.
4. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Азиханов С.С., Гуцал К.В. Гидродинамика жидкости при фильтрации в зернистом слое от вертикальной трубы // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: IV Всероссийская конференция молодых ученых ИТ СО РАН. - Новосибирск, 2000.
6. Справочник по теплообменникам: в 2 т., Т.1/ Пер. с англ., под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.