

Гидродинамика сепарационных устройств технологического оборудования АЭС

Представлены результаты экспериментального исследования устойчивости плёночного течения и влияния действительного состояния поверхности контакта сепарационных устройств на процесс смачивания. Получена карта режимов для газожидкостных систем на поверхностях сепарационных устройств с сетчатым экранированием. Анализ результатов показал, что область устойчивого течения пленки по стенкам канала с сетчатым покрытием значительно расширена по сравнению с каналами, которые имеют гладкие стенки.

Ключевые слова: сепарационные устройства, каплеунос, гидродинамика плёночного течения.

В. О. Туз, Н. Л. Лебедь, І. К. Лебедь

Гідродинаміка сепараційних пристроїв технологічного обладнання АЕС

Наведено результати експериментального дослідження стійкості плівкової течії та впливу дійсного стану поверхні контакту сепараційних пристроїв на процес змочування. Отримано карту режимів для газорідних систем на поверхнях сепараційних пристроїв із сітчастим екрануванням. Аналіз результатів показав, що область сталої течії плівки по стінках каналу із сітчастим покриттям значно розширена порівняно з каналами, які мають гладкі стінки.

Ключові слова: сепараційні пристрої, винос крапель, гідродинаміка плівкової течії.

© В. Е. Туз, Н. Л. Лебедь, И. К. Лебедь, 2014

Одно из основных условий длительной безаварийной работы турбинного оборудования блока АЭС — качественная сепарация капельной жидкости, которая может образовываться в процессе уноса жидкости из объёма парогенератора либо при конденсации влажного пара.

Для обеспечения эффективности работы сепарационных устройств необходимо знать особенности взаимодействия жидкости и газа, а также диапазон рабочих параметров, в пределах которых реализуется устойчивый режим течения пленки жидкости и отсутствует вторичный унос. Увеличение диапазона устойчивой работы сепарационного устройства в результате обеспечения условий, при которых не происходит нарушение режима течения, связанного с капельным уносом жидкости, достигается экранированием поверхности контакта сетчатым материалом, в результате чего жидкость движется в структуре сетчатого покрытия.

Цель исследования — определение закономерностей течения гравитационной плёнки жидкости в каналах сепарационных устройств с сетчатым покрытием стенок. Анализ имеющихся литературных источников показал, что информация о результатах исследований процессов, связанных с вторичным уносом капель при гравитационном течении плёнки жидкости по поверхности с сетчатым покрытием, практически отсутствует. Поэтому поставленная цель работы актуальна.

Динамика взаимодействия плёнки жидкости и газового потока в двухфазных системах. В процессе улавливания капельной жидкости из пара на поверхности элементов сепарационных устройств образуется плёнка жидкости. В зависимости от количества уловленной влаги изменяется гидродинамика плёночного течения — от безволнового, при малых числах плёночного числа Рейнольдса Re_δ , до двух- и трехмерного турбулентного волнового течения. При взаимодействии с потоком пара или газа возможны следующие характерные граничные режимы: разрыв плёнки с образованием сухих пятен и вторичный капельный унос с гребней волн.

Нанесённый на стенки слой сетчатого покрытия можно рассматривать как регулярную шероховатость. В этом случае наличие сетчатого покрытия приводит к более раннему переходу от ламинарного течения в турбулентное из-за дополнительных возмущений. С одной стороны, при небольшой толщине сетчатого слоя, которая определяется диаметром проволоки $d_{пр}$, возмущения лежат ниже уровня, определяемого степенью турбулентности внешнего течения. В этом случае сетчатый слой не оказывает влияния на переход ламинарного течения в турбулентное. С другой стороны, при очень крупных размерах ячейки и диаметрах проволоки сетки переход может произойти непосредственно в ячейке при низких скоростях газового потока.

В литературе отсутствуют данные о влиянии геометрических размеров сетчатого покрытия на переход от ламинарного режима течения в плёнке к турбулентному.

Процесс взаимодействия потока пара или газа с плёнкой жидкости на поверхности с сетчатым покрытием подобен гидродинамическому процессу, протекающему на поверхностях с искусственными кавернами или лунками различной формы.

Исследования гидродинамики течения в каналах с искусственной шероховатостью в виде проволок [1, 2] позволили определить условия перехода ламинарного режима течения в турбулентное в области, прилегающей

непосредственно к элементу шероховатости. Это происходит при значении плёночного числа Рейнольдса

$$Re_{\delta} = \frac{u \cdot k}{\nu} \approx 15...20,$$

где u — средняя скорость течения плёнки; ν — коэффициент кинематической вязкости; k — характерный размер шероховатости.

В [3–5] описаны сложные вихревые течения и изменение их структуры в зависимости от режимных параметров и геометрии углублений на гладкой стенке. Сравнительный анализ эволюции вихревого течения в элементарной ячейке [4, 5] подтвердил существенное влияние пространственного характера движения жидкости. Увеличение плёночного числа Рейнольдса приводит к существенной интенсификации вихревого течения в ячейке, что вызывает усиление интенсивности циркуляционного течения основного крупномасштабного вихря, а также увеличивает размеры вторичных угловых вихрей. Отмечено, что при достижении $Re_{\delta} \approx 400$ на дне ячейки постепенно формируется срединная зона квазидвухмерного отрывного течения. Кроме того, при небольших числах Рейнольдса ($Re_{\delta} \approx 100$) на боковых стенках формируется закрученный струйный поток, который направлен к оси ячейки. Таким образом, наличие сложного вихревого движения в элементарной ячейке сетчатого покрытия канала, фокусирующих точек и линий стоков даже при небольших числах Рейнольдса повлияет на гидродинамику плёночного течения при плотностях орошения, близких к минимальным.

Экспериментальное исследование гидродинамики плёночного течения в каналах с сетчатым покрытием. Влияние динамического воздействия потока газа на процесс нарушения сплошности течения, сопровождающееся разрывом плёнки и переходом в ручейковое течение, исследовалось на экспериментальном стенде, представляющем собой гидродинамический контур, состоящий из экспериментального участка, приёмного коллектора, систем подачи, регулирования и замера расхода газа и жидкости, измерительной системы, соединительных трубопроводов и регулировочных вентилей.

Погрешность определения толщины плёнки в момент её разрыва при различных скоростях газового потока контактным методом может оказаться значительной из-за нарушения гидродинамики потока в элементарной ячейке сетчатого покрытия, вызванного нарушением структуры течения плёнки измерительным щупом, а также сложностью точной юстировки его в ячейке сетки. Поэтому момент разрыва плёнки определялся косвенным способом — по изменению показаний термопар, фиксирующих значения температуры плёнки жидкости и газового потока, вследствие изменения площади плёнки при переходе от плёночного режима течения в ручейковый.

При исследовании гидродинамики пленки, гравитационно стекающей по стенке вертикального канала с сетчатым покрытием, установлен ряд особенностей, связанных с действием капиллярных сил в ячейке сетки.

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде зависимости безразмерной толщины плёнки жидкости $\delta^* = \delta \sqrt{3} \sqrt{(v^2/g)}$, отнесённой к безразмер-

ному комплексу $[Bo^{0,5} \cdot (1 - \cos \theta)]$ (здесь θ — краевой угол смачивания; Bo — число Бонда), от плёночного числа

Фруда, которое характеризует объёмную плотность орошения. Плёночное число Фруда определялось как

$$Fr = \frac{Q_m}{\delta \cdot (g \cdot \delta)^{0,5}},$$

где Q_m — объёмная плотность орошения; δ — средняя толщина плёнки жидкости; g — ускорение свободного падения.

Число Бонда

$$Bo = \frac{d}{(\sigma / (g(\rho_{ж} - \rho_{г})))^{0,5}},$$

где σ — сила поверхностного натяжения; ρ — плотность среды.

Эксперименты проводились в широком диапазоне изменения значений числа Фруда: от $Fr = 0,25$, которое соответствовало полностью затопленной сетчатой структуре, до $Fr = 0,003$, при котором происходит переход течения плёнки под сетчатое покрытие.

Результаты исследования зависимости минимальной толщины гравитационно стекающей плёнки жидкости по вертикальной поверхности с сетчатым покрытием от плотности орошения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Минимальная толщина плёнки жидкости, гравитационно стекающей по поверхности

Авторы	Re_{δ}	δ , мм
Воронцов Е.Г. [3]	2,29...4,12	0,06...0,108
Watanabe K., Munakata T., Mutsuda A. [4]	3,25	0,0845...0,153
Simon F., Hzu Y.Y. [5]	3,45	0,145
Результаты данного исследования	2,75...3,2	0,05...0,07

Представленные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами исследований других авторов [3–5].

Исследование зависимости локальной толщины гравитационно стекающей пленки жидкости по поверхности с сетчатым покрытием от плотности орошения (рис. 1) позволило выделить характерные области устойчивого плёночного течения жидкости в зависимости от плотности орошения и геометрии сетчатого покрытия:

I — область полностью затопленного сетчатого покрытия;

II — область, в которой пленка находится в верхних пределах сетчатого покрытия.

Область I характеризуется пропорциональным изменением толщины плёнки в зависимости от плотности орошения. В этой области характер изменения толщины плёнки на стенке с сетчатым покрытием идентичен изменению толщины плёнки при течении в вертикальных каналах с гладкими стенками [6].

Для области II характерна стабилизация толщины плёнки в пределах геометрических размеров сетчатого покрытия. Изменение плотности орошения не приводит к значительному изменению толщины. Превалирующими в этой области являются силы поверхностного натяжения,

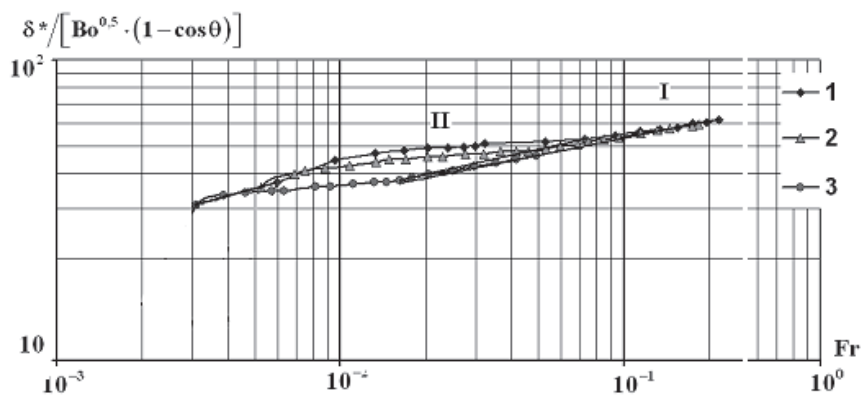


Рис. 1. Зависимость толщины пленки жидкости от плотности орошения при гравитационном течении в вертикальных каналах с сетчатым покрытием в безразмерном виде. Размер ячейки в свету:
1 — $0,63 \times 10^{-3}$ м;
2 — $0,50 \times 10^{-3}$ м;
3 — $0,40 \times 10^{-3}$ м

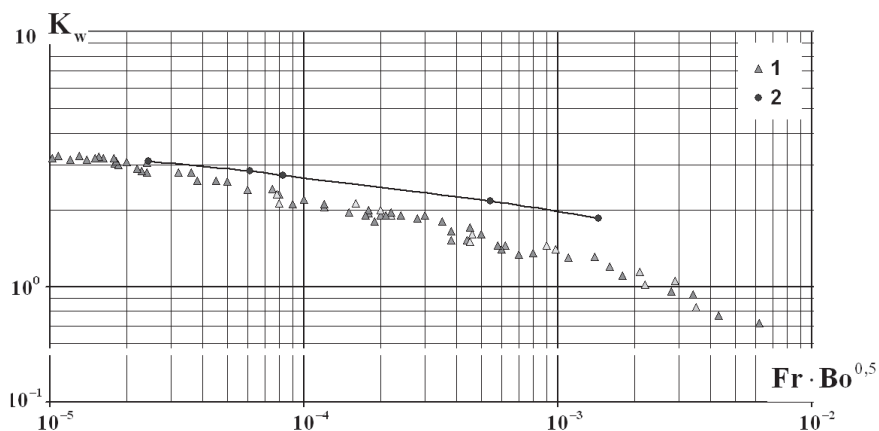


Рис. 2. Устойчивость гравитационного плёночного течения при противоточном движении жидкости и пара:
1 — данные Сорокина Ю. Л. [7, 8];
2 — экспериментальные данные, полученные авторами статьи

которые удерживают плёнку в структуре сетчатого покрытия. Полученные данные исследования гидродинамики плёночного течения по поверхности с сетчатым покрытием позволяют определить область устойчивой работы сепарационного устройства (область II).

Верхняя граница режима работы сепарационных устройств определяется условиями взаимодействия движущегося потока пара и гравитационно стекающей плёнки, что характерно для области I. Наличие возмущения потока пара приводит к возникновению двух- и трёхмерных волн на поверхности плёнки. Увеличение амплитуды волны способствует срыву капель с гребней, а процесс взаимодействия двухфазных систем определяется критерием устойчивости K_w , который, в свою очередь, зависит от параметров плёночного течения.

Баланс расхода пленки жидкости и газового потока, который определяет верхнюю границу процесса вторичного уноса капель с поверхности плёнки, зависящую от плотности орошения, геометрических характеристик канала, размера сетки и физических свойств жидкости и газа, обобщается с погрешностью $\pm 7\%$ зависимостью

$$K_w = 2,09 \cdot Fr^{-0,14} \cdot Bo^{0,5}. \quad (1)$$

В результате проведенных исследований по определению нарушения устойчивости режимов движения двухфазного потока [9, 10, 11] составлена карта режимов течения. Выделив из всего спектра возможных только режимы, характерные для работы сепарационных устройств, т. е.

те, при которых осуществляется противоточное движение гравитационно стекающих плёнок и потока газа до кризисного явления, сопровождаемого срывом капель жидкости с поверхности пленки, можно отметить, что граница устойчивого течения пленки по стенкам вертикального канала с сетчатым покрытием значительно расширена по сравнению с каналами, имеющими гладкие стенки (рис. 2). Кроме того, с ростом характерного размера сетки ($S/d_{пр}$) в исследуемом диапазоне расширяются границы устойчивой работы сепарационных устройств.

Выводы

В отличие от гладкой поверхности, где условие разрыва плёнки определяется физическими свойствами жидкости, смачиваемостью поверхности и зависит от баланса сил, действующих на элементарный объём плёнки, для поверхности с сетчатым покрытием необходимо дополнительно учитывать капиллярные эффекты в ячейке сетки.

Гидродинамический кризис при взаимодействии гравитационно стекающей пленки жидкости и восходящего потока газа, который соответствует началу процесса капельного уноса, зависит от плотности орошения, геометрических характеристик канала и сетчатого покрытия, физических свойств жидкости и газа.

Экспериментальные данные по определению нижней границы процесса капельного уноса, которые обобщены зависимостью (1), показали, что граница устойчивого

течения пленки по стенкам канала сепарационного устройства с сетчатым покрытием значительно расширена по сравнению с каналами, имеющими гладкие стенки.

Список использованной литературы

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг [пер. с нем.]. — М. : Наука, 1974. — 711 с.
2. Касилов В. Ф. Справочное пособие по гидродинамике для теплоэнергетиков / В. Ф. Касилов. — М. : МЭИ, 2000. — 370 с.
3. Воронцов Е. Г. О минимальной плотности орошения вертикальных плёночных аппаратов / Е. Г. Воронцов // ИФЖ. — 1968. — Т. 14, № 4. — С. 1075—1078.
4. Watanabe K. Minimum wetting rate on wetted — wall column — correlation over wide range of liquid viscosity / K. Watanabe, T. Mutsuda, T. Mutsuda // Journal of Chemical Engineering of Japan. — 1975. — Vol. 8, № 1. — P. 75—77.
5. Simon F. F. Thermocapillary induced breakdown of a falling liquid film / F. F. Simon, Y. Y. Hsu // NASA Technical Note. — D-5624, Washington. — 1970. — № 1. — P. 133—138.
6. Безродный М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк — К. : Факт, 2005. — 704 с.
7. Сорокин Ю. Л. Об условиях устойчивости некоторых режимов движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах / Ю. Л. Сорокин // Журн. прикл. техн. физики. — 1963. — № 6. — С. 150—165.
8. Сорокин Ю. Л. О режимах течения газожидкостных смесей / Ю. Л. Сорокин, О. Л. Пушкина // Труды ЦКТИ. — 1964. — Вып. 47. — С. 72—82.
9. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. — М.-Л. : Госэнергоиздат, 1958. — 354 с.
10. Живайкин Л. Я. Течение плёнок жидкости по вертикальной поверхности / Л. Я. Живайкин, В. П. Волгин // Журн. прикл. химии. — 1961. — Т. 34, № 6. — С. 1236—1243.
11. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения: Пер. с англ. Г. Уоллис. — М. : Мир, 1972. — 237 с.

References

1. Schlichting G. Theory of boundary layer / G. Schlichting [translated from German]. — Moscow : Nauka, 1974. — 711 p. (Rus)
2. Kasilov V. F. Handbook on hydrodynamics for power system [directory] / V. F. Kasilov. — Moscow : MEI, 2000. — 370 p. (Rus)
3. Vorontsov E. G. On the minimal irrigation density vertical film devices / E. G. Vorontsov // IFZh. — 1968. — Vol. 14, № 4. — P. 1075—1078. (Rus)
4. Watanabe K. Minimum wetting rate on wetted—wall column—correlation over wide range of liquid viscosity / K. Watanabe, T. Mutsuda, T. Mutsuda // J. Chem. Eng. Japan. — 1975. — Vol. 8, № 1. — P. 75—77. (English)
5. Simon F. F. Thermocapillary induced breakdown of a falling liquid film / F. F. Simon, Y. Y. Hsu // NASA Techn. Note D—5624, Washington. — 1970. — № 1. — P. 133—138. (English)
6. Bezrodny M. K. Transfer processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice / M. K. Bezrodny, I. L. Pioro, T. O. Kostyuk. — Kiev : Fact, 2005. — 704 p. (Rus)
7. Sorokin Yu. L. On stability conditions for some modes of motion—liquid mixtures in vertical pipes / Yu. L. Sorokin // Zh. prikl. and tehn. physics. — 1963. — № 6. — P. 150—165. (Rus)
8. Sorokin Yu. L. About flow regimes of gas—liquid mixtures / Yu. L. Sorokin, O. L. Pushkina // Proceedings CKTI. — 1964. — Iss. 47. — P. 72—82.
9. Kutateladze S. S. Hydrodynamics of gas-liquid systems / S. S. Kutateladze, M. A. Styrikovich. — Moscow; Leningrad : Gosenergoizdat, 1958. — 354 p. (Rus)
10. Zhivaikin L. Ya. For liquid film on a vertical surface / L. Ya. Zhivaikin, V. P. Volgin // Journal of Applied Chemistry. — 1961. — V. 34, № 6. — P. 1236—1243. (Rus)
11. Wallis G. Dimensional two-phase flows [translation from English] / G. Wallis. — Moscow : Mir, 1972. — 237 p. (Rus)

Отримано 24.04.2014.