

УДК 536.24

Е.Н. Письменный, д-р техн. наук, проф.,
В.Е. Туз, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Н.Л. Лебедь, канд. техн. наук,
 Нац. техн. ун-т Украины "КПИ"

СМАЧИВАЕМОСТЬ И АДГЕЗИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ НА СТЕНКЕ КАНАЛА С СЕТОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Є.М. Письменний, В.Є. Туз, Н.Л. Лебідь. Змочувальність і адгезія плівки рідини на стінці каналу з сітковим з покриттям. Наведено аналіз балансу сил, що діють на елементарний об'єм плівки рідини у вічку сіткового покриття, а також результати експериментального дослідження крайового кута змочування, який враховує вплив дійсного стану поверхні контакту.

Е.Н. Письменный, В.Е. Туз, Н.Л. Лебедь. Смачиваемость и адгезия пленки жидкости на стенке канала с сеточным покрытием. Представлен анализ баланса сил, действующих на элементарный объем пленки жидкости в ячейке сеточного покрытия, а также результаты экспериментального исследования краевого угла смачивания для учета влияния действительного состояния поверхности контакта.

Ye.N. Pismenniy, V.Y. Tuz, N.L. Lebed. Wettability and adhesion of a liquid film on the wall of the grid coated channel. The analysis of the balance of forces that act on an elementary interfacial volume of a liquid film in a cell of the grid coverage, as well as the results of an experimental study of the contact angle to account the influence of the actual state of the interfacial surface, are presented.

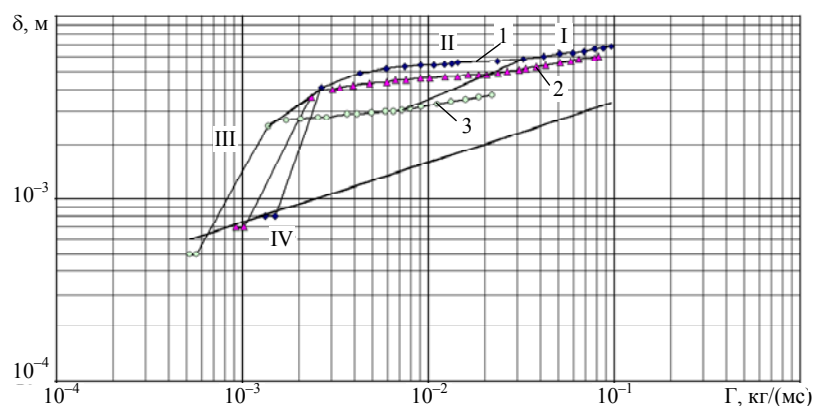
Одним из наиболее эффективных способов взаимодействия теплоносителя и рабочего тела является непосредственный контакт гравитационно текущей пленки жидкости и газа при противоточном движении фаз, сопровождающийся тепло- и массообменом, фазовыми и химическими превращениями. Перспективным методом пассивной интенсификации процессов тепло- и массообмена пленки жидкости и газа является использование поверхностей контакта с регулярной шероховатостью, либо с пористым или сеточным покрытием стенок каналов.

Важным условием обеспечения эффективности работы аппаратов контактного типа, имеющего определенную гидравлическую схему, является использование особенностей взаимодействия жидкости и газа, а также диапазона изменения рабочих параметров, в пределах которых реализуется устойчивое течение пленки жидкости. Шероховатость поверхности способствует увеличению амплитуды волн стекающей пленки, что приводит к уменьшению величины предельной скорости начала процесса захлебывания при противоточном движении контактирующих фаз, а с другой стороны, наличие пористого или сеточного покрытия, благодаря капиллярным силам, способствует расширению нижней границы рабочего диапазона, которая определяется переходом пленочного течения в ручейковое.

Гидродинамика гравитационного течения пленки жидкости в вертикальных каналах сеточным покрытием стенок. Исследование гидродинамики гравитационного течения пленки жидкости в вертикальных каналах сеточным покрытием стенок подтверждает влияние капиллярных сил на изменение толщины пленки в зависимости от плотности орошения.

Зависимости локальной толщины гравитационно стекающей пленки жидкости по вертикальной поверхности с сетчатым покрытием от плотности орошения представлены на рисунке. В ходе экспериментов плотность орошения изменялась от максимального значения, при полностью затопленной сеточной структуре, до минимального, соответствующего переходу пленочного течения в ручейковое.

Анализ экспериментальных данных позволяет выделить характерные области ламинарного течения пленки жидкости по вертикальной поверхности с сетчатым покрытием. Первая область характеризуется монотонным изменением толщины пленки в зависимости от уменьшения плотности орошения. Такой характер изменения толщины пленки происходит в случае полного затопления сетчатой структуры. Кривая изменения толщины пленки на стенке с сеточным покрытием согласуется с кривой зависимости толщины ламинарной гравитационно стекающей пленки по гладкой вертикальной поверхности [1]. Область II характеризуется относительно стабильной толщиной пленки. Уменьшение плотности орошения не приводит к значительному изменению ее толщины.



Толщина пленки δ в зависимости от плотности орошения Γ при гравитационном течении в вертикальных каналах с сеточным покрытием и размере ячейки в свету:

$$S = 0,63 \cdot 10^{-3} (1); 0,50 \cdot 10^{-3} (2); 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ м} (3)$$

Превалирующими в этой области являются силы поверхностного натяжения, которые удерживают пленку в структуре сеточного покрытия. Диапазон изменения толщины пленки для этой области характеризуется началом появления верхней образующей проволоки в месте их переплетения и толщиной пленки в центре мениска, образованного жидкостью между проволоками ячейки сетки. При дальнейшем уменьшении плотности орошения в области III происходит скачкообразное изменение толщины пленки. Очевидно, что в этой области баланс сил складывается таким образом, что силы инерции становятся меньше когезии. Нижняя граница этой области характеризуется пленочным течением жидкости по гладкой поверхности трубы и наличием менисков под нижней образующей проволок ячейки сетки.

Для области IV характерным является относительно стабильное течение пленки. Толщина пленки в этой области близка к минимально допустимой, и при небольшом изменении плотности орошения происходит разрыв пленки с образованием сухих пятен. Повторное смачивание образовавшихся пятен возможно только после полного затопления сетчатого слоя.

Взаимодействие пленки жидкости и поверхности с сеточным покрытием. Анализ полученных данных по исследованию изменения толщины гравитационно стекающей пленки жидкости по вертикальной поверхности с сетчатым покрытием позволяет определить сложный характер зависимости от плотности орошения, который будет оказывать определяющее влияние на допустимый диапазон работы контактных аппаратов с регулярными насадками, имеющими пассивные интенсификаторы.

Большое влияние на течение жидкости в каналах контактных аппаратов оказывает материал, из которого изготовлены стенки канала и сеточное покрытие.

Важной характеристикой, оказывающей влияние на гидродинамику пленочного течения, является поверхностное натяжение σ и краевой угол смачивания θ . Процессы смачивания гладких и шероховатых поверхностей различными жидкостями достаточно подробно исследованы [2]. Следует отметить, что приведенные данные относительно краевых углов смачивания θ для системы “жидкость — твердое тело” имеют большой диапазон значений. Это объясняется не погрешностью при получении экспериментальных данных, а, в основном, способом измерения θ и реальными свойствами жидкости и твердого тела.

Смачивание поверхностей каналов с сеточным покрытием по сравнению с гладкими и шероховатыми поверхностями имеет ряд особенностей, которых проявляются в изменении на поверхностях с сеточным покрытием основных показателей, характеризующих адгезию и смачивание. Неровности и микротрещины стенок канала и проволок сеточного покрытия существенным образом влияют на зависимость толщины смачивающей пленки от капиллярного давления мениска в ячейке сетки или от относительного давления газа (пара).

Реальные профили пленок на стенках канала с сеточным покрытием сложны, и строгие аналитические решения связаны с большими трудностями. В случае искривленной поверхности пленки, как в случае с пленкой в ячейке сетки на стенке канала, меняется по сравнению с плоской поверхностью пространственное распределение тангенциальной и нормальной составляющей тензора давления. Это явление лежит в основе известной зависимости поверхностного натяжения жидкости σ от кривизны поверхности [3,4].

Равновесие пленок жидкости на искривленной твердой поверхности с паром либо капиллярным мениском, имеющим капиллярное давление ΔP_k , определяется выражением [5]

$$P_k(k) + \Pi(\delta) = \left(\frac{RT}{v_m} \right) \ln \frac{P_s}{P} = \Delta P_k, \quad (1)$$

где P_k — капиллярное давление в пленке, зависящее от кривизны k поверхности;

Π — расклинивающее давление, которое является функцией только толщины пленки.

Характер взаимодействия пленки жидкости со стенкой канала в IV области (см. рисунок) показывает, что стыковая часть пленки, расположенной под нижней образующей проволоки сетки, находится в состоянии равновесия с объемной частью пленки при условии равенства расклинивающего давления в пленке $\Pi(\delta)$ и перепада капиллярного давления ΔP_k на поверхности пленки. В тоже время, пленка, находящаяся в поле действия поверхностных сил в области канала и проволоки сетки, не переходит прямо в объемную часть. Между ними, как было исследовано, существует переходная зона, где еще продолжается действие поверхностных сил [5].

Поскольку в переходной зоне действуют одновременно как капиллярные, так и поверхностные силы, для нахождения равновесного профиля переходной зоны необходимо использовать уравнение, выражающее постоянство химического потенциала молекул жидкости в слое переменной толщины $\delta(x, y, z)$ [6, 7]

$$\sigma k(x, y, z) + \Pi(\delta) = P_0 = \text{const}, \quad (2)$$

где $k(x, y, z)$ — локальное значение кривизны поверхности;

P_0 — капиллярное давление равновесного мениска пленки.

С другой стороны, экспериментальные исследования показали, что в IV области существуют пленки жидкости достаточно большой толщины ($\delta > 5 \cdot 10^{-5}$ м) и со значительным радиусом кривизны, при котором величина расклинивающего давления $\Pi(\delta)$ существенно не повлияет на профиль стыковой части пленки.

Как уже отмечалось, одной из важных характеристик системы “стенка канала — пленка жидкости”, оказывающей влияние на гидродинамику, особенно в диапазоне плотностей орошения, близких к минимальным, является краевой угол смачивания θ_0 . Существуют аналитические и экспериментальные методы определения величины краевого угла смачивания для различных систем “твердая гладкая поверхность — жидкость”. В зависимости от выбранного способа определения θ_0 полученные значения могут значительно отличаться (от 0,3...0,4 до 2...3 раз) [2].

В теории смачивания было впервые корректно учтено, что капля или мениск объемной жидкости образуют краевой угол не с “сухой” твердой и гладкой подложкой, а с поверхностью, покрытой тонкой пленкой жидкости [5, 8]. В результате получено выражение, которое позволяет определять краевой угол смачивания θ_0

$$\sigma \cos \theta_0 = \sigma + P_0 \delta_0 + \int_{\delta_0}^{\infty} \Pi(\delta) d\delta. \quad (3)$$

Учитывая необходимость определения числа Фурье $Fr_{\min 2}$, соответствующего нижней границе рабочего диапазона работы контактных аппаратов, рассчитать краевой угол смачивания θ_0 для реальной системы “стенка с сеточным покрытием — жидкость” практически невозможно.

Методы определения краевого угла смачивания θ_0 подробно описаны [2, 8, 9]. Для системы “стенка с сеточным покрытием — пленка жидкости” краевой угол смачивания θ_0 целесообразно определять между стыковой частью пленки жидкости на стенке канала и тонкой пленкой на проволоке сеточного покрытия. Наиболее приемлемым и близким к реальному процессу является метод измерения краевых углов смачивания малой капли, сажаемой на проволоку, из которой изготовлено сеточное покрытие канала. В этих условиях равновесие достигается быстро, гистерезис исключается, а сила гравитации не влияет на краевой угол.

Измерения краевого угла смачивания выполнялось с помощью микроскопа ММИ-2 с углоповоротной головкой. В таблице представлены экспериментальные значения краевых углов θ_0 при смачивании различных жидкостей проволоки сеточного покрытия, изготовленного из различных материалов. Для сравнения приведены экспериментальные данные равновесных углов смачивания θ_0 [10].

Отличия в результатах измерений краевых углов смачивания для одних и тех же систем “металл — жидкость” возникают из-за метода определения θ_0 , вследствие отсутствия идентичности физико-химической и микрогеометрической поверхности образцов.

Экспериментальные значения равновесных краевых углов смачивания θ_0 , град.

Материал	Температура, К	Вода	Этанол	Т-1 (керосин)	Газовый конденсат	Метод определения	Источник информации
Латунь Л80	293	53	33	30	32	Капля, сажаемая на нить	Экспериментальные данные
Сталь Ст65Г	293	65	30	31	32		
Молибден	293	55	31	30	38		
Никель	293	58	30	35	36		
Нерж. сталь Х18Н10Т	293	69	32	37	32		
Медь	293	72	20	—	—	Лежащей капли	[10]
Медь	293	61	9	—	—	Свободного мениска	[10]
Никель	293	61	17	—	—		
Нерж. сталь Х18Н10Т	293	73	12	—	—		

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

Для учета влияния действительного состояния поверхности контакта на процесс смачивания были проведены исследования равновесного краевого угла смачивания θ_0 методом малой капли, сажаемой на проволоку из различных материалов.

Литература

1. Капица, П.Л. Волновые течения тонких слоев вязкой жидкости / П.Л. Капица // ЖЭТФ. — 1948. — Т. 18, вып.1. — С. 3 — 28.
2. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д.Зимон. — М.: Химия, 1974. — 414 с.
3. Оно, С. Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях: Пер. с англ. / С. Оно, С. Кондо. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — 291 с.
4. Русанов, А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления / А.И. Русанов. — Л.: Химия, 1967. — 388 с.
5. Дерягин, Б.В. Смачивающие пленки / Б.В.Дерягин, Н.В.Чураев. — М.: Наука, 1984. — 160 с.
6. Дерягин, Б.В. Профиль переходной зоны между смачивающей пленкой и мениском объемной жидкости/ Б.В. Дерягин, В.М. Старов, Н.В. Чураев // Коллоид. журн. — 1976. — Т. 48., № 5 — С. 875 — 879.
7. Мартынов, Г.А. Гистерезис краевого угла на однородных поверхностях / Г.А. Мартынов, В.М. Старов, Н.В. Чураев // Коллоид. журн. — 1977. — Т. 39. — № 3 — С. 472 — 484.
8. Фрумкин, А.Н. О явлениях смачивания и прилипания пузырьков / А.Н.Фрумкин // Журн. физ. химии. — 1938. — Т. 12, № 4 — С. 337 — 345.
9. Старов, В.М. Равновесие капель жидкости на твердой подложке и линейное натяжение / В.М. Старов, Н.В. Чураев // Коллоид. журн. — 1980. — Т. 42, № 4 — С. 703 — 710.
10. Семена, М.Г. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами / М.Г. Семена, А.Н. Гершуни, В.К. Зарипов. — К.: Вища шк., 1984. — 214 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Нац. техн. ун-та Украины “КПИ” Эпик Э.Я.

Поступила в редакцию 10 октября 2009 г.