

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПЛЁНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛАХ С СЕТОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Експериментально визначено закономірності течії гравітаційної плівки рідини в вертикальних каналах з сітковим покриттям стін насадок тепломасообмінних апаратів. Визначено залежності мінімальної щільності зрошення від геометричних характеристик сіткового покриття і умов змочування рідини.*

*Експериментально определены закономерности течения гравитационной плёнки жидкости в вертикальных каналах с сеточным покрытием стен насадок теплообменных аппаратов. Определены зависимости минимальной плотности орошения от геометрических характеристик сеточного покрытия и условий смачиваемости жидкости.*

*The patterns of gravitational liquid film flow in vertical channels with the grid covered walls of nozzles in the heat and mass transfer devices were experimentally determined. The dependence of the minimum density of irrigation on the geometric characteristics of the grid coverage and wetting liquid conditions were determined.*

$d$  – диаметр;

$\Gamma$  – плотность орошения;

$\delta$  – толщина плёнки;

$\nu$  – кинематическая вязкость;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

**Числа подобия:**

$$Re_{пл} = \frac{\Gamma}{\mu_p} - \text{плёночное число Рейнольдса;}$$

Исследованию гидродинамики гравитационно стекающей плёнки жидкости по вертикальным либо наклонным поверхностям посвящено значительное количество работ [3-6]. Задачами исследований являлось определение средней и локальной толщины плёнки, частоты, амплитуды и профиля волнового течения, касательного напряжения на свободной поверхности плёнки и на стенке, температурных полей и полей скоростей в плёнке жидкости, гравитационно стекающей по гладким поверхностям.

Целью настоящего исследования являлось определение закономерностей течения гравитационной плёнки жидкости в вертикальных каналах регулярных насадок с сеточным покрытием стенок контактных тепло-и массообменных аппаратов. Выбранный метод пассивной интенсификации процессов теплообмена значительно усложняет гидродинамику плёночного течения. Одними из важнейших характеристик, которые позволяют определить диапазон работы контактного аппарата, являются толщина и ско-

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

$$Fr_{\delta} = \frac{Q_m}{\delta \cdot (g \cdot \delta)^{0,5}} - \text{плёночное число Фруда.}$$

**Индексы:**

пл – плёнка;

min – минимальное значение;

пр – проволока.

рость стекающей плёнки жидкости, а также её волновые характеристики.

На характеристики плёночного течения оказывают влияние физические свойства жидкости (плотность, вязкость, величина поверхностного натяжения, краевой угол смачиваемости и др.), режимные параметры (скорость плёнки и газового потока, направление движения газового потока, плотность орошения и т.д.), а также геометрические характеристики поверхности (диаметр и высота канала, диаметр проволоки и размер ячейки в свету, способ плетения сеточного покрытия и т.д.).

### Схема экспериментальной установки

Исследования гравитационного течения плёнок жидкости проводилось на стенде, основным элементом которого являлся экспериментальный участок в виде вертикальной трубы с сеточным покрытием. Экспериментальная установка представляла собой гидродинамический контур, состоящий из экспериментального участка, приёмного коллектора, сборного бака,

насоса, сетевого коллектора, бака конденсата, измерительной системы, состоящей из двух последовательно соединённых ротаметров РС-3 с различным диапазоном расходов и с перекрытием шкал измерений, термопар с вторичным прибором Щ-300 либо А-565, соединительных трубопроводов и регулировочных вентилей. При проведении экспериментальных исследований особое внимание уделялось точности и корректности измерений. Одной из причин, влияющих на точность измерения параметров гравитационно стекающих плёнок жидкости, является равномерность орошения по сечению канала, поэтому большое внимание уделялось конструкции оросительных устройств. Подача жидкости на стенки канала осуществлялась через оросительное устройство переливного типа с пористой вставкой, которая обеспечивала равномерное орошение по всему сечению канала. Для исключения перетока жидкости по горизонтальному сечению плёнки, рабочий участок фиксировался строго по вертикали. Контроль за равномерностью орошения проводился путём сбора жидкости с различных секторов периметра канала, разделённой в нижней части на концентраторы путём выполнения на нижнем крае сеточного покрытия треугольных просечек.

В настоящее время разработаны и широко апробированы методы измерений локальных гидродинамических параметров гравитационно стекающих плёнок [3,4,6]. Суть их сводится либо к непосредственному измерению соответствующего параметра (метод касания, метод радиоактивных добавок,  $\gamma$  - просвечивание, электропроводности и др.), либо косвенного измерения (теневого, интерферометрического, рассеивания света и т.д.). Учитывая особенности экспериментального участка, вызванные наличием на поверхности канала сеточного покрытия, целесообразным является использование контактного метода. При этом, толщина плёнки определяется по положению острия иглы в момент касания поверхности плёнки. Момент касания регистрируется при возникновении электрического сигнала на вторичном приборе Щ-300 в момент замыкания электрической цепи между иглой и токопроводящей плёнкой, либо визуально, через оптическую систему с увеличением в 25 раз. Точность измерения обеспечивалась использованием координатного механизма со шкалой 0,01 мм. Учитывая особенности течения плёнки по вертикальным поверхностям, методом каса-

ния возможно с большой точностью определить толщину плёнки при режиме безволнового течения, начало волнообразования и амплитуду волны. Однако, при исследовании волновых характеристик погрешность измерений связана со смачиваемостью иглы, из-за чего не совсем точно фиксируется момент выхода иглы из волны.

В качестве орошаемой поверхности использовались технически гладкие трубы из стали Х18Н10Т с внешним диаметром  $(16...24) \cdot 10^{-3}$  м и длиной 1 м. Средняя высота выступов шероховатости поверхности составляла  $(0,008...0,01) \cdot 10^{-3}$  м. В качестве покрытия использовалась сетка из стали Х18Н10Т обычного плетения с размером ячейки в свету  $S = (0,4...0,63) \cdot 10^{-3}$  м и диаметром проволоки  $d_{\text{пр}} = (0,16...0,3) \cdot 10^{-3}$  м. Перед проведением экспериментальных исследований рабочий участок подвергался тщательному обезжириванию. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная и сетевая вода.

#### **Методика исследования гидродинамики пленочного течения**

Учитывая важность такой характеристики как минимальная плотность орошения  $\Gamma_{\text{min } 2}$  и достаточно большой разброс экспериментальных данных, приведенных в литературе, в качестве тестовых исследований на экспериментальной установке были определены значения  $\Gamma_{\text{min } 2}$  при гравитационном течении плёнки жидкости по гладкой вертикальной поверхности. Методика проведения экспериментов заключалась в определении момента разрыва плёнки при уменьшении расхода жидкости, которая подавалась на наружную поверхность предварительно смоченного канала. В момент появления одиночных сухих пятен, которые со временем повторно не смачивались, фиксировался расход жидкости по показаниям ротаметров, и определялась  $\Gamma_{\text{min } 2}$ . Для статистического повторения результатов и исключения влияния случайных факторов опыты проводились более 8 раз. Сопоставление полученных результатов с данными других авторов представлено в табл.1. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с известными результатами [7- 10], что позволяет сделать вывод о том, что методика проведения опытов и экспериментальная установка удовлетворяют поставленной задаче.

Табл.1. Минимальная толщина плёнки жидкости, гравитационно стекающей по вертикальной поверхности

Авторы	$Re_{пл\ min\ 1}$	$\delta_{min\ 1} \cdot 10^4, \text{ м}$	$Re_{пл\ min\ 2}$	$\delta_{min\ 2} \cdot 10^4, \text{ м}$
Воронцов Е.Г. [8]	293	4,48	2,29...4,12	0,6...1,08
Watanabe K., Munakata T., Mutsuda A. [9]	15...100	1,66...3,12	0...13	0,845...1,53
Simon F., Hzu Y.Y. [10]	—	—	13,8	1,45
Семёнов П.А. [7]	6,7	5	—	—
Экспериментальные данные	—	—	2,75...3,2	0,6...0,7

Следует отметить, что процесс разрыва плёнки жидкости на гладкой поверхности и поверхности с сеточным покрытием, подчиняясь общим закономерностям физики поверхностных явлений, имеет существенные отличия, которые определяются дополнительными капиллярными силами, действующими в ячейках сетки.

Непосредственные измерения толщины плёнки в каналах с сеточным покрытием стенкок проводились только при ламинарном режиме течения. Толщина плёнки измерялась иглой, перемещаемой с помощью координатного механизма, который позволял перемещать весь измерительный узел в горизонтальной в вертикальной плоскостях, с целью обеспечить измерение толщины плёнки в центре ячейки сеточного покрытия. Нулевое положение иглы относительно стенки определялось с помощью электрического контакта с сухой стенкой канала. Методика проведения опытов заключалась в установлении соответствующего расхода жидкости (либо из бака, при работе на дистиллированной воде, либо из сетевого коллектора) при помощи игольчатого вентиля. Контроль и величина расхода определялись по показаниям ротаметров.

#### Особенности гидродинамики пленочного течения по вертикальным поверхностям с сеточным покрытием

При исследовании гидродинамики пленки, гравитационно текущей по стенке вертикального канала с сеточным покрытием, было установлено ряд особенностей связанных с действием капиллярных сил в ячейке сетки, что позволило выделить характерные области ламинарного течения плёнки жидкости (рис.1). В ходе экспериментов исследовался широкий диапазон изменения плотности орошения: от значения  $Fr = 2.5 \cdot 10^{-1}$ , который соответствовал полностью затопленной сеточной структуре, и до значения  $Fr = Fr_{min\ 2}$ , при котором происходил разрыв пленки с переходом ее в ручейковое течение.

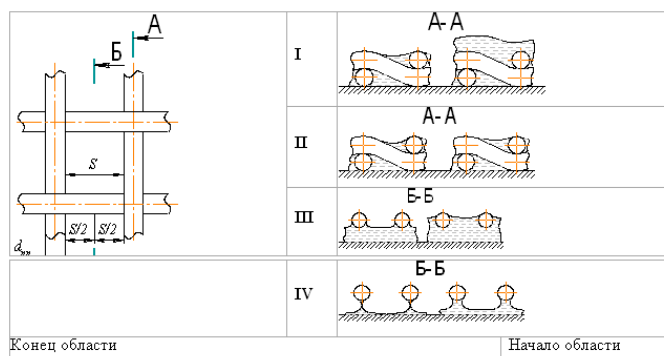


Рис. 1. Характерные стадии гравитационно-течения жидкости в вертикальных каналах с сеточным покрытием в зависимости от плотности орошения:

*I* – область полностью затопленного сеточного покрытия; *II* – область, когда пленка находится в верхних границах сеточного покрытия; *III* – область, в которой происходит переход пленки к нижней границе сеточного покрытия; *IV* – область квазиравновесного пленочного течения с переходом в ручейковое.

Результаты исследования зависимости локальной безразмерной толщины  $\delta^* = \delta / \sqrt[3]{(v^2/g)}$  гравитационно стекающей плёнки жидкости по вертикальной поверхности с сеточным покрытием от плотности орошения представлены на рис.2.

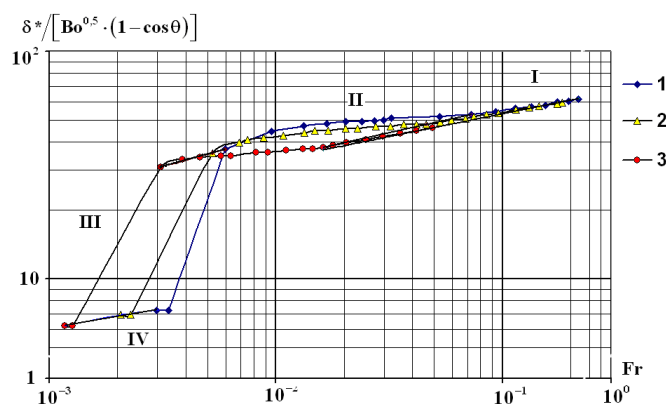


Рис. 2. Безразмерная толщина пленки в зависимости от плотности орошения при гравитационном течении в вертикальных каналах с сеточным покрытием:



1 – размер ячейки сетки  $S = 0,63 \cdot 10^{-3}$  м;  
2 –  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $0,40 \cdot 10^{-3}$  м.

Первая область характеризуется монотонным изменением толщины плёнки в зависимости от плотности орошения. Изменение толщины плёнки на стенке с сеточным покрытием идентично изменению толщины плёнки при течении в вертикальных каналах с гладкими стенками, полученной в работах [1,2]. Для I области нижний диапазон определяется плотностью орошения, при которой происходит затопление сеточной структуры (рис. 1., I). Граница затопления зависит от геометрических характеристик сетки и определяется

$$\delta_{зл}^* = 2 \cdot d_{пр} \quad (1)$$

Экспериментальные данные по изменению толщины плёнки в I области обобщаются с погрешностью  $\pm 7\%$  зависимостью:

$$\delta_{I_{вх}}^* = 84,127 \cdot Fr^{0,2} \cdot Bo^{0,5} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

Область II характеризуется относительно стабильной толщиной плёнки. Изменение плотности орошения не приводит к значительному изменению её толщины.

Превалирующими в этой области являются силы поверхностного натяжения, которые удерживают плёнку в структуре сеточного покрытия. Диапазон изменения толщины плёнки для этой области характеризуется началом появления верхней образующей проволоки в месте их переплетения (рис. 1., II) и толщиной плёнки в центре мениска, образованного жидкостью между проволоками ячейки сетки в сечении Б-Б. Причём, угол точки контакта плёнки на образующей проволоки приближается к значению угла  $\beta \approx \pi/2$ , а безразмерная толщина плёнки в конце II области определяется зависимостью

$$\delta_{II_{вх}}^* = 147,68 \cdot Fr^{0,27} \cdot Bo^{0,5} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

При дальнейшем уменьшении плотности орошения в области III происходит скачкообразное изменение толщины плёнки. Очевидно, что в этой области баланс сил складывается таким образом, что силы инерции становятся меньше когезии. Нижняя граница этой области характеризуется плёночным течением жидкости по гладкой поверхности трубы и наличием менисков под нижней образующей проволок ячейки сетки (рис. 1, III).

Для четвёртой области характерным является относительно стабильное течение плёнки. Причём, места контакта сетки с стенкой канала

можно рассматривать как местные сопротивления. Толщина плёнки в этой области близка к минимально допустимой и при небольшом изменении плотности орошения происходит разрыв плёнки с образованием сухих пятен (рис. 1., IV). Повторное смачивание образовавшихся пятен возможно только после полного затопления сеточного слоя.

Безразмерная толщина плёнки и минимальная плотность орошения, соответствующая началу процесса разрыва плёночного течения в IV области, обобщаются зависимостями

$$\delta_{\min 2}^* = 19,65 \cdot Fr^{0,17} \cdot Bo^{0,5} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

$$\text{и } Fr_{\min 2} = 0,1063 \cdot Bo^{1,44} \cdot (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

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

Следует отметить, что неоднозначный характер изменения характеристик плёночного течения во всём исследованном диапазоне плотностей орошения требует экспериментального подтверждения применимости зависимостей для определения нижней границы захлёбывания в каналах насадок с сеточным покрытием стенок.

### Выводы

1. Экспериментальное исследование гидродинамики гравитационного течения плёнки по вертикальной стенке с сеточным покрытием при изменении плотности орошения позволило выделить несколько характерных областей, границы которых определялись не только динамикой взаимодействия плёнки и газа с учётом сил инерции и вязкости, но и капиллярными силами.

2. Получены эмпирические зависимости, позволяющие определить толщину пленки жидкости для характерных областей в зависимости от плотности орошения.

3. Определены зависимости минимальной плотности орошения от геометрических характеристик сеточного покрытия и условий смачиваемости жидкости, которые позволили определить нижнюю границу диапазона работы исследуемого типа контактных тепломассообменных аппа-

ратов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Капица П.Л. Волновое течения тонких слоёв вязкой жидкости/ П.Л. Капица // ЖЭТФ. – 1948. – Т. 18, вып.1. – С. 3-28.
2. Nusselt W. Die Oberflächenkoondensation des Wasserdampfes/ W.Nusselt // Zeitschrift VDI. – 1916. – Bd, 60. – S. 541-546.
3. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении плёнки жидкости/ Г.Гимбутис. – Вильнюс: Мокслас, 1988. – 233 с.
4. Алексеенко С.В. Волновое течение плёнок жидкости/ С.В.Алексеенко, В.Е.Накоряков, Б.Г.Покусаев. – Новосибирск: ВО "Наука", 1992. – 256 с.
5. Ганчев Б.Г. Экспериментальное исследование гидродинамики плёнок жидкости, стекающих под действием силы тяжести по вертикальным поверхностям/ Б.Г.Ганчев, В.М.Козлов, В.В.Лозовецкий, В.М.Никитин // Изв. Вузов СССР. – Серия Машиностроение. – 1970. – № 2.

6. Беседин С.М. Экспериментальные методы исследования волнового течения тонких плёнок жидкости/ С.М.Беседин// Физическая гидродинамика и теплообмен. – 1978. – № 4. – С. 504-511.

7. Семёнов П.А. Течение жидкости в тонких слоях (II)/ П.А.Семёнов// Журн. теор. физ. – 1950. – Т. 20., вып. 8. – С. 980-990.

8. Воронцов Е.Г. О минимальной плотности орошения вертикальных плёночных аппаратов/ Е.Г.Воронцов// ИФЖ.. – 1968. – Т. 14, № 4. – С.1075-1078.

9. Watanabe K. Minimum wetting rate on wetted-wall colum-correlation over wide range of liquid viscosity/ K.Watanabe, T.Munakata, T.Mutsuda// J. Chem. Eng. Japan. – 1975. – Vol, 8., № 1. – P. 75-77.

10. 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.

**Москаленко А.А.<sup>1</sup>, Яцевский В.В.<sup>1</sup>, Хмяляйнен Л.Т.<sup>2</sup>, Надтока В.Н.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН

<sup>3</sup>Государственное конструкторское бюро "Южное"

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ

Данная статья посвящена решению актуальной проблемы увеличения срока эксплуатации крупногабаритных трубных заготовок специального назначения, подвергающихся циклическим ударным воздействиям на внутреннюю поверхность сверхвысоких температур (2500...3500 °С), давлений (1406...5624 МПа) и механического трения [1]. Решающим фактором в потере работоспособности является эрозия – удаление частичек металла с его внутренней поверхности. Один из наиболее эффективных методов борьбы с эрозией – нанесение защитной плёнки металла повышенной твёрдости (хром и др. ) между поверхностью и потоком газов. Нанесение ионно-плазменного защитного слоя хрома на внутреннюю поверхность заготовки спецтрубы должно проводиться при температуре поверхности металла трубной заготовки в преде-

лах 300...350 °С. При этом будет сохранён необходимый уровень сопротивления металла малым пластическим деформациям циклических нагрузок, характеризующийся пределом упругости или коэффициентом пропорциональности.

Однако, в экспериментах, проведенных на трубных заготовках, зафиксирован значительный перегрев в зоне напыления. При перегреве металла понижаются его прочностные свойства (твёрдость, прочность, упругость и т.д.), приобретённые после предшествующей операции финишной термообработки, что негативно скажется на продолжительности его эксплуатации. Для обеспечения высокого качества адгезии защитного покрытия необходимо выполнять требование соблюдения оптимального температурного коридора: от 300 до 350 °С [3].

При постановке задачи данной работы, авто-