УДК 532.536

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТЕНКИ НА ТЕЧЕНИЕ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

Перепелица Б. В., Овчинников В.В.

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке Грант РФФИ 12-08-00257-а «Экспериментальное исследование течения мини- и микроструй в компактных устройствах».

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты визуальных исследований структуры потока при течении затопленной круглой микроструи в узком канале, одна стенка в котором покрыта микротекстурой. Исследования выполнены при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. По данным фото и видео регистрации картины течения были выявлены характерные особенности режимов течения струи при наличии микротекстуры. В потоке обнаружены характерные крупномасштабные вихревые структуры и зоны с интенсивным турбулентным перемешиванием. Ламинарный и переходной режим течения характеризуется сильной зависимостью длины ламинарной зоны струи от числа Re. Для турбулентного режима течения эта зависимость менее выражена и длина ламинарной зоны струи уменьшается с ростом числа Re. Установлено, что фронт растекания жидкости на определенном расстоянии от ядра струи принимает форму круга т.е. радиальная составляющая фронта растекания по всему периметру круга постоянная. Показано, что при переходных числах Рейнольдса из-за влияния микроструктуры на стенке канала наблюдается анизотропия течения в зазоре относительно оси затопленной струи.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интерес к изучению микротечений значительно возрос, что связано, с развитием принципиально новых технологических устройств макро и микроразмеров. Появилась возможность использования микроструй в таких процессах, как микроохлаждение электронных устройств, микрообработка, перемешивание микрообъемов растворов в химической и биологической промышленностях и т.д. Исследование микрогидродинамики в мини- и микроканалах играет важную роль при создании различных новых компактных устройств. Особый интерес представляют структурированные поверхности с различными микроканалами, которые способствуют интенсификации тепло и массообмена. В работах [1-8] исследованы закономерности теплообмена, развития кризисных явлений при испарении и кипении в условиях пленочных течений фреонов и их смесей на поверхностях с различной структурой. Получены принципиально новые результаты по влиянию геометрии структурированной поверхности на интенсификацию теплообмена, волновые характеристики, выявлены закономерности развития кризиса теплообмена. Экспериментальным наблюдениям структуры потока и образованию когерентных структур в турбулентных течениях посвящено большое количество работ. Для изучения закономерностей течения широко используют различные методы визуализации потока с целью непосредственного наблюдения сложных нестационарных турбулентных движений. Свободные струи структурно относятся к сдвиговым слоям, имеющим когерентные структуры сравнительной простоты: основные элементы - это линейные вихри для двумерных конфигураций и кольцевые или спиральные вихри в случаях осевой симметрии. Особый интерес представляет изучение течения микроструй в узких каналах. Влияние боковых стенок на формирование потока может выявить дополнительную информацию о структуре течения

© Перепелица Б. В., Овчинников В.В.

струи. Наличие горизонтально ориентированной микротекстуры 035 приводит к возникновению более сложной структуры на поверхности пленки, чем на гладкой поверхности. Пленка покрывается волнами с характерными размерами равными шагу микротекстуры. Площадь поверхности при этом возрастает, что может приводить к интенсификации процессов тепло и массообмена.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование структуры потока при течении затопленной круглой микроструи в узком канале, одна стенка в котором покрыта микротекстурой.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка представляла собой гидродинамический контур, состоящий из бака постоянного уровня, расходомера и рабочего участка. Узкий канал, в который происходило истечение струи, представлял собой зазор между двумя стеклянными пластинами размером 110x140 мм или 220x260 мм., помещенных вертикально в сосуд с водой. На одну из пластин была наклеена металлическая пластина с горизонтально расположений микротекстурой. Профиль микроструктуры имел форму треугольника со скругленными вершинами. Шаг профиля 1,75 мм, радиус вершины 0,035 мм, глубина профиля 0,175 мм. Величина зазора между пластинами составляла 1,05 мм. Все четыре боковые стенки канала были открыты. Истечение струи происходило из трубки с внешним диаметром 1,05 мм, внутренним 0,65 мм и длиною 50 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

В данных экспериментах проводились визуальные исследования с использованием красителей. Расход воды через сопло поддерживался постоянным с помощью бака постоянного уровня. Средняя расходная скорость струи на выходе из сопла изменялась от 0,2 до 7,5 м/сек. Исследования проведены в диапазоне чисел Рейнольдса Re от 160 до 5600

$$\left(\mathrm{Re}=\frac{W\cdot D}{\nu}\right),$$

где W - средняя расходная скорость, D - внутренний диаметр трубки, ν - кинематическая вязкость жидкости). Визуализация картины течения осуществлялась путем фото и видео регистрации картины течения. Развитие структуры потока визуализированной светорассеивающими частицами и красителем снимались на видеокамеру. Скорость видеосъёмки 50 к/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Ламинарный и переходной режим течения как и в случае двух гладких пластин характеризуется ростом длины ламинарной зоны струи от числа Re. Для турбулентного режима течения эта зависимость слабая, и длина ламинарной зоны струи уменьшается с ростом числа Re (рис. 1). С ростом числа Рейнольдса начинают возникать локальные возмущения, которые приводят к асимметричной синусоидальной неустойчивости.

Большой интерес представляет формирование фронта растекания струи при постоянном расходе. Для этой цели после втекания неокрашенной жидкости резко начиналась подача окрашенной жидкости. При этом расход подачи жидкости не изменялся. Пример такого формирования фронта растекания струи показан на рис. 2. Установлено, что фронт растекания жидкости на определенном расстоянии от ядра струи принимает форму круга, т.е. радиальная составляющая фронта растекания по всему периметру круга постоянная.

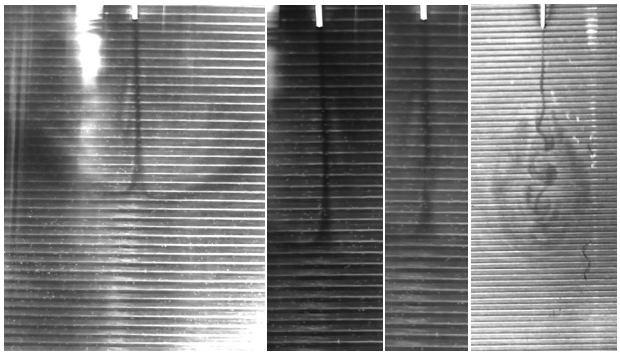

Рис.1 Различные варианты режимов течения струи.

Таким образом, средняя радиальная составляющая скорости растекания фронта жидкости равна $Q/(2\cdot\pi\cdot R\cdot h)$, т.е. убывает обратно

пропорционально расстоянию от центра круга.

Влияние микротекстуры заметно сказывается при нестационарном течении. На рис. 3. приведена картина эволюция растекания струи при резком изменении расхода, вызванного быстрым открытием крана. Обработка такого режима представлена ниже.

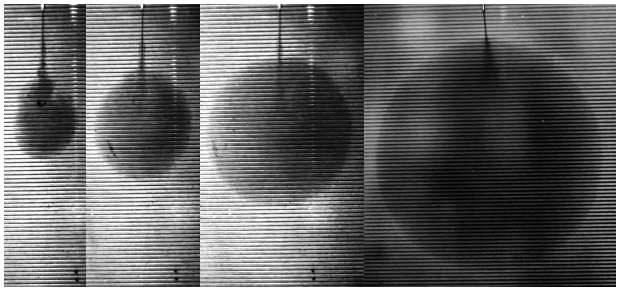

Рис.2 Эволюция растекания струи при постоянном расходе (турбулентный режим).

Влияние микроструктуры стенки на течение затопленной струи в узком зазоре проявляется в анизотропии течения в продольном и поперечном направлении. В частности, можно считать, что коэффициент гидравлического сопротивления x в поперечном направлении в основном определяется трением на стенке, а в продольном определяется суммой местных сопротивлений на вершинах профиля микроструктуры стенки.

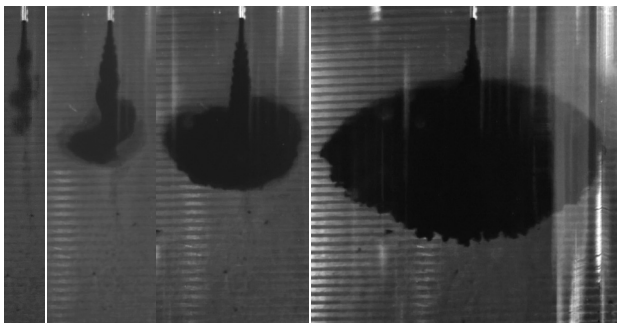

Рис.3 Эволюция растекания струи при резком изменении расхода (турбулентный режим).

Известно, число Рейнольдса влияет на местное сопротивление x_p главным образом при малых его значениях. При $Re < 10^3$ коэффициенты местного сопротивления монотонно возрастают с уменьшением числа Рейнольдса. При $Re > 10^5$ коэффициенты местного сопротивления можно считать постоянными. В переходной области $10^3 < Re < 10^5$ коэффициент местного сопротивления x_p изменяется немонотонным образом, но его абсолютное значение не сильно отличается от асимптотического значения при $Re > 10^5$. Поэтому в переходной области в зависимости от числа Рейнольдса возможно различные варианты анизотропии распределения потока жидкости относительно оси затопленной струи.

На рис. 4. приведена картина эволюция растекания струи при Re = 1974. Обработка такого режима представлена ниже. На рисунке 5 представлены результаты изменение положения характерных границ области от времени. G1 - нижняя граница, G2 - верхняя граница, G3 - нижний край диполя (на рис. 4 показаны положения точек G1, G2, G3 для момента времени t = 0,96 с). Видно, что со временем скорость движения нижней граница замедляется. Положение диполя со временем практически не меняется.

Нижняя границу области, в которую растекается жидкость, в первом приближении описывается дугой эллипса. На рис. 4 приведены положение центра эллипса (X_0, Y_0), угол наклона q для различных моментов времени t. Эксцентриситет эллипса

$e(t) = \sqrt{1.0 - \left[\frac{b(t)}{a(t)}\right]^2}$ уменьшается от 0,7 до 0,6.

Используя геометрические параметры эллипса, была проведена оценка расхода жидкости на нижней границе q. Для этого измерялся объём V сектора эллипса с углом j по формуле

$$V(t,\varphi) = S(t,\varphi)\cdot\left(\delta + \frac{W}{H}\right) \quad (1)$$

$$S(t,\varphi) = 2\cdot a(t)\cdot b(t)\cdot \operatorname{arctg}\left[\frac{a(t)}{b(t)}\cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right]$$

$$W = 2\cdot\frac{h}{2}\cdot\left(\frac{H-\varsigma}{2}\right) + \varsigma\cdot h$$

здесь t - время от подачи жидкости с красителем в зазор, a - большая ось эллипса, b - малая ось эллипса, δ - толщина зазора между гладкой стенкой и вершиной микроструктуры, H - шаг профиля микроструктуры, h - высота профиля микроструктуры, ς - ширина вершины профиля микроструктуры, φ - угол сектора. Используя зависимость объёма сектора от времени определялся расход жидкости через дугу сектора

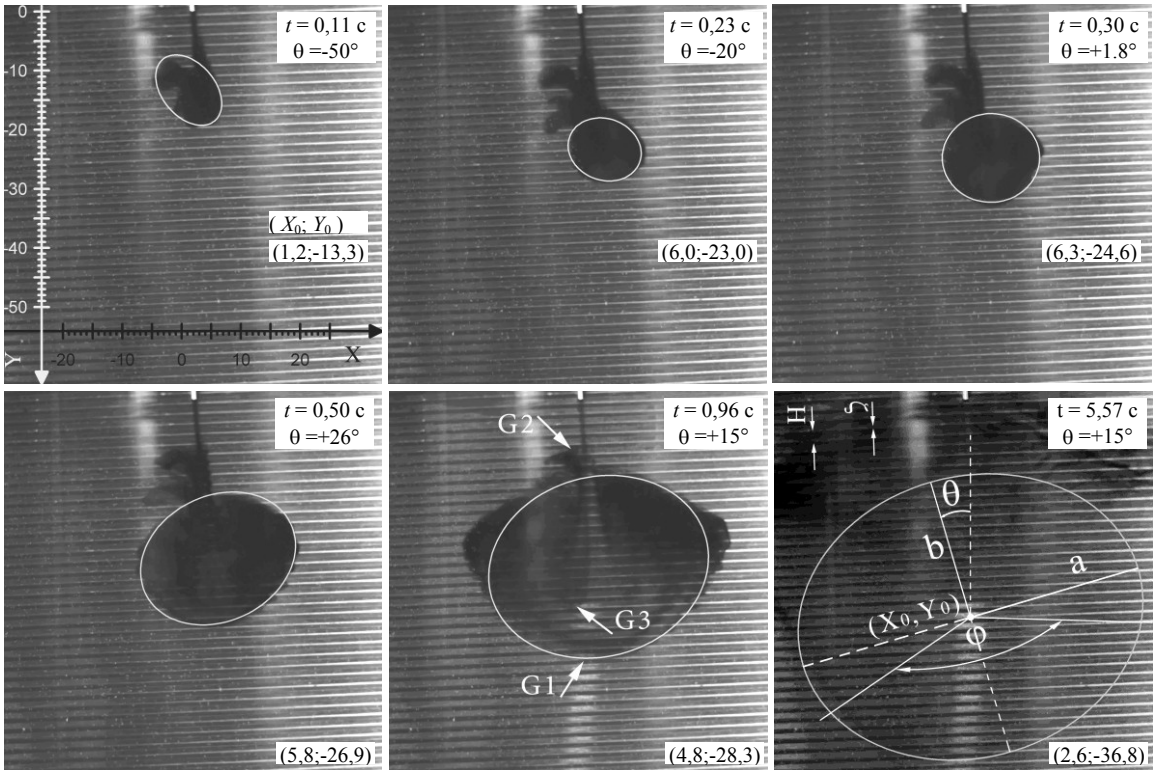

Рис.4 Кадры видеосъёмки течения жидкости с красителем между гладкой и структурированной пластинами при расходе 0,94 мл/с (Re = 1974). Схема расположения эллипса для определения нижней границы области заполнения зазора жидкостью с красителем. t - время от подачи жидкости с красителем.

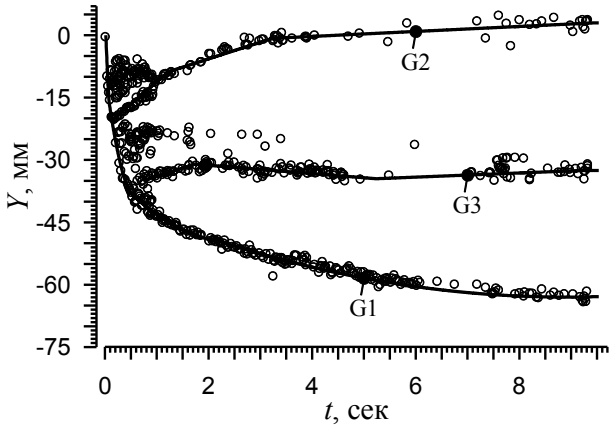

Рис.5 Изменение положения границ области от времени: нижняя - G1, верхняя - G2, нижняя диполя - G3. Для расхода q_0 = 0,94 мл/с. Re = 1974.

$$q(t,\varphi)=\frac{d}{dt}V(t,\varphi) \qquad (2).$$

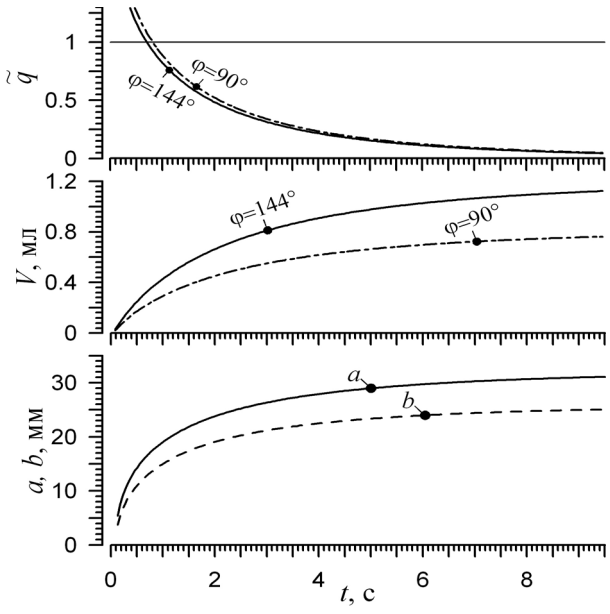

Рис.6 Изменение размеров нижней области и относительного расхода $\tilde{q}(t,\varphi)$ через нижнюю границу в зависимости от времени. Для расхода q_0 = 0,94 мл/с. Re = 1974.

Для оценки неоднородности распределения расхода жидкости использовался безразмерный относительный расход $\widetilde{q}$

$$\widetilde{q}(t,\varphi)=\frac{q(t,\varphi)}{q_0}\cdot\frac{360^\circ}{\varphi} \quad (3).$$

где q_0 - объёмный расход жидкости на выходе из иглы.

На рис. 6 показана зависимость от времени расхода через нижнюю границу сектора и длины осей эллипса для Re = 1974. Видно, что с течением времени расход стабилизируется. При этом относительный расход через нижнюю границу вначале выше однородного среднего, но затем сильно уменьшается. Т.е. основной расход идет вдоль профиля микроструктуры (зона наибольшего сечения зазора).

Перепад давления от точки растекания до границы зазора имеет примерно одно значение DP

$$\left(\Delta P=\xi\cdot\frac{\rho\cdot w^2}{2}\right).$$

В продольном направлении (Y) сопротивление x_y определяется суммой местных сопротивлений на вершинах профиля

$$\xi_y \sim \sum_{i\approx 1,\frac{b}{H}}\xi_p .$$

В поперечном направлении (X) оно x_x определяется в основном трением

$$\xi_x \sim \frac{a}{\delta+h}\cdot\xi_f .$$

При большом количестве вершин $\xi_y > \xi_x$ и в этом случае скорость w в продольном направлении уменьшается на порядок. На кадрах (рис. 4) это так же видно. При больших временах верхняя зона темнее нижней, так как основной поток подкрашенной жидкости движется вдоль профиля микроструктуры. И, соответственно, число частиц красителя на единицу объёма там выше.

ВЫВОДЫ

В результате исследования течения круглой микроструи в узкий канал были выявлены основные характерные режимы течения; ламинарный, ламинарный с двумерными вихревыми структурами, переходной режим и турбулентный режим течения. При ламинарном режиме течения поле течения струи в узком канале можно разделить на две области: инерционная область с возвратными течениями и область вязкого течения. Показано, что начиная с числа Re 450, струя становится неустойчивой и возникают различного вида возмущения. Развитие синусоидальной неустойчивости приводит к формированию вихревых структур. Основной особенностью течения микроструи в узком канале является продолжительный ламинарный начальный участок струи. Переходной режим течения характеризуется распадом струи вследствие внезапной потери устойчивости. Переход к турбулентному режиму течения, сопровождается интенсивным вовлечением внешней жидкости в ядро струи и ее распадом. С увеличением числа Рейнольдса длина ламинарного участка струи уменьшается и точка распада струи приближается к соплу. Установлена следующая закономерность растекания жидкости на периферии. Жидкость растекается по кругу за исключением небольшой области около сопла. Таким образом, средняя радиальная составляющая скорости растекания фронта жидкости равна $Q/(2\cdot\pi\cdot R\cdot h)$. Подобно этому, при растекании струи в большом объеме на определенном удалении от нее может формироваться шар с равной радиальной составляющей скорости. Показано, что при переходных числах Рейнольдса из-за влияния микроструктуры на стенке канала наблюдается анизотропия течения в зазоре относительно оси затопленной струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pecherkin, N.I., Pavlenko, A.N., Volodin, O.A. (2011), “Heat transfer at evaporation of falling films of Freon mixture on the smooth and structured surfaces”, *Thermophysics and Aeromechanics*, , Vol. 18, Iss. 4, pp 579-589.
2. Trifonov, Yu.Ya. (2007), “Stability and nonlinear wavy regimes in downward film flows on a corrugated surface,” *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, Vol. 48, No. 1, pp. 91−100.
3. Pecherkin, N.I., Pavlenko, A.N., Volodin,

O.A. (2012), “Flow dynamics, heat transfer and crisis phenomena in the films of binary freon mixtures, falling over the structured surface”, *International Journal of Fluid Mechanics Research (IJFMR)*, Vol. 39, Iss. 2, pp. 125–135.

4. Pavlenko, A., Pecherkin, N., Chekhovich, V., Volodin, O. (2009), “Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry”, *Microgravity Sci. Technology*, Vol. 21, Iss. 1, pp. 207−213.
5. Pecherkin, N.I., Pavlenko, A.N., Volodin, O.A. (2012), “Heat transfer and crisis phenomena at boiling in films of Freon mixtures flowing down the ribbed tube”, *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 19, Iss. 1 (in print).
6. Trifonov, Yu.Ya. (2007), “Stability of a viscous liquid film flowing down a periodic surface”, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 33, No. 11, pp. 1186−1204.
7. Perepelitsa, B.V. (2011), “About the effect of microtexture on liquid film formation on a vertical surface”, *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 18, Iss. 3, pp. 519−522.
8. Perepelitsa, B.V. (2007), “Investigation of the temperature field in a turbulent air flow in the channels with structured packing”, *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 14, Iss. 4, pp. 525−531.