

*С. А. Здорников<sup>1,2\*</sup>, С. В. Исаенков<sup>1</sup>, А. В. Черданцев<sup>1</sup>*

## **Аксиальное и азимутальное развитие волн возмущения в газожидкостном течении в горизонтальной трубе**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: s.zdornikov@g.nsu.ru

**Аннотация.** В данной работе методом лазерно-индуцированной флуоресценции, основанном на измерении яркости, были получены пространственно-временные матрицы толщины жидкой пленки. Была изучена динамика жидкой пленки на протяжении 900 мм от входа в канал в трех азимутальных положениях: 0°, 90° и 180°. Волны возмущения образуются в нижней части канала и, обладая окружной компонентой скорости, напозают на его стенки. При высоких расходах жидкости и газа крупномасштабные волны приобретают кольцевую форму вниз по течению. В низких и умеренных потоковых условиях волны возмущения покрывают только часть окружности канала, их края колеблются около определенного азимутального уровня, в конечном счете распадаясь на волны ряби и унося с собой жидкость обратно в подложку. При определенных потоковых параметрах пленка жидкости в верхней части канала заселена только мелкомасштабными волнами.

**Ключевые слова:** горизонтальное газожидкостное течение, кольцевой режим, волны возмущения, вторичные течения в газе

*S. A. Zdornikov<sup>1,2\*</sup>, S. V. Isaenkov<sup>1</sup>, A. V. Cherdantsev<sup>1</sup>*

## **Axial and Azimuthal Development of Disturbance Waves in Gas-Liquid Flow in a Horizontal Pipe**

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: s.zdornikov@g.nsu.ru

**Abstract.** In this paper, the spatiotemporal matrices of liquid film thickness were obtained using laser-induced fluorescence based on brightness measurement. The dynamics of the liquid film was investigated over 900 mm from the channel entrance in three azimuthal positions of 0°, 90° and 180°. Disturbance waves form in the lower part of the channel and, having a circumferential velocity component, creep onto its walls. At high liquid and gas flow rates, large-scale waves acquire an annular shape downstream. In low and moderate flow conditions, the disturbance waves cover only part of the circumference of the channel, their edges fluctuate around a certain azimuthal level, eventually breaking up into ripple waves and carrying the liquid back into the substrate with them. At particular flow parameters, the liquid film in the upper part of the channel is populated only by small-scale waves.

**Keywords:** horizontal gas-liquid flow, annular regime, disturbance waves, gas secondary flows

## *Введение*

Газожидкостный поток – это совместное течение жидкости и газа в канале. Такие течения реализуются в различных отраслях промышленности: они используются при транспортировке нефти и газа, в химической обработке, в охлаждении и кондиционировании воздуха. В определенных потоковых условиях течение становится кольцевым: газовое ядро занимает центральную часть канала, а жидкость образует замкнутую пленку, покрывающую внутреннюю поверхность трубы. В горизонтальном канале кольцевой режим устанавливается только в том случае, если в двухфазной системе существуют определенные процессы, которые противодействуют дренированию жидкости и поднимают ее вверх по стенкам канала. За время исследования этого вопроса было предложено несколько механизмов замыкания жидкой пленки в кольцевую форму: отрыв и последующее осаждение капель в верхней части трубы [1], заброс жидкости на стенки трубы крупномасштабными волновыми структурами [2], утягивание жидкости вторичными течениями в газе [3]. Каждый из вышеописанных механизмов вносит какой-то вклад в установление кольцевого режима, однако, остается открытым вопрос, какой же из процессов играет в этом первостепенную роль.

Взаимодействие между жидкой и газовой фазами приводит к образованию на поверхности жидкости волновых структур разных масштабов. Наибольший интерес среди них представляют волны возмущения, так как такие волны имеют трехмерную структуру, с их появлением существенно перестраивается газовое ядро, изменяется шероховатость на межфазной границе, и, как следствие, эти волны усиливают действие описанных выше механизмов по поднятию жидкости вдоль стенок канала. Таким образом, динамика волн возмущения и фундаментальное знание того, как они образуются, развиваются, сливаются и распадаются, вероятно, приблизит к глубинному пониманию процессов, происходящих в горизонтальном двухфазном потоке.

Несмотря на предоставленные исследователями сведения о крупных волнах [4–6], остаются нерешенными проблемы формирования волн, приобретения ими трехмерной формы, неизвестны причины и механизмы их слияния. Более того, знания о волнах возмущения довольно разрознены и не позволяют составить общую картину пленочного течения, обдуваемого потоком газа. Цель этого исследования заключается в том, чтобы проследить развитие волн возмущения с момента их образования в аксиальном и азимутальном направлениях.

## *Методы и материалы*

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Газожидкостное течение исследуется в горизонтальной оргстеклянной трубе длиной 2 м круглого сечения с внутренним и внешним диаметрами 20 мм и 30 мм соответственно. В газожидкостном распределителе 9 образуется поток сонаправленно текущих газа и жидкости. Газ подается в горизонтальную часть распределителя через централизованную линию 2. Жидкость накачивается из резервуара 5 с помощью насоса 6 в газожидкостный распределитель и уносится потоком газа в рабочий участок.

Проходя через рабочий участок, газожидкостное течение попадает в газожидкостный разделитель 10, в котором газ уходит в атмосферу, а жидкость поступает обратно в резервуар.

Газожидкостный распределитель 9 имеет Т-образную форму и состоит из горизонтальной и вертикальной частей – для подачи газа и жидкости соответственно. В газожидкостном распределителе газ и жидкость отделены металлической пластиной толщиной 1 мм для того, чтобы достичь их стратификации. Таким образом, в начале рабочего участка наблюдается стратифицированное течение, которое развивается и трансформируется вниз по потоку.

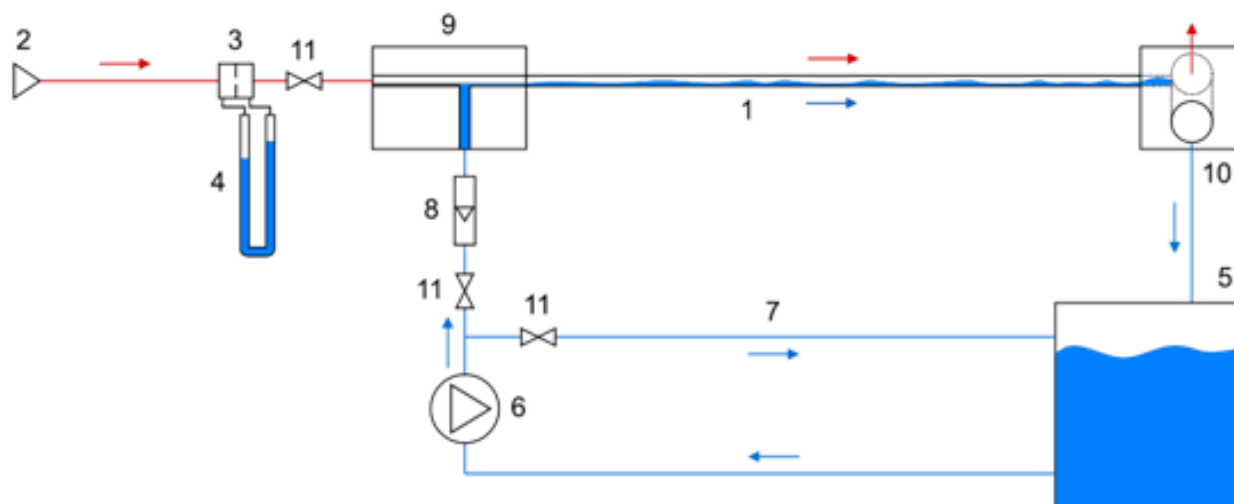


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – рабочий участок, 2 – централизованная линия сжатого воздуха,
- 3 – расходомер, 4 – U-образный манометр, 5 – резервуар, 6 – насос,
- 7 – обводная линия, 8 – поплавковый ротаметр, 9 – распределитель,
- 10 – разделитель, 11 – вентили

В качестве входных параметров были выбраны потоковые величины – расход жидкости и скорость газа. Расход жидкости изменялся в диапазоне от 3,8 мл/с до 25,1 мл/с. Поверхностная скорость газа варьировалась с шагом 5 м/с от 5 м/с до 40 м/с.

В эксперименте применялся основанный на яркости метод лазерно-индуцированной флуоресценции (BBLIF) для получения данных о толщине жидкой пленки. В жидкость был добавлен флюорофор Родамин 6Ж, который поглощал лазерный свет с длиной волны 532 нм и переизлучал его на частоте, отличной от частоты поглощения. Переизлученный свет регистрировался высокоскоростной камерой Phantom FASTCAM SA5 с частотой съемки 5 кГц в течение 5 с. Локальная толщина жидкой пленки определяется по его величине в заданной точке: яркость изображения тем выше, чем больше толщина пленки.

Толщина жидкой пленки  $h(x, t)$  была восстановлена из интенсивности света согласно закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(x,t) = C(x)(1+K)\left(1 - e^{-\alpha h(x,t)}\right)\left(1 + Ke^{-\alpha h(x,t)}\right),$$

где  $C(x)$  – опорный сигнал, позволяющий найти связь между яркостью изображения и толщиной жидкой пленки,  $K = 0,02$  – коэффициент отражения света от границы раздела двух сред газ-жидкость,  $\alpha$  – коэффициент поглощения света жидкой пленкой.

### Результаты

Данные, полученные в результате эксперимента, представляют собой картины пространственно-временных представлений – пространства в координатах время-расстояние вниз по потоку, в каждой точке которых хранится информация о мгновенной локальной толщине пленки (рис. 2–6).

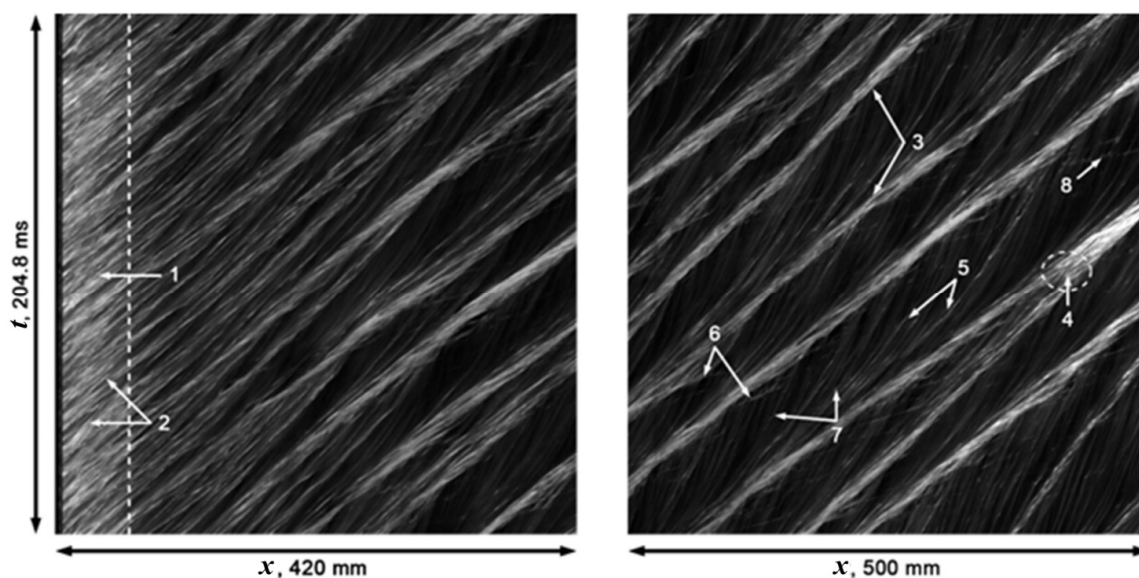


Рис. 2. Толщина пленки в нижней части канала ( $v_G=25$  м/с,  $Q_L=25,1$  мл/с)

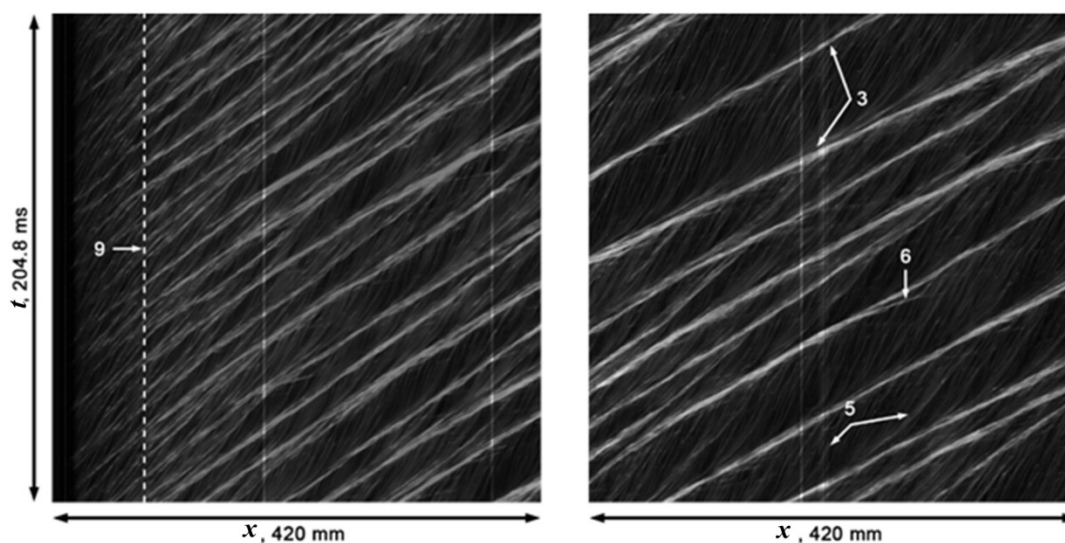


Рис. 3. Толщина пленки на стенках канала ( $v_G=35$  м/с,  $Q_L=25,1$  мл/с)

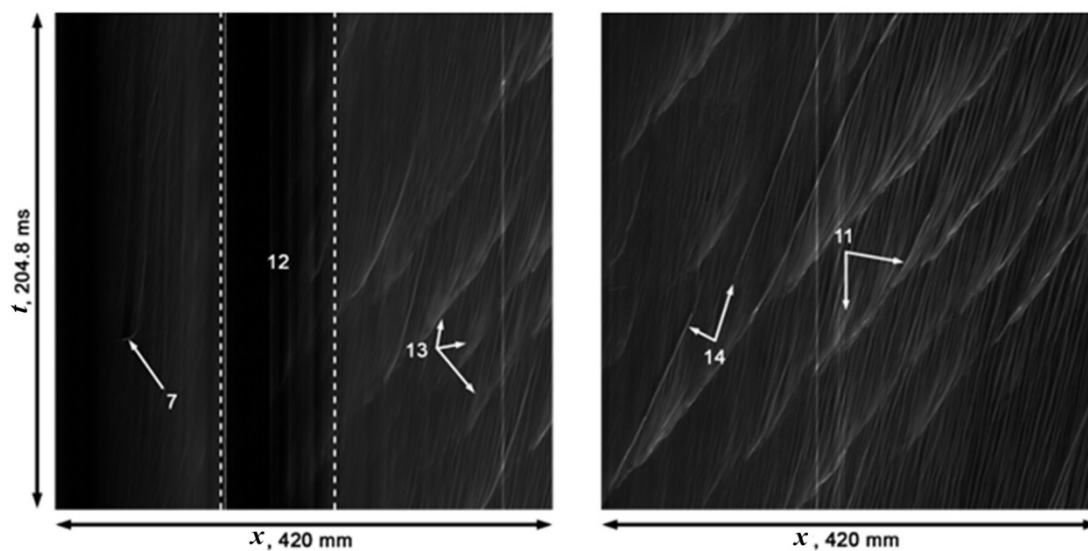


Рис. 4. Толщина пленки на стенках канала ( $v_G=25$  м/с,  $Q_L=3,8$  мл/с)

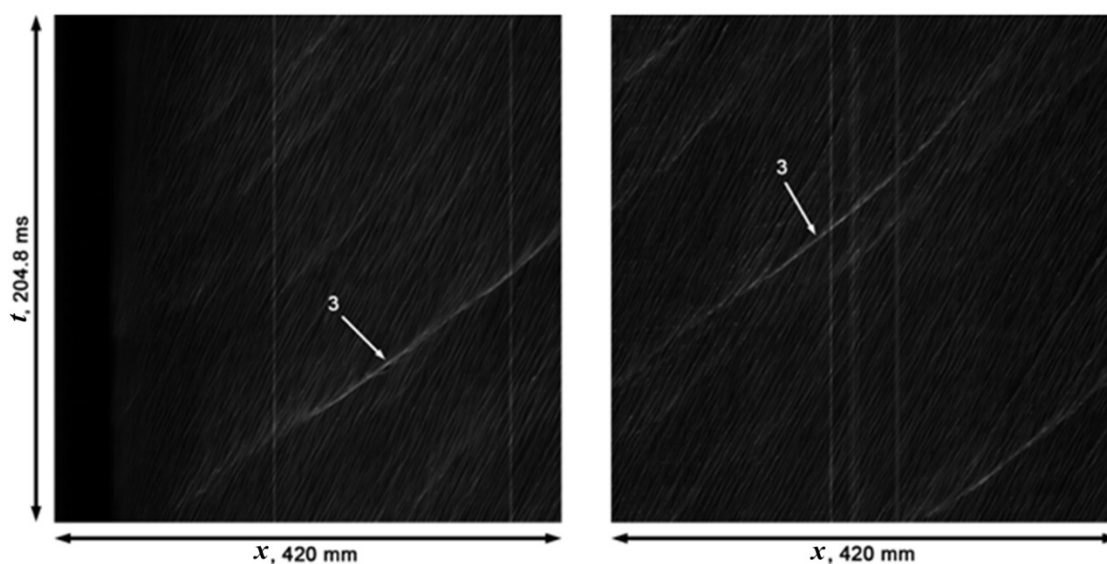


Рис. 5. Толщина пленки на стенках канала ( $v_G=40$  м/с,  $Q_L=3,8$  мл/с)

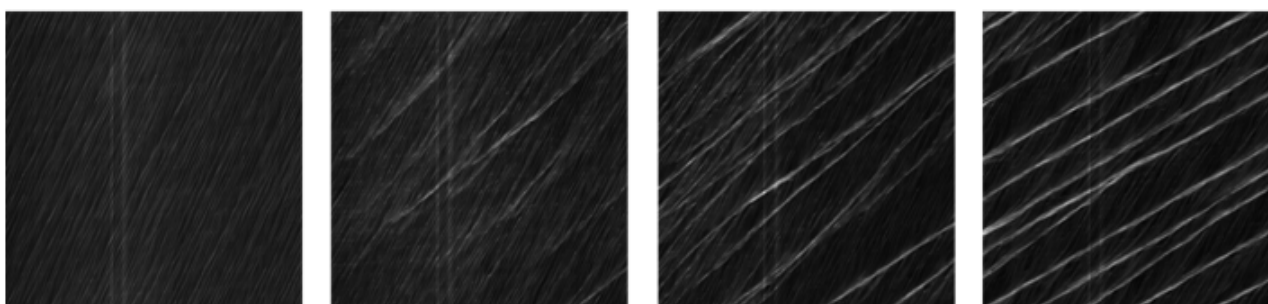


Рис. 6. Видоизменения жидкой пленки в области установления в верхней части канала при скорости газа  $v_G=35$  м/с в ходе увеличения расхода жидкости:  $Q_L=5,7$  мл/с,  $Q_L=8,8$  мл/с,  $Q_L=13,8$  мл/с,  $Q_L=25,1$  мл/с

## Обсуждение

На рис. 2 представлены пространственно-временные записи толщины жидкой пленки, соответствующие нижней части трубы. У входа в трубу образуется стабильный жидкий валик (1), на котором зарождаются мелкие волны (2). Эти волны в ходе многочисленных актов слияний между собой формируют крупные волны – волны возмущения (3), отчетливо видимые в области установления. Волны возмущения ускоряются вниз по потоку и на втором пространственном участке приобретают постоянную скорость (траектории волн становятся прямыми). Волны возмущения так же, как и мелкие волны на начальном участке, сливаются (4) – более быстрая волна возмущения догоняет более медленную и поглощает ее – но число таких слияний мало по сравнению с числом слияний начальных волн, поэтому частота волн возмущения меняется достаточно слабо. По жидкой подложке на задних склонах волн бегут волны медленной ряби (5), порождаемые одной волной возмущения и поглощаемые идущей вслед за ней. С гребней волн возмущения при высоких скоростях газа возможны отрывы капель (6) и их последующее движение над пленкой жидкости с очень высокой скоростью.

На стенках трубы при высоких расходах жидкости и газа в области установления наблюдается подобная картина (рис. 3): крупные волны возмущения (3) двигаются с постоянной скоростью, по базовой пленке распространяются волны медленной ряби (5), капли отрываются (6) с поверхности жидкости и какое-то время переносятся газовым ядром – другими словами, поток принимает свою конечную конфигурацию и стабилизируется. Жидкость взбирается на уровень  $90^\circ$  на расстоянии  $\sim 40$  мм от входа в канал, но жидкого валика, который существует в нижней части трубы, не образуется. Мелкие волны не зарождаются и не сливаются между собой в более крупные волновые структуры, как это происходит при азимутальном угле  $0^\circ$ , между тем, на начальном участке жидкая пленка представляет собой подложку с распространяющимися по ней волнами ряби, к которым на расстоянии  $\sim 100$  мм от входа в трубу присоединяются появившиеся волны возмущения (9). Это позволяет выдвинуть предположение о том, что крупные волны не формируются в других азимутальных положениях трубы как индивидуальные возмущения – они образуются в нижней части канала и, приобретая трехмерную структуру, расползаются по стенкам, увлекаемые одним из механизмов поднятия жидкости.

При низком расходе жидкой фазы (рис. 4) жидкость локально смачивает стенки трубы на начальном участке, потом опускается ниже уровня  $90^\circ$  (12) и окончательно снова взбирается выше этого уровня на расстоянии  $\sim 250$  мм вниз по потоку. Поточковые параметры этого двухфазного течения соответствуют полукольцевому режиму – действительно, заброса жидкости на стенки канала крупными волнами не происходит, так как они еще не сформировались, в то время как тонкая жидкая пленка, содержащая волны медленной ряби, утягивается образующимися в поперечном сечении вихрями газа, и только потом на ее поверхности появляются края волн возмущения. Края волн возмущения оказы-

ваются то выше, то ниже определенного уровня. Если над поверхностью жидкости появляется край волны возмущения, то он тут же распадается на более медленные волны (11), которые уходят в подложку.

При высоких скоростях газа и низких расходах жидкости (рис. 5) пленка жидкости становится практически однородной: по подложке бегут волны ряби, появление волн возмущения (3) весьма маловероятно. Скорее всего, это связано с тем, что жидкая пленка при таких скоростях газа становится слишком тонкой и не может снабжать крупную волну жидкостью. Если же волна все-таки поднимается на стенки канала, то ее дальнейшее поведение не является устойчивым и, замедляясь, она опускается ниже уровня  $90^\circ$ . Примечательно то, что задолго до того, как появляется что-то подобное волнам возмущения, жидкость уже смачивает стенки трубы – это косвенно подтверждает тот факт, что ключевым механизмом поднятия жидкости и установления кольцевого режима являются вторичные течения в газе.

Были проанализированы пространственно-временные матрицы и выделено пять волновых режимов течения (рис. 6) при углах, отличных от углов в нижней части канала:

- отсутствие жидкой пленки на внутренней поверхности трубы;
- наличие тонкой пленки жидкости, покрытой волнами медленной ряби;
- наличие пленки жидкости, на поверхности которой появляются края волн возмущения;
- наличие пленки жидкости, на поверхности которой края крупных волн сменяются нестабильными волнами возмущения;
- наличие пленки жидкости, по поверхности которой распространяются устойчивые волны возмущения, которые покрывают большую часть окружности трубы.

### *Заключение*

В ходе экспериментов с помощью BVLIIF-метода были исследованы и проанализированы видеоизменения жидкой пленки водовоздушного течения в горизонтальном канале круглого сечения в аксиальном и азимутальном направлениях.

Было заключено, что в азимутальном направлении течение развивается по одному и тому же сценарию: крупномасштабные волны образуются только в нижней части трубы и в определенных потоковых условиях приобретают трехмерную структуру, закольцовываясь по периферии канала вниз по потоку. В соответствии с развитием волн возмущения было выделено пять волновых режимов течения в азимутальных положениях, отличных от нижней части трубы.

Еще до того, как на поверхности жидкости крупномасштабные волны начинают напирать на стенки канала, жидкая пленка уже принимает полукольцевую форму – это указывает на то, что первопричиной установления кольцевого режима являются вторичные течения в газовой фазе, а волновые процессы играют второстепенную роль. В действительности же, все механизмы поднятия жидко-

сти по стенкам канала неразрывно связаны между собой, и вопрос их взаимосвязи предстоит решить в последующих исследованиях.

### ***Благодарности***

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. James P.W. et al. Developments in the modelling of horizontal annular two-phase flow // *Int. J. Multiph. Flow.* – 1987. – Vol. 13, № 2. – P. 173–198.
2. Jayanti S., Hewitt G., White S. Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow // *Int. J. Multiph. Flow.* – 1990. – Vol. 16, № 6. – P. 1097–1116.
3. Vollestad P., Angheluta L., Jensen A. Experimental study of secondary flows above rough and flat interfaces in horizontal gas-liquid pipe flow // *Int. J. Multiph. Flow.* Elsevier Ltd, 2020. – Vol. 125. – P. 103235.
4. Belt R.J. On the liquid film in inclined annular flow. – 2007. – P. 288.
5. Farias P.S.C. et al. Liquid film characterization in horizontal, annular, two-phase, gas-liquid flow using time-resolved laser-induced fluorescence // *Exp. Fluids.* – 2012. – Vol. 52, № 3. –P. 633–645.
6. Setyawan A., Indarto, Deendarlianto. Experimental investigations of the circumferential liquid film distribution of air-water annular two-phase flow in a horizontal pipe // *Exp. Therm. Fluid Sci.* Elsevier Inc., 2017. – Vol. 85. – P. 95–118.

© С. А. Здорников, С. В. Исаенков, А. В. Черданцев, 2024