



УДК 532.59

А.В. Черданцев^{1,2}, С.В. Исаенков^{1,2}, М.В. Черданцев^{1,2}, Д.М. Маркович^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, Лаврентьева пр., 1, E-mail: sergei.isaenkov@gmail.com

² Новосибирский государственный университет, Россия,
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОГО ТЕЧЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Волновая структура пленки жидкости в кольцевом газожидкостном течении была изучена с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) в канале с внутренним диаметром 15 мм. С целью исследования процесса формирования волн возмущения были проведены эксперименты на малом расстоянии от входа в канал, длина рабочего участка составляла 100 мм. Установлено, что при высоких скоростях газа и расходах жидкости волны возмущения присутствуют в области измерений, а также становятся доминирующими волновыми структурами на поверхности пленки жидкости. Показано, что формирование волн возмущения происходит благодаря слиянию мелкомасштабных высокочастотных волн, появляющихся на входе. Количественное исследование формирования волн проводилось с помощью спектрального метода. Был обнаружен перенос энергии в сторону низких частот. Был обнаружен значительный рост скорости волн.

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ, ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОЕ
ТЕЧЕНИЕ, ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В кольцевом потоке пленка жидкости стекает по стенкам канала под воздействием силы тяжести и касательного напряжения, вызванного высокоскоростным потоком газа. Начальные возмущения, возникающие в связи с первичной неустойчивостью пленки жидкости, развиваются в крупномасштабные горбы на поверхности пленки жидкости, которые традиционно называют волнами возмущения. Амплитуда волн возмущения в несколько раз превосходит толщину остаточного слоя между ними; они проходят большие расстояния без существенных изменений скорости, переносят основную часть жидкости и необходимы для уноса капель жидкости с поверхности пленки.

Авторы многих работ, направленных на изучение характеристик волн возмущения, получали временные записи толщины пленки с помощью методов с низким пространственным разрешением (таких как метод локальной электропроводности). В таких записях волны возмущения выглядят, как нелинейные волны с крутым передним склоном и пологим задним. Эта форма напоминает нелинейные волны, возникающие на поверхности стекающих пленок жидкости.

Hewitt et al. (1990) использовали оптический метод с высоким разрешением для визуализации поверхности пленки в продольном сечении канала. Они пришли к выводу, что волны возмущения представляют собой относительно небольшое плато, на котором развиваются высокоамплитудные волны ряби. Недавние работы с использованием метода PLIF (Schubring et al. 2010, Farias et al. 2012, Zadrazil et al. 2014), также свидетельствуют в пользу интерпретации, предложенной Hewitt et al. (1990). Schubring et al. (2010) использовали метод PLIF для определения средней высоты волн возмущения, с помощью которого было выявлено, что она в два раза больше, чем толщина остаточного слоя.

В работе Alekseenko et al. (2009) использовалась высокоскоростная модификация метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF). Было обнаружено, что все волны ряби рождаются на задних склонах волн возмущения. В зависимости от координаты рождения, волна ряби может распространяться либо медленнее, либо быстрее, чем «породившая» ее волна возмущения. В первом случае волна ряби движется по поверхности остаточного слоя за волной возмущения до тех пор, пока ее не поглотит следующая волна возмущения. Во втором случае волна ряби движется по поверхности волны возмущения и исчезает вблизи ее фронта. Исчезновение может происходить либо за счет затухания волны ряби на переднем фронте волны возмущения, либо из-за разрыва волны ряби потоком газа на капли. Этот процесс был описан Woodmansee & Hanratty (1969) и Azzopardi (1983).

Вопрос о механизме формирования волн возмущения остается открытым. Известно, что на большом расстоянии от входа волны возмущения распространяются с постоянной скоростью (Hall Taylor et al. 1963). Частота следования волн возмущения значительно падает с расстоянием от входа, что объясняется многочисленными актами слияния волн. Процесс слияния волн происходит из-за разницы скоростей отдельных волн возмущения (Hall Taylor & Nedderman 1968). Волна, образовавшаяся в результате слияния, как правило, движется со скоростью более быстрой из двух слившихся волн (Hall Taylor et al. 1963). До появления волн возмущения волновая картина представлена мелкомасштабными высокочастотными волнами, заметно отличающимися от волн возмущения (Zhao et al. 2013). Но связь между этими волнами и волнами возмущения не установлена. Целью работы является изучение процесса формирования волн возмущения вблизи от входа в канал.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Исследование волновой картины на поверхности пленки жидкости вблизи от входа в канал в дисперсно-кольцевом течении проводилось с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF). Данный метод позволяет проводить полевые измерения локальной толщины пленки жидкости с высоким пространственным (0,2 мм/пикс) и временным разрешением (частота съемки 10 КГц и выше). Рабочий участок представляет собой вертикальный цилиндрический канал, сделанный из оргстекла, с внутренним диаметром 15 мм. Жидкость подается на стенки рабочего участка через щелевой распределитель (рис. 1). Распределитель представлен кольцевым зазором, образованным между внутренней поверхностью оргстеклянной трубы и внешней поверхностью соосно установленной трубы для подачи воздуха, внутренний диаметр которой равен 13,4 мм. Затем жидкость в виде тонкой пленки стекает по внутренним стенкам канала, обдуваемая спутным потоком газа. Скорость газа (V_g) варьировалась в интервале от 15 до 57 м/с, а числа Рейнольдса жидкости ($Re_{ж}$) от 140 до 400. Число Рейнольдса жидкости $Re_{ж}$ было определено как $q/\pi dv$, где q – объемный расход жидкости, v – кинематическая вязкость жидкости.

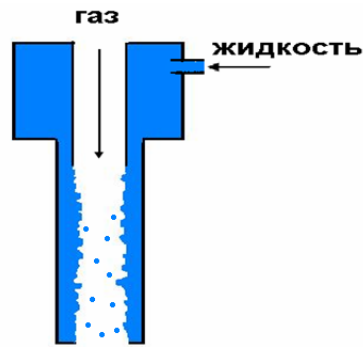


Рис.1. Схема подачи жидкости и газа в канал

В качестве флуоресцентного вещества использовался Родамин 6G в концентрации 15 мг/л. Рабочая область длиной 100 мм освещалась лазером с длиной волны 532 нм. Высокоскоростная камера с оранжевым фильтром фиксировала локальную яркость переизлученного света $J(x,t)$, на основе которой восстанавливалась локальная толщина пленки. Для этого применялась формула зависимости яркости от толщины пленки:

$$J(x) = C(x) \cdot [1 - e^{-\alpha h(x)}] \cdot [1 + K \cdot e^{-\alpha h(x)}] + D(x),$$

где α – коэффициент поглощения; K – коэффициент отражения света лазера от границы раздела жидкость/газ (принимался равным 2%); $D(x)$ – темновой ток, $C(x)$ – компенсирующая матрица. Последняя была построена, чтобы компенсировать неравномерность освещения рабочего участка лазерным ножом. В качестве опорного сигнала использовалась тонкая пленка жидкости, стекающая по стенкам канала под воздействием силы тяжести. Средняя яркость, фиксируемая каждым пикселем камеры, при таком течении, была соотнесена с толщиной пленки, определяемой по формуле Нуссельта. Более подробное описание процедуры калибровки и пересчета из поля яркости в поле толщин приведено в работе Alekseenko et al. (2012).

КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ

С помощью метода LIF были получены пространственно-временные записи толщины пленки жидкости. Последовательность мгновенных распределений толщины пленки жидкости, полученные в 500 точках вдоль одного продольного сечения канала длиной 100 мм с частотой съемки 10 кГц, образуют матрицу пространственно-временной эволюции толщины пленки жидкости $h(x,t)$ (рис. 2-4). Вертикальная координата соответствует времени; горизонтальная координата – продольной координате. Поток движется слева направо. На рис. 2 представлен фрагмент матрицы $h(x,t)$, полученный при относительно большом (500 – 620 мм) расстоянии от входа (Alekseenko et al. 2014). На таких расстояниях от входа волны возмущения уже полностью сформированы. Как видно из рисунка 2, две волны возмущения проходят через всю область измерения с постоянной скоростью (которая пропорциональна углу наклона между пространственно-временной траекторией волны и осью времени t). Скорости отдельных волн возмущения могут различаться.

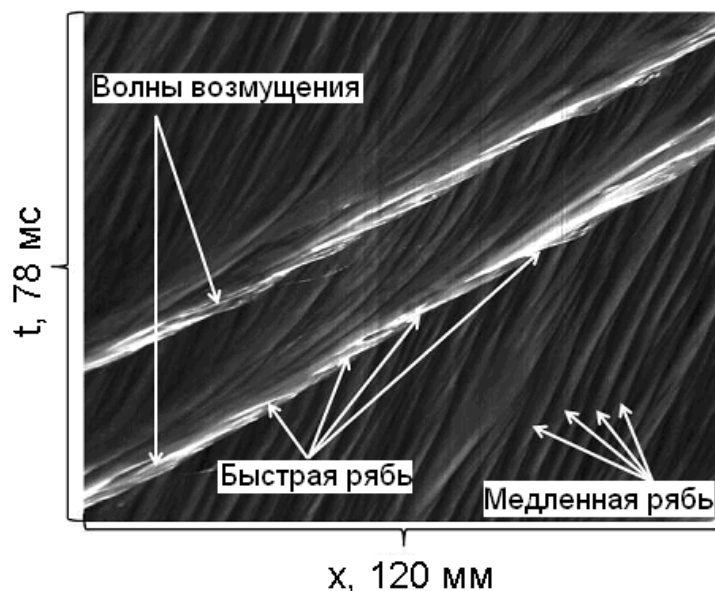


Рис.2. Фрагмент матрицы толщины пленки жидкости при большом расстоянии от входа (500 – 620 мм).
 $Re_{ж} = 142, V_g = 27 \text{ м/с}$

Волны возмущения разделены между собой тонким остаточным слоем пленки; такой слой часто называют «подложкой». Подложка покрыта волнами медленной ряби, которые появляются на задних склонах волн возмущения; сразу после появления они распространяются со скоростью близкой к скорости волны возмущения, но постепенно замедляются и в итоге их поглощают следующие волны возмущения.

Поверхность волн возмущения покрыта быстрой рябью, которая так же, как и медленная рябь, образуется на задних склонах волн возмущения. Быстрая рябь распространяется по поверхности волны возмущения быстрее самой волны возмущения и в конечном итоге пропадает. Предположительно, такие волны исчезают благодаря разрыву ряби на капли потоком газа. Наличие волн быстрой ряби является отличительной чертой волн возмущения.

На рис. 3 изображен фрагмент матрицы $h(x, t)$, полученной на расстояниях 3 – 103 мм от входа. Вблизи от входа пленка жидкости покрыта мелкомасштабными высокочастотными возмущениями. Эти начальные возмущения очень нерегулярны по амплитуде, скорости и времени разделения. Из-за этих различий происходит группирование и слияние этих волн вниз по потоку. В результате образуются новые волны с различными характеристиками и пространственно-временным поведением. Форма и поведение этих волн схожи с волнами возмущения, которые наблюдались вдали от входа (рис. 2). А именно, эти волны распространяются с высокой постоянной скоростью; они отделены друг от друга областью тонкого слоя пленки, покрытого медленной рябью; на гребнях этих новых волн присутствует волны быстрой ряби.

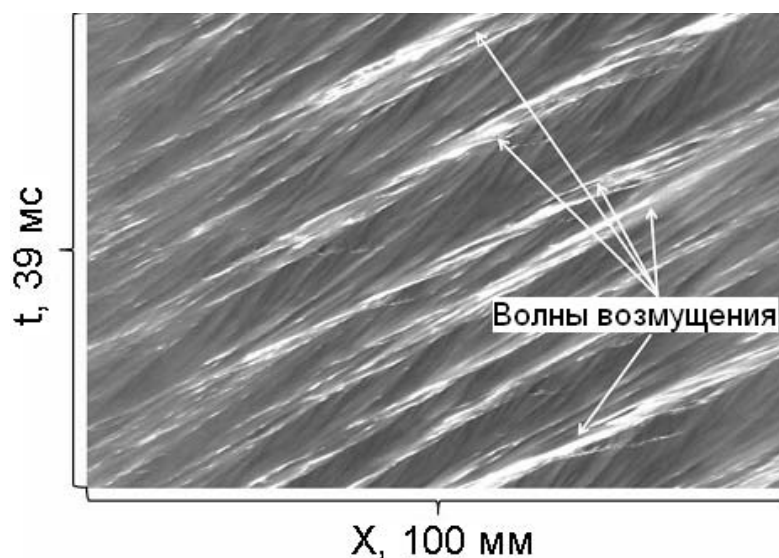


Рис.3. Фрагмент матрицы толщины пленки на расстояниях 3 – 103 мм от входа. $Re_{ж} = 400$, $V_g = 43$ м/с

Таким образом, при достаточно больших скоростях газа волны возмущения присутствуют в области измерений. Чтобы определить момент формирования волны возмущения необходимо иметь критерий, по которому можно сказать, относится ли новая волна к волне возмущения или нет. Авторы других работ используют количественные эмпирические критерии разделения, как правило, связанные с амплитудой волн. Chu & Dukler (1974) относят волну к волне возмущения, если ее профиль дважды пересекает уровень средней толщины пленки. Zhao et al. (2013) определяют волну как волну возмущения, если ее амплитуда в 1,6 раз превосходит среднюю толщину пленки.

Мы предлагаем использовать другой критерий, а именно, наличие волн быстрой ряби на гребне волны. Конечно, этот критерий применим только к данным, полученным с помощью методов с высоким пространственным и временным разрешением. Однако он имеет физическое обоснование и может быть легко применен к визуальному анализу пространственно-временных записей толщины пленки жидкости. Данный критерий позволяет сделать вывод, что при высоких расходах жидкости и газа формирование волн возмущения происходит, начиная с малых расстояний от входа.

При низких скоростях газа начальные возмущения характеризуются значительно меньшей частотой и разбросом скоростей. Как следствие, для слияния таких возмущений и формирования новых волн, покрытых быстрой рябью, требуется большее расстояние, чем при высоких скоростях газа. Если же начальное возмущение в течение некоторого времени не претерпевает слияний с другими волнами, оно может затухать, теряя скорость и амплитуду (рис. 4). В таких режимах формирование волн возмущения происходит медленнее; скорее всего, большая часть волн возмущения образуется вниз по потоку, за пределами области измерения.

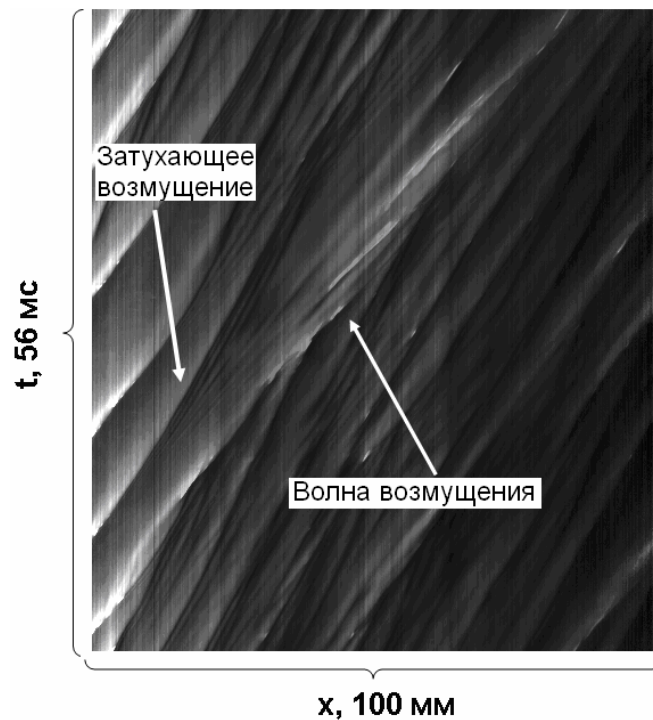


Рис.4. Фрагмент матрицы толщины пленки жидкости при расстоянии от входа 3 – 103 мм. $Re_{ж} = 220$, $V_g = 22$ м/с

Предположительно, координата начала образования волны возмущения зависит от начальных условий, таких как амплитуда, частота следования и разброс скорости начальных возмущений. В данной работе будет описан процесс формирования и развития волн возмущения. Для этого будет произведен количественный анализ данных, с помощью которого будет определена «область доминирования» волн возмущения, и будут определены основные характеристики волн в начале этой области.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Каждую пространственно-временную запись толщины пленки можно рассматривать как набор из 500 временных записей толщины пленки, полученных при различных расстояниях вниз по потоку. Эти записи обрабатываются с помощью кросскорреляционного и спектрального анализа данных, широко применяемых для изучения волновой структуры пленки в кольцевом течении.

С помощью кросскорреляционного метода исследовалось поведение средней скорости волн возмущения с увеличением расстояния от входа в канал. Для каждой координаты x_i была определена кросскорреляционная функция между двумя временными записями толщины пленки в точках $x_i + dx$ и $x_i - dx$, где величина dx равна 2 мм (10 пикселей). Эволюция кросскорреляционной скорости V_{corr} вниз по потоку для различных режимов течения представлена на рис. 5.

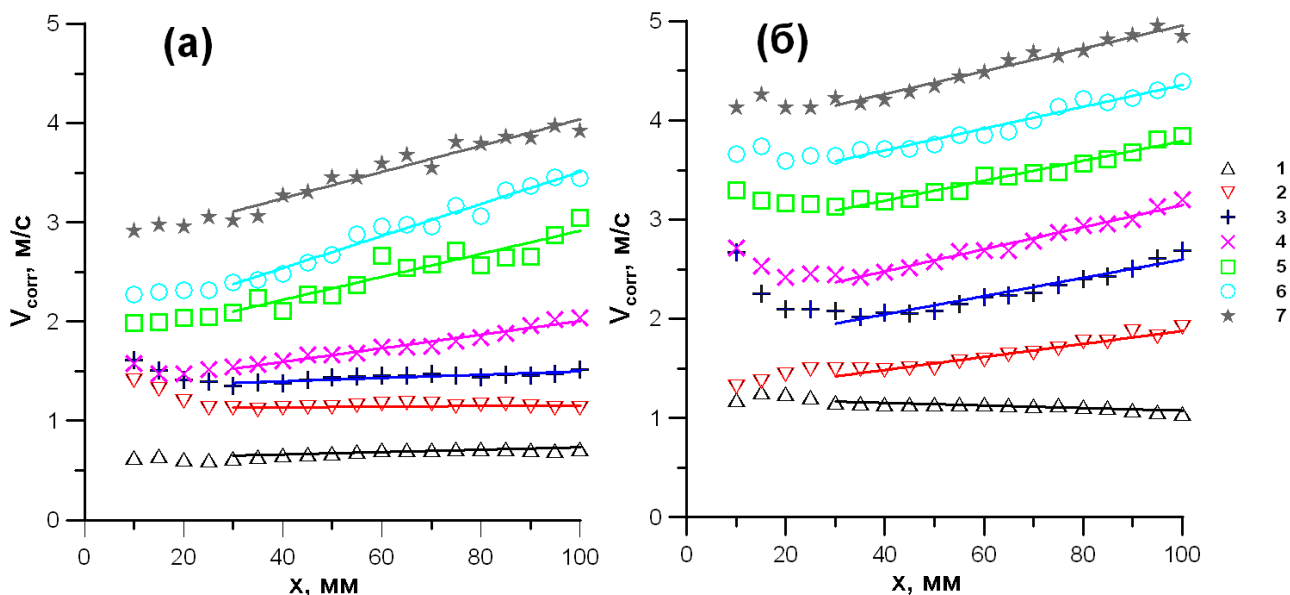


Рис. 5. Эволюция средней скорости волн возмущения вниз по потоку. $Re_{ж} = 140$ (а); 400 (б). Скорость газа изменяется в интервале от 15 (1) до 57 (7) м/с с шагом в 7 м/с

Видно, что при высоких скоростях и расходах газа кросскорреляционная скорость растет с расстоянием от входа. Рост наблюдается, начиная с небольших расстояний вниз по потоку; угол наклона зависимости возрастает с увеличением скорости газа. При низких скоростях газа (см. $V_g \leq 29$ м/с, $Re_{ж} = 140$ и $V_g \leq 15$ м/с, $Re_{ж} = 400$) роста скорости не наблюдается. Предположительно, начало роста скорости соответствует началу области, где волны возмущения начинают преобладать в общей волновой структуре. При низких скоростях газа волны возмущения редко наблюдаются в области измерений. Хотя скорость этих редких волн растет с расстоянием, ее вклад в кросскорреляционную функцию ниже, чем вклад многочисленных более медленных начальных возмущений. Рост кросскорреляционной скорости может быть связан с ускорением отдельных волн возмущения, а также быть результатом увеличения скорости волны, образовавшейся в результате слияния или формирования новых волн возмущения с более высокой скоростью.

Спектральный метод использовался для исследования изменения частотных характеристик сигнала вниз по потоку. Спектры насчитывались для точек, разделенных расстоянием в 2 мм. Для каждой такой точки x_i использовались записи из ее окрестности в диапазоне от $x_i - 5$ до $x_i + 5$. Каждая временная запись была разделена на 8 равных частей по 2500 точек каждая. Таким образом, для каждого значения x_i обрабатывались 88 записей толщины пленки длительностью 250 мс каждая. Применение быстрого преобразования Фурье для каждой записи дает спектральные амплитуды в диапазоне от 4 до 5000 Гц с шагом 4 Гц. Полученные 88 спектров были возведены в квадрат, чтобы получить спектр мощности сигнала, а затем усреднены. Спектральные амплитуды были нормированы на полную энергию спектра.

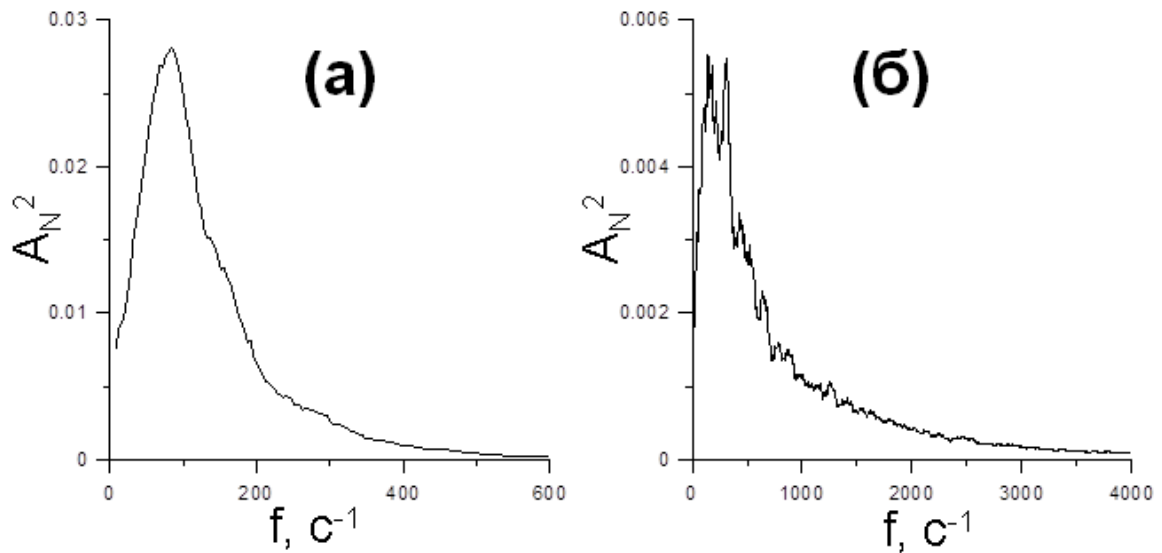


Рис. 6. Спектр мощности сигнала: а) $Re_{ж} = 220$, $V_g = 15$ м/с, $x = 50$ мм. б) $Re_{ж} = 300$, $V_g = 50$ м/с, $x = 30$ мм

Примеры нормированных спектров мощности показаны на рис. 6. Каждый спектр имеет широкий основной горб и длинный степенной «хвост». Увеличение скорости газа приводит к расширению спектра в область больших частот. Частота, соответствующая максимуму спектра мощности, f_{max} , по-разному ведет себя с расстоянием в зависимости от режимных параметров (рис. 7). При низких скоростях газа f_{max} постепенно уменьшается с расстоянием вниз по потоку, что, скорее всего, связано с перегруппировкой начальных возмущений из-за различий их по скорости. При больших скоростях газа наблюдались резкие скачки (изменения) в $f_{max}(x)$.

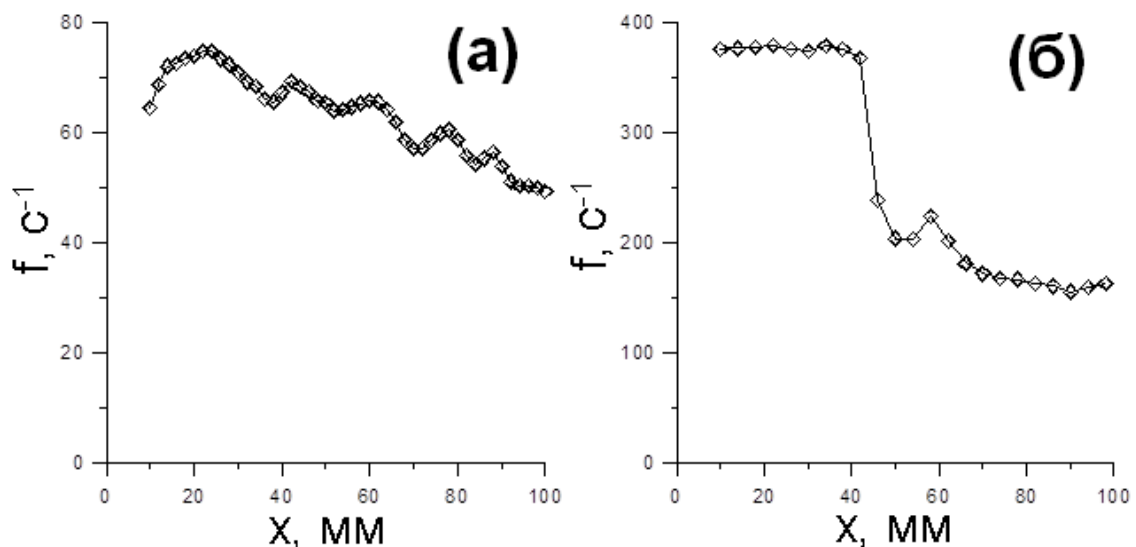


Рис.7. Эволюция частоты, соответствующей максимуму спектра мощности вниз по потоку а) $Re_{ж} = 140$, $V_g = 15$ м/с; б) $Re_{ж} = 400$, $V_g = 57$ м/с

Для объяснения различий в поведении частот была исследована форма спектров в непосредственной близости от f_{max} . Было обнаружено, что при низких скоростях газа спектры имеют один пик, который постепенно смещается в сторону более низких частот с увеличением расстояния от входа. При высоких скоростях газа пики 2 – 3, соответствующие волнам возмущения, хорошо различимы относительно высокочастотных пиков (1), генерируемых на входе (рис. 8). Частота пиков 2 – 3 в 1,5 – 3 раза меньше, чем у пика 1.

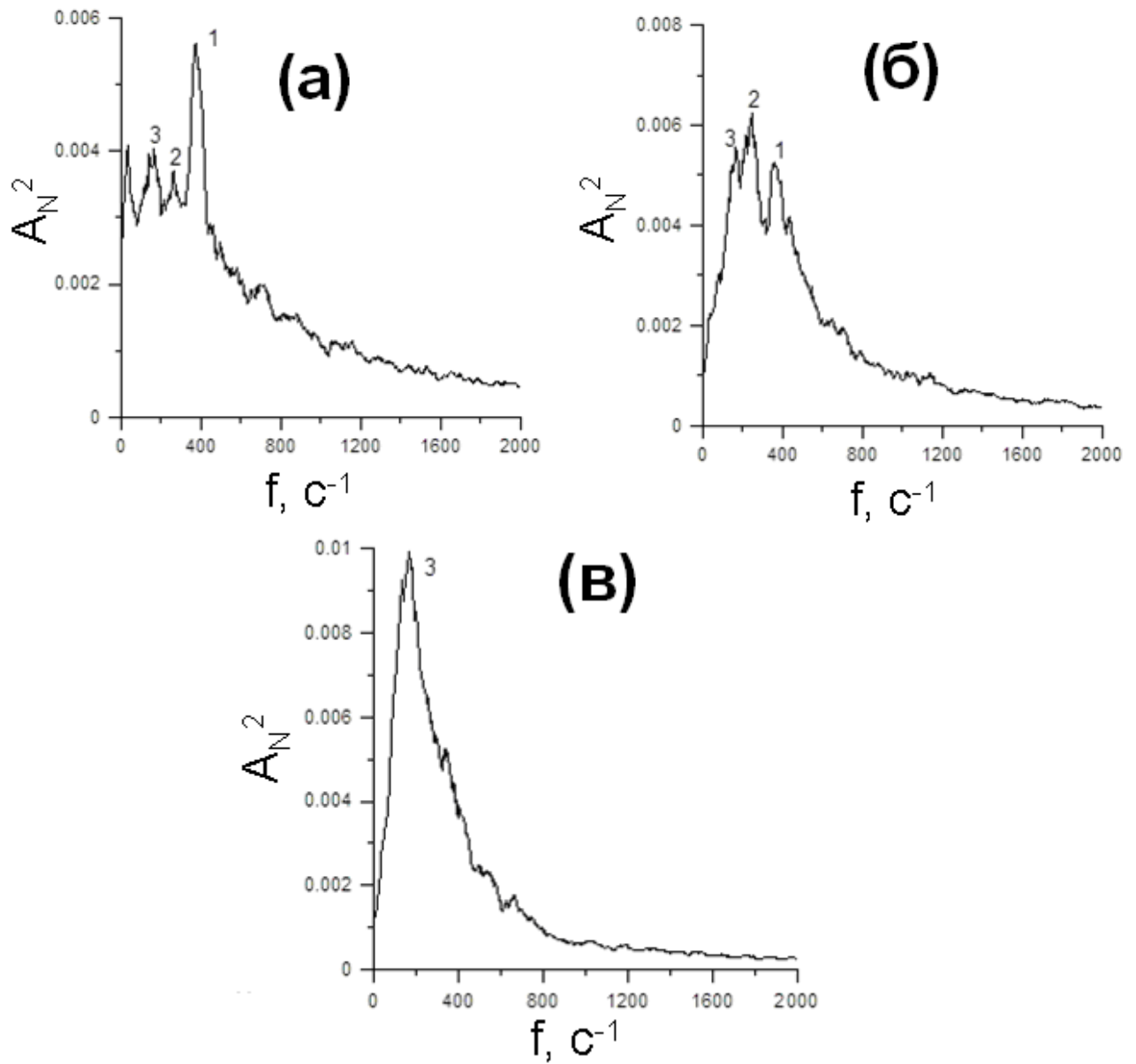


Рис. 8. Эволюция спектра мощности сигнала вниз по потоку. $Re_{ж} = 400$, $V_g = 57$ м/с.
а) $x = 10$ мм; б) $x = 44$ мм; в) $x = 100$ мм

С увеличением расстояния от входа происходит перенос энергии от высокочастотных пиков к низкочастотным. На некотором расстоянии от входа, амплитуда низкочастотного пика превышает амплитуду высокочастотного пика (рис. 8, б), что дает резкое изменение частоты максимума в спектре мощности (наблюдаемого на рис. 7, б). Ниже по потоку высокочастотные пики исчезают, оставляя спектр с одним пиком, который предположительно соответствует частоте волн возмущения (рис. 8, в). На рис. 9 показана эволюция частоты и амплитуды пиков 1 – 3 вниз по потоку (для тех же условий течения, как и на рис. 8).

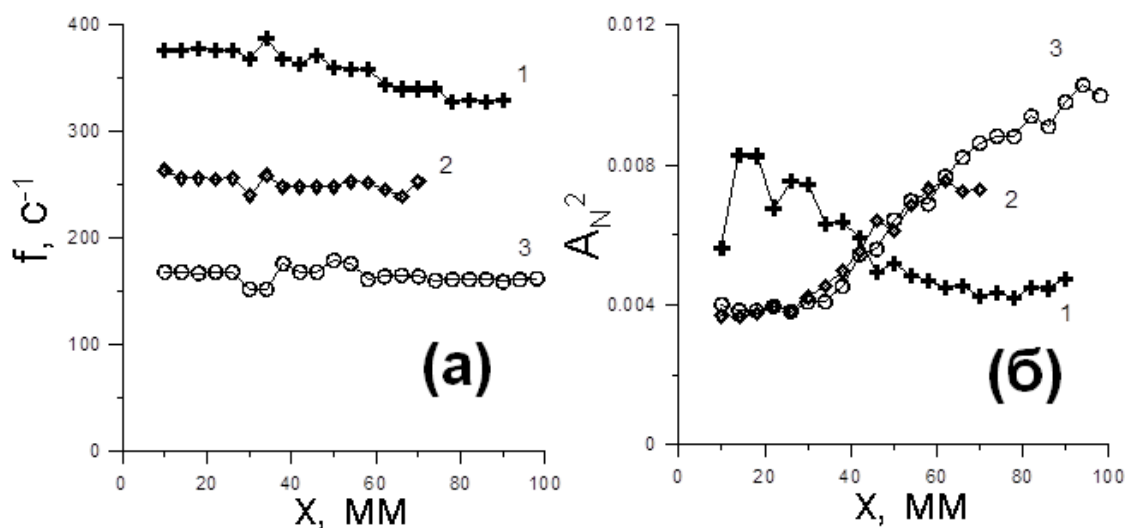


Рис. 9. Эволюция частоты (а) и амплитуды (б) каждого пика спектра вниз по потоку
 $Re_{ж} = 400$ и $V_g = 57$ м/с

Таким образом, происходит перекачка энергии от высоких частот к низким, что согласуется с нашими наблюдениями о механизме формирования волн возмущения благодаря слиянию начальных возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы формирование и развитие волн возмущения на поверхности пленки жидкости вблизи входа в канал. Эксперименты проводились в широком диапазоне параметров течения. Было выявлено, что при высоких расходах жидкости и газа волны возмущения доминируют в волновой структуре пленки жидкости уже на первых 10 сантиметрах от входа.

Волны возмущения формируются благодаря слиянию начальных высокочастотных возмущений различной скорости и амплитуды, генерируемых на входе. Поведение и структура волн возмущения (наличие волн быстрой и медленной ряби, генерируемых на заднем склоне) на малых расстояниях от входа, аналогичны свойствам волн возмущения, наблюдаемым на больших расстояниях вниз по потоку. Слияние начальных высокочастотных возмущений, возможно, способствует генерации и/или усилению вихревого движения внутри волны возмущения.

Было установлено, что средняя скорость волн, полученная методом кросскорреляционного анализа, растет вниз по потоку при условии, что волны возмущения доминируют в волновой структуре. Был обнаружен перенос энергии от высокочастотных возмущений к низкочастотным с увеличением расстояния от входа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alekseenko S.V., Antipin V.A., Cherdantsev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M.** Two-wave structure of liquid film and waves interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment// 2009. *Phys Fluids* 21:061701-061704.
2. **Alekseenko S.V., Cherdantsev A.V., Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M.** Application of a high-speed laser-induced fluorescence technique for studying the three-dimensional structure of annular gas-liquid flow// 2012. *Exp Fluids* 53: 77–89.
3. **Alekseenko S.V., Cherdantsev A.V., Heinz O.M., Kharlamov S.M., Markovich D.M.** Analysis of spatial and temporal evolution of disturbance waves and ripples in annular gas-liquid flow// 2014. *Int J Multiphase Flow* 67: 122-134
4. **Azzopardi B.J.** Mechanisms of entrainment in annular two-phase flow// 1983. UKAEA Report

AERE-R 11068.

5. **Chu K.J., Dukler A.E.** Statistical characteristics of thin, wavy films: Part II. Studies of the substrate and its wave structure// 1974. *AICHE J* 20(4): 695-706.
6. **Farias P.S.C., Martins F.J.W.A., Sampaio L.E.B., Serfaty R., Azevedo L.F.A.** Liquid film characterization in horizontal, annular, two-phase, gas-liquid flow using time-resolved laser-induced fluorescence// 2012. *Exp Fluids* 52:633-645.
7. **Hall Taylor N.S., Hewitt G.F., Lacey P.M.C.** The motion and frequency of large disturbance waves in annular two-phase flow of air-water mixtures// 1963. *Chem Engng Science* 18: 537-552
8. **Hall Taylor N.S., Nedderman R.M.** The coalescence of disturbance waves in annular two-phase flow// 1968. *Chem Engng Sci* 23:551-564.
9. **Hewitt G.F., Jayanti S., Hope C.B.** Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow// 1990. *Int J Multiphase Flow* 16(6): 951-957.
10. **Pham S.H., Kawara Z., Yokomine T., Kunugi T.** Detailed observations of wavy interface behaviors of annular two-phase flow on rod bundle geometry// 2014. *Int J Multiphase Flow* 59: 135-144.
11. **Schubring D., Shedd T.A., Hurlburt E.T.** Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part II: Analysis and comparison to models// 2010. *Int J Multiphase Flow* 36: 825-835.
12. **Woodmansee D.E., Hanratty T.J.** Mechanism for the removal of droplets from a liquid surface by a parallel air flow// 1969. *Chem Engng Science* 24: 299-307.
13. **Zadrazil I., Matar O.K., Markides C.N.** An Experimental Characterization of Downwards Gas-Liquid Annular Flow by Laser-Induced Fluorescence: Flow Regimes and Film Statistics// 2014. *Int J Multiphase Flow* 60: 87-102.
14. **Zhao Y., Markides C.N., Matar O.K., Hewitt G.F.** Disturbance wave development in two-phase gas-liquid upwards vertical annular flow// 2013. *Int J Multiphase Flow* 55: 111-129.

A.V. Cherdantsev ^{1,2}, S.V. Isayenkov ^{1,2}, M.V. Cherdantsev ^{1,2}, D.M. Markovich ^{1,2}

¹*Institute of Thermophysics Siberian Branch of RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1, E-mail: : sergei.isaenkov@gmail.com*

²*Novosibirsk State University, Russia,
630090, Novosibirsk, Lyapunova st., 1, E-mail: azkvon@gmail.com*

FORMATION OF PERTURBATION WAVES AT THE INITIAL SECTOR OF DISPERSIVE-CIRCULAR STREAM

Wave structure of film of liquid in a circular gas-liquid stream was studied with help of Laser Inducted Fluorescence (LIF) method in a channel with inner diameter 15 mm. With aim to explore the process of formation of perturbation waves experiments at small distance from the entrance to the channel were conducted, the length of the working sector was 100 mm. It is ascertained that at high speed of gas and consumption of liquid perturbation waves are present in the measurement region, and also become dominant wave structures on the surface of film of liquid. It is shown that formation of perturbation waves happens thanks to confluence of small-scale high frequency waves that appear at the entrance. Quantitative exploration of formation of waves was being conducted with help of spectral method. Transfer of energy to the side of low frequencies was found. Significant growth of waves' speed was found.

**LASER INDUCED FLUORESCENCE, DISPERSIVE-CIRCULAR STREM, FORMATION OF
PERTURBATION WAVES**