

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦНГУ

1. Аннотация

Работа посвящена численному исследованию адиабатного двухфазного течения в плоских миниканалах для описания механизма дестабилизации стратифицированного (расслоенного) режима течения в, частности, для описания механизма увлечения капель в плоском миниканале. Актуальность работы связана с использованием течения пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в миниканале для охлаждения теплонагруженных элементов, тепловые потоки на которых превышают 1 кВт/см^2 . Ограничивающим фактором при использовании данной системы является появление гидродинамических неустойчивостей, вызывающих переход от расслоенного режима течения к кольцевому. В случае кольцевого режима течения часть жидкости движется по верхней стенке канала и не чувствует в процессе теплоотвода от нагревателя. Таким образом, происходит увеличение перепада давления, появляется необходимость в увеличении расхода по жидкости. Кроме того, доля испарившейся жидкости при прохождении через нагреватель значительно уменьшается, что снижает эффективность данного метода охлаждения. Моделирование течения тонкой пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в миниканале было проведено в двумерной постановке методом конечных объемов с использованием программного обеспечения Ansys fluent. Свободная граница моделировалась методом объема жидкости. В расчетах варьировалась скорость газа. Получено, что с увеличением скорости газа средняя толщина пленки уменьшается, кроме того, толщина пленки оказалась неравномерной вблизи смесителя. Получено, что частота возмущений в жидкости возрастает с увеличением скорости газа, что интенсифицирует процесс уноса капель. С помощью численного моделирования был впервые описан механизм уноса капель в миниканале, который связан с опрокидыванием одиночных возмущений, а также с опрокидыванием в результате наложения возмущений. Стоит отметить, что опрокидывание возмущений при их наложении наблюдается чаще, чем опрокидывание одиночной волны. При опрокидывании происходит отрыв капель и их попадание на верхнюю стенку, кроме того на верхней стенке наблюдается коалесценция.

2. Тема работы

Численное моделирование пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в миниканале.

3. Состав коллектива

Роншин Федор Валерьевич, к.ф.-м.н.,
старший преподаватель НГУ,
старший научный сотрудник ИТ СО РАН
e-mail: f.ronshin@g.nsu.ru

4. Научное содержание работы

4.1. Современное состояние проблемы

Отвод высоких и сверхвысоких тепловых потоков с элементов малой площади является сложнейшей и одной из наиболее востребованных задач в теплофизике. К перспективному методу существенной интенсификации теплообмена относится течение пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в миниканале. При данном стратифицированном (расслоенном) режиме течения по нижней стенке канала движется тонкая пленка жидкости, которая подается в канал через смеситель-плоскую щель на нижней стенке канала, в то время как

газ с высокой скоростью движется над жидкостью, создавая тангенциальное напряжение на межфазной границе, что способствует утонению жидкой пленки. Важно отметить, что реализация расслоенного режима течения ограничена некоторым диапазоном характерных скоростей газа и жидкости, что в свою очередь гидродинамически ограничивает возможности интенсификации теплообмена. Одной из причин дестабилизации течения тонкой пленки жидкости является переход к кольцевому режиму течения, в случае которого часть жидкости движется по верхней стенке канала и не участвует в процессе отвода тепла от нагревателя.

Механизм перехода от расслоенного режима течения к кольцевому детально исследовался для крупномасштабных каналов с гидравлическим диаметром более 1 см. В работе [1] показано, что переход к кольцевому режиму течения может происходить за счёт вытеснения жидкости по диаметру трубы при увеличении расхода по газу [2]. В работе [3] было подтверждено экспериментально, что ключевым механизмом подъема жидкости по стенкам горизонтальной трубы является сдвиговое воздействие вторичных вихревых течений в газовой фазе, а волновые процессы играют вторичную роль. В работе [4] предложена механистическая модель перехода от расслоенного к кольцевому режиму течения в трубе, основанную на анализе неустойчивости Кельвина – Гельмгольца для уединённой волны. Ещё одним механизмом, который играет роль в создании/поддержании кольцевого потока, является отрыв капель. В работах [5,6,7] исследован кольцевой режим в вертикальных и горизонтальных крупномасштабных каналах. Показано, что поток газа вызывает турбулентные пульсации на волнах возмущений, которые в свою очередь продуцируют волны медленной и быстрой ряби. Срыв капель происходит именно с волн быстрой ряби на волне возмущения. Также в литературе есть несколько работ, посвященных переходу к кольцевому режиму течения в мини- и микроканалах. В прямоугольном миниканале высотой 500 мкм [8] было получено, что при увеличении скорости жидкости происходит переход к кольцевому режиму течения по боковым стенкам канала. Причиной такого перехода являлось увеличение частоты боковых пульсаций, которые вызывали образование пленки жидкости на верхней стенке канала. Также в области боковых стенок был зарегистрирован отрыв капель, причем их количество увеличивалось с увеличением скорости жидкости. В работе [8] также указано, что ширина прямоугольного миниканала практически не оказывает влияния на границу между расслоенным и кольцевым режимами течения. Ещё один тип неустойчивости, приводящий к формированию кольцевого режима течения был обнаружен в [8] для прямоугольного микроканала высотой 100 мкм, при которой заброс жидкости на верхнюю стенку происходит вблизи смесителя. Это так называемая фронтальная неустойчивость. В работе [9] исследовалась гидродинамика двухфазного потока для микроканалов с различной шириной (высота 50 мкм, ширина 10 - 40 мм). Показано, что ширина канала влияет на границу между расслоенным и кольцевым режимами течения. Таким образом, вопрос о влиянии ширины на границу между кольцевым и расслоенным режимами течения в мини- и микроканалах остается открытым. В лаборатории 6.6 ИТ СО РАН также был зарегистрирован механизм перехода к кольцевому режиму в миниканале, вызванный отрывом капель от межфазной границы. Кроме того, отрыв капель, приводящий к кольцевому режиму течения, происходил не только вблизи боковых стенок, как это показано в работе [9], а по всей ширине миниканала.

Список литературы:

[1] Yemada Taitel and A. E. Dukler. A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal and Near - Horizontal Gas-liquid Flow, *AIChE Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55, 1976.

[2] Flores A., Crowe K., and Griffith P., Gas-phase secondary flow in horizontal, stratified and annular two-phase flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 21, pp. 207–221, 1995.

- [3] Cherdantsev A.V., Zornikov S.A., Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Markovich D.M., Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 132, 110052, 2022
- [4] Taitel, Y., and Dukler, A. E. 1975 A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. ASME 75-WA/HT-29.
- [5] Sergey Alekseenko, Vladimir Antipin, Andrey Cherdantsev, Sergey Kharlamov, and Dmitry Markovich. Two-wave structure of liquid film and wave interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment // *Phys. Fluids*. vol.21, 061701, 2009.
- [6] Andrey V. Cherdantsev, David B. Hann, Barry J. Azzopardi. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment // *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 67, pp. 52-64, 2014.
- [7] Wenyuan Fan, Andrey V. Cherdantsev, Henryk Anglart. Experimental and numerical study of formation and development of disturbance waves in annular gas-liquid flow // *Energy*, vol. 207, 118309, 2020.
- [8] Chinnov E. A., Ronshin F. V., and Kabov O. A., Two-phase flow patterns in short horizontal rectangular microchannels, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 80, pp. 57-68, 2016.
- [9] F. V. Ronshin, Yu. A. Dementyev E. A., Chinnov. Experimental study of two-phase flow regimes in slit microchannels // *Microfluidics and Nanofluidics*, 27:24, 2023.

4.2 Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Было произведено численное моделирование стратифицированного режима течения в двумерной постановке при числах Рейнольдса газа, соответствующим турбулентному режиму и переходному числу Рейнольдса жидкости ($Re_{liq} = 300$).

Численное моделирование производилось методом конечных объемов с использованием программного обеспечения Ansys fleunt версии 2020 R2. Межфазная граница моделировалась методом объема жидкости. Межфазная граница газ-жидкость в методе VOF (метод объема жидкости) [1] отслеживается на основе распределения объемной доли газа α_{gas} в вычислительной ячейке, где $\alpha_{gas} = 0$ - жидкая фаза и $\alpha_{gas} = 1$ - газовая фаза. Следовательно, граница раздела газ-жидкость существует в ячейке, где α_{gas} лежит между 0 и 1. Для определения поле скорости во всей области решалось уравнение баланса импульса, которое является общим для всех фаз:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla(\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (1)$$

где скорость \vec{v} рассматривается как усредненная по массе переменная:

$$\vec{v} = \frac{\alpha_{liq} \rho_{liq} \vec{v}_{liq} + \alpha_{gas} \rho_{gas} \vec{v}_{gas}}{\rho}. \quad (2)$$

Сумма объемных долей равна единице:

$$\alpha_{liq} + \alpha_{gas} = 1, \quad (3)$$

плотность и вязкость определяются следующими соотношениями:

$$\rho = \rho_{liq} \alpha_{liq} + \rho_{gas} (1 - \alpha_{liq}), \quad (4)$$

$$\mu = \mu_{liq}\alpha_{liq} + \mu_{gas}(1 - \alpha_{liq}), \quad (5)$$

где ρ_{liq}, μ_{liq} – плотность и динамическая вязкость жидкости, ρ_{gas}, μ_{gas} – плотность и динамическая вязкость газа соответственно.

С использованием вышеупомянутых переменных уравнение неразрывности имеет стандартный вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{v}) = 0. \quad (6)$$

В правой части уравнения (1) сила \vec{F} - сила поверхностного натяжения, которая моделировалась методом непрерывной поверхностной силы [2]:

$$\vec{F} = \sigma k \nabla \alpha_{liq}, \quad (7)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения, k - локальная кривизна, которая определяется следующим образом:

$$k = \nabla \left(\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right), \quad (8)$$

вектор нормали \vec{n} равен градиенту объемной доли жидкой фазы:

$$\vec{n} = \nabla \alpha_{liq}. \quad (9)$$

Для определения контактного угла использовалась модель, предложенная в работе [2], в которой граничное условие не накладывалось на саму стенку, а контактный угол включается в модель путем регулирования кривизны поверхности вблизи стенки через пересчет нормали:

$$\vec{n} = \vec{n}_w \cos \theta_w + \vec{t}_w \sin \theta_w, \quad (10)$$

где \vec{n}_w и \vec{t}_w – нормальный и тангенциальный векторы к стенке, θ_w – равновесный краевой угол смачивания. Таким образом, комбинация контактного угла с обычно рассчитываемой нормалью к поверхности на расстоянии одной ячейки от стенки определяет локальную кривизну поверхности, и эта кривизна используется для корректировки члена силы \vec{F} в расчете.

Межфазная граница определялась путем решения уравнения неразрывности для объемной доли жидкости:

$$\frac{\partial \rho_{liq} \alpha_{liq}}{\partial t} + div(\rho_{liq} \alpha_{liq} \vec{v}) = 0. \quad (11)$$

SIMPLE алгоритм (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) использовался для связи поля скорости и давления. Для решения уравнения неразрывности использовалась схема PRESTO! (PREssure STaggering Option). Для определения градиентов использовался алгоритм Least Squares Cell Based. Дискретизация конвективных членов производилась с помощью противопоточной схемы второго порядка точности. Диффузионный член аппроксимировался центральной разностной схемой. Кусочно-линейная схема дискретизации Geo-reconstruction использовалась для аппроксимации границы раздела. Дискретизация по времени производилась явной схемой первого порядка точности. Адаптивный шаг по времени использовался в расчетах. Шаг определялся из условия непревышения глобального числа Куранта значения 0,25.

Расчетная область представлена на рис. 1: угол подвода жидкости в расчетах составлял 90 градусов; длина канала от области смешения составляла 50 мм, высота канала составляла 1 мм, ширина подводного канала жидкости составляла 0,3 мм.

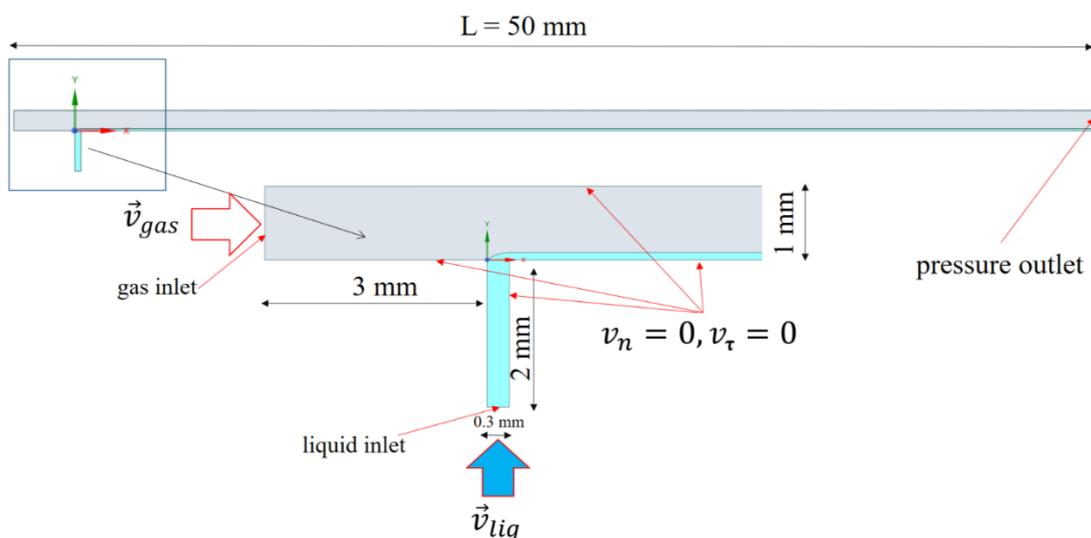


Рис.1. Расчетная область для исследования гидродинамики двухфазного течения.

Были поставлены следующие граничные условия: на границе вход жидкости задана скорость 1 м/с, объемная доля жидкости на этой границе равна 1. На границе вход газа задавались скорости 25 м/с, 35 м/с, 50 м/с, объемная доля газа равна 1. На верхней и нижней стенках заданы условия прилипания и непротекания. Кроме того, задавался равновесный краевой угол смачивания 60° на верхней стенке и 0° на нижних стенках. В качестве начального условия задавалась пленка жидкости толщиной 150 мкм.

Задача решалась в несколько этапов. На первом этапе рассчитывалось установление двухфазного течения на сетке, в которой количество ячеек на толщину пленки составляло порядка 10 (рис.2 А). Течение считалось установившимся, когда средняя толщина пленки жидкости выходила на стационар. Далее, вблизи межфазной границы постепенно создавались адаптивные ячейки меньшего размера для того, чтобы более точно разрешить поверхностное натяжение, и, таким образом, разрешить мелкомасштабные возмущения вблизи межфазной границы. Постепенно в данном случае означает, что расчет производился на сетке с добавленным адаптированным слоем ячеек пока средняя толщина пленки жидкости не выходила на стационар, затем добавлялся новый адаптивный слой ячеек, который по размеру в два раза меньше предыдущего. На последней итерации размер расчетной ячейки вблизи межфазной границы составлял 3 мкм (рис. 2 Б).

Время одного расчета при указанном выше подходе с плавным ступенчатым сужением сетки вблизи межфазной границы могло достигать 20 дней на кластере ИВЦ НГУ.

Список литературы

- [1] Hirt C. W. and Nichols B. D., Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, vol. **39**, pp. 201-225, 1981.
- [2] Brackbill J. U., Kothe D. B., and Zemach C., A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *J. Comput. Phys.*, vol. **100**, pp. 335-354, 1992.

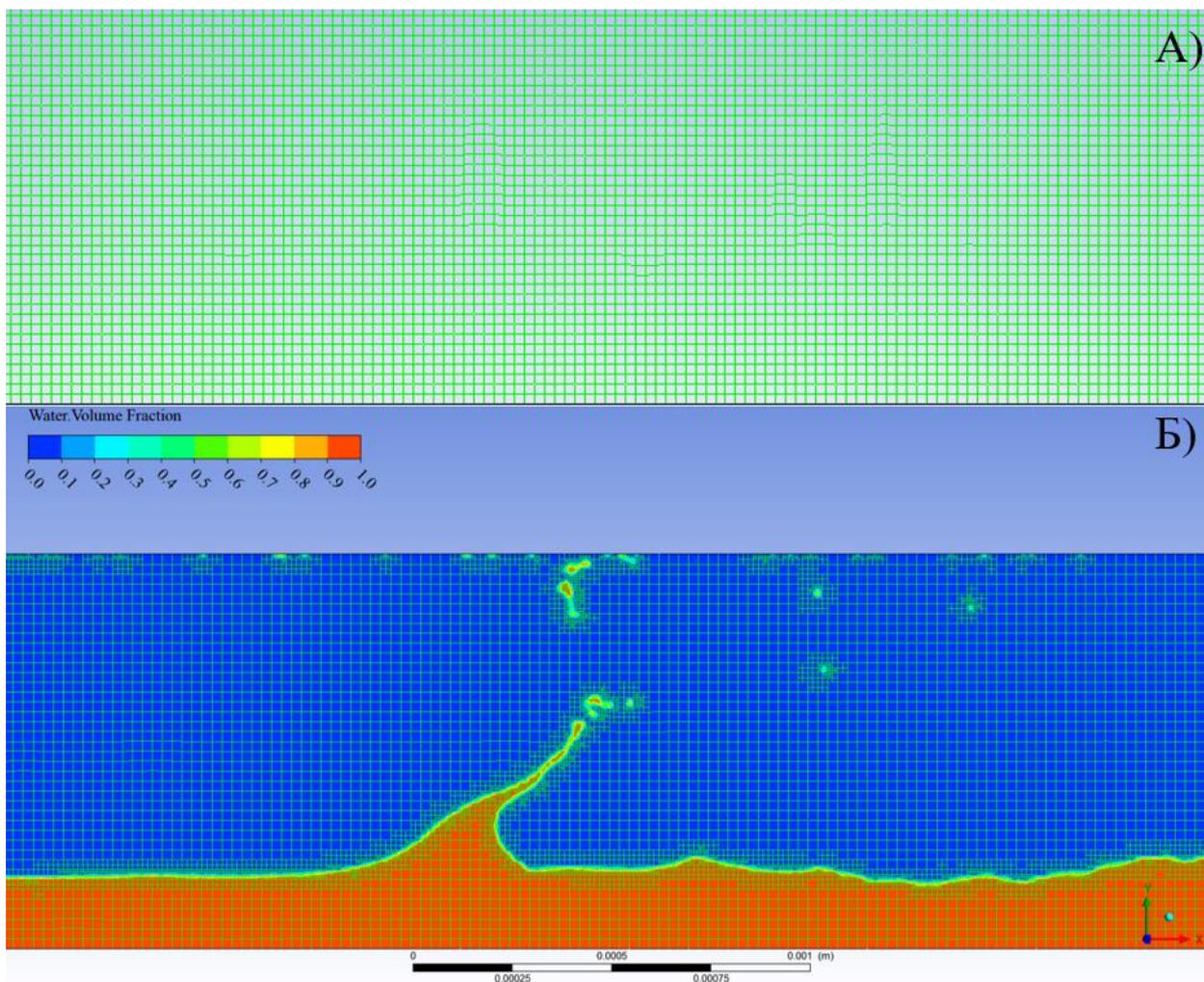


Рис.2. А) Расчетная сетка на первой итерации. Б) Пример адаптивной расчетной сетки вблизи межфазной границы, а также восстановленного решения, красная область соответствует жидкости, синяя – газ, (размер ячейки вблизи межфазной границы 3 мкм).

4.3 Полученные результаты

На рис.3 представлена динамика распространения возмущений в жидкости А) вблизи смесителя, Б) на выходе из канала. Скорости газа и жидкости на входе составляли 25 м/с и 1 м/с соответственно. Наблюдается образование возмущений, которые распространяются по каналу. Возмущения в жидкости могут накладываться, что приводит к опрокидыванию результирующей волны. Для данных скоростей подвода ($v_{gas} = 25$ м/с, $v_{liq} = 1$ м/с) капли практически не отрываются при опрокидывании возмущений. С увеличением скорости подвода газа до 35 и 50 м/с также наблюдается опрокидывание возмущений, но в этом случае происходит отрыв капель (рис.4, рис. 5). Кроме того, на верхней стенке наблюдается коалесценция сорвавшихся капель (рис. 6), что может приводить к образованию пленки на верхней стенке канала и к кольцевому режиму течения соответственно. Процесс опрокидывания результирующей волны при наложении волн представлен на рис.7. (скорость газа 35 м/с, жидкости 1 м/с). На рис. 8 представлена усредненная по времени локальная толщина пленки жидкости на различном расстоянии от смесителя для различных скоростей подачи газа. С увеличением скорости газа средняя толщина пленки жидкости уменьшается. Кроме того, профиль пленки жидкости не является равномерным по длине канала. Локальная толщина пленки жидкости в зависимости от времени представлена на рис. 9. Обнаружено, что с увеличением скорости газа частота образования возмущений увеличивается.

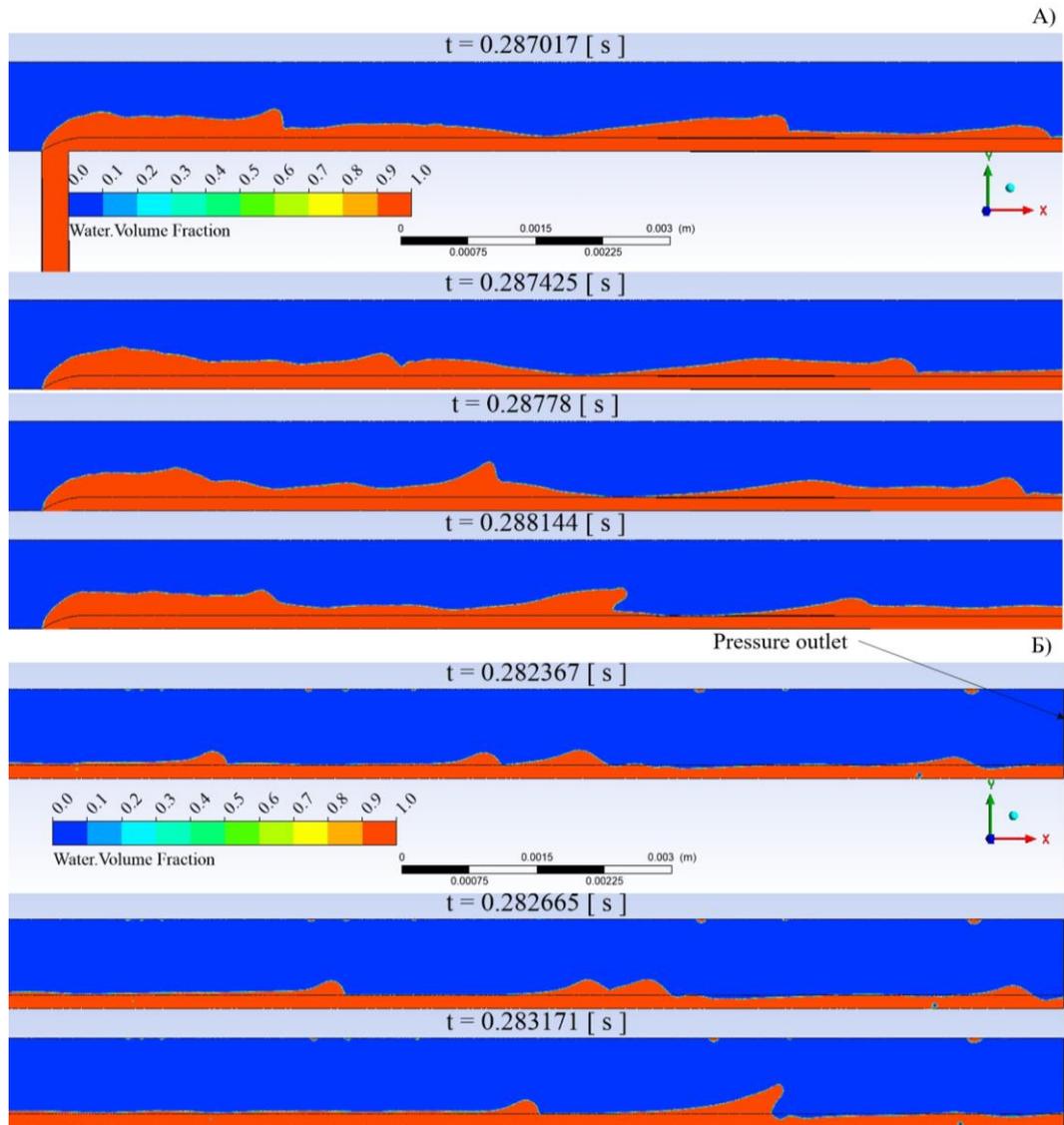
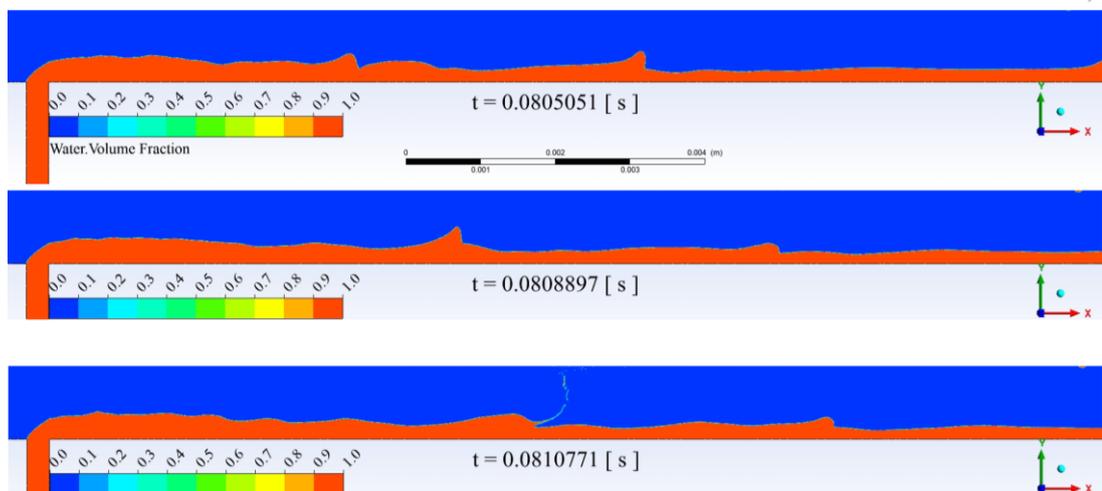


Рис. 3. Динамика распространения возмущений в жидкости А) вблизи смесителя, Б) на выходе из канала. Красный цвет – объемная доля жидкости 1, синий – объемная доля газа 1, скорость газа на входе $v_{gas} = 25$ м/с, скорость жидкости на входе $v_{liq} = 1$ м/с.



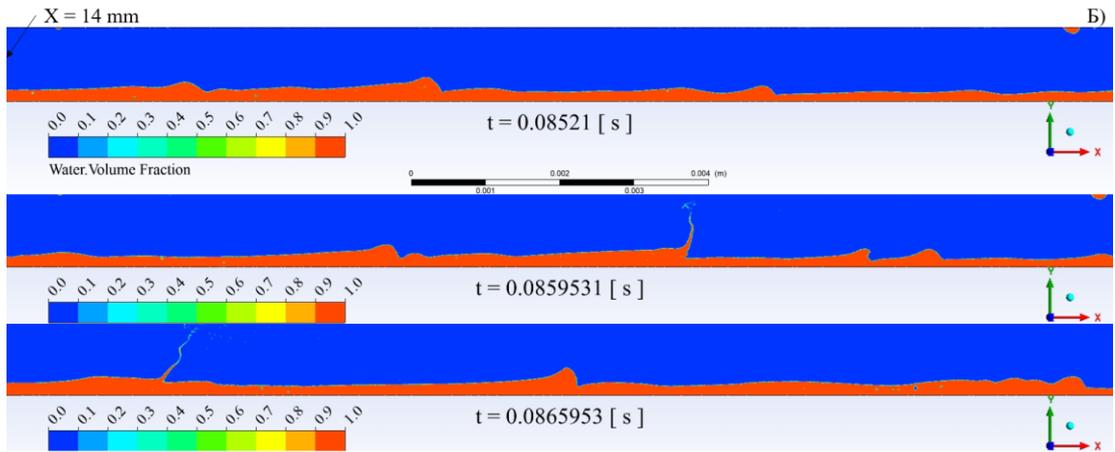


Рис.4. Динамика возмущений в жидкости А) вблизи смесителя, Б) На расстоянии $X = 14$ мм от смесителя. Красный цвет – объемная доля жидкости 1, синий – объемная доля газа 1, скорость газа на входе $v_{gas} = 35$ м/с, скорость жидкости на входе $v_{liq} = 1$ м/с.

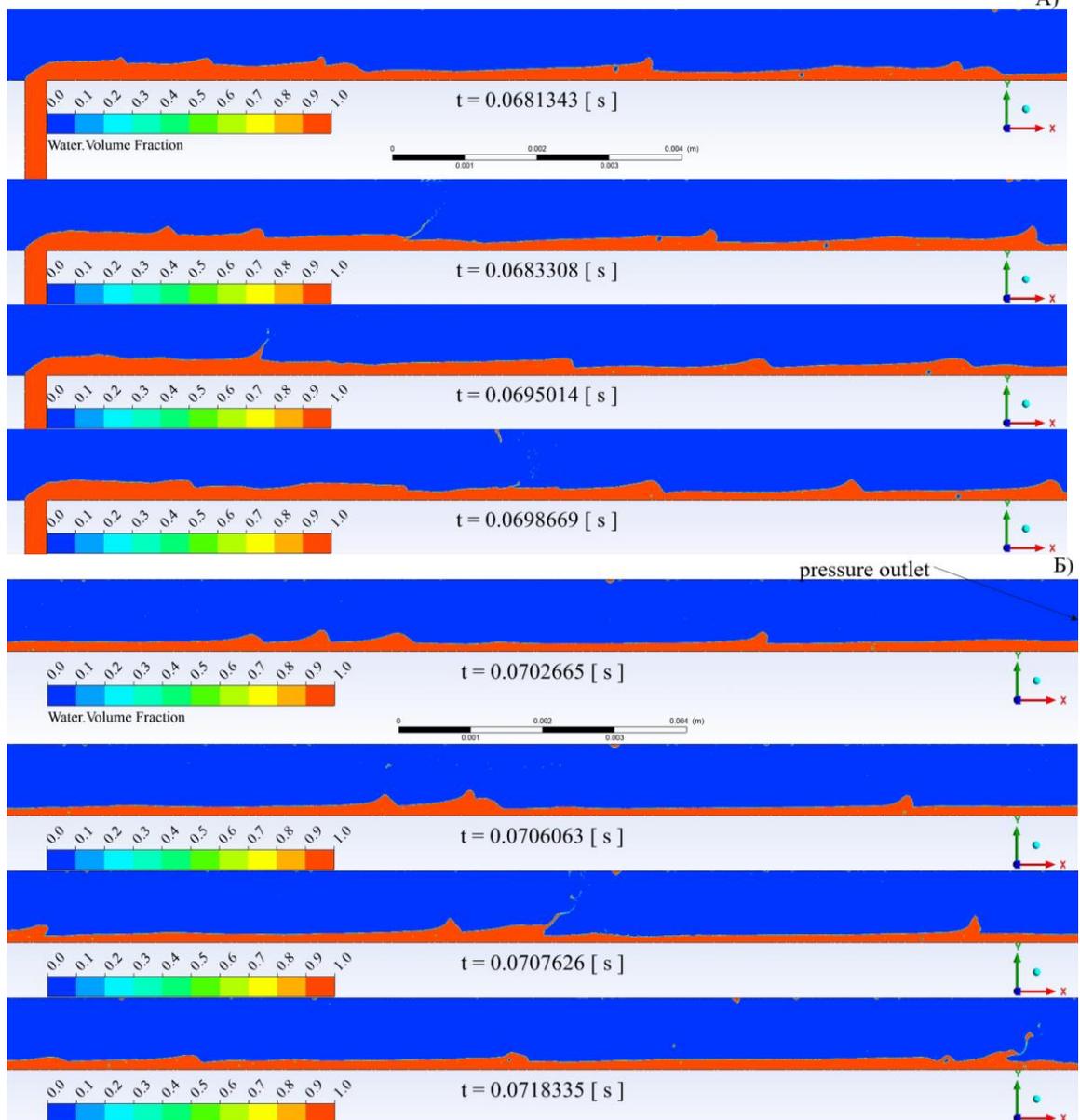


Рис. 5. Динамика возмущений в жидкости А) вблизи смесителя, Б) На выходе из канала. Красный цвет – объемная доля жидкости 1, синий – объемная доля газа 1, скорость газа на входе $v_{gas} = 50$ м/с, скорость жидкости на входе $v_{liq} = 1$ м/с.

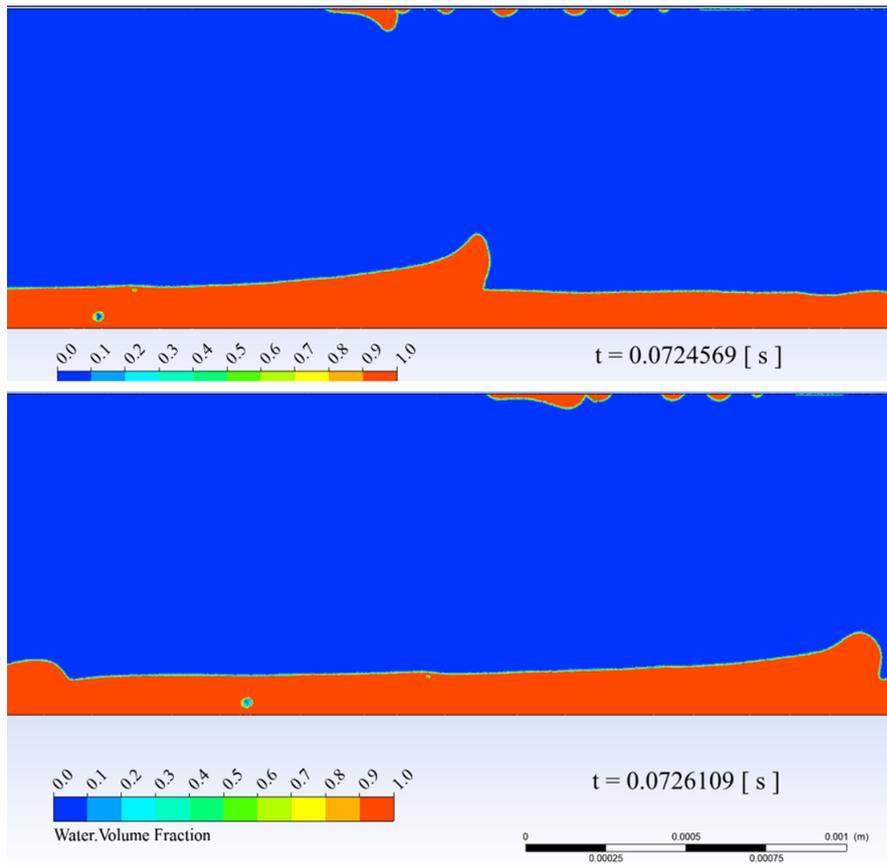


Рис. 6. Коалесценция капель на верхней стенке канала.

6

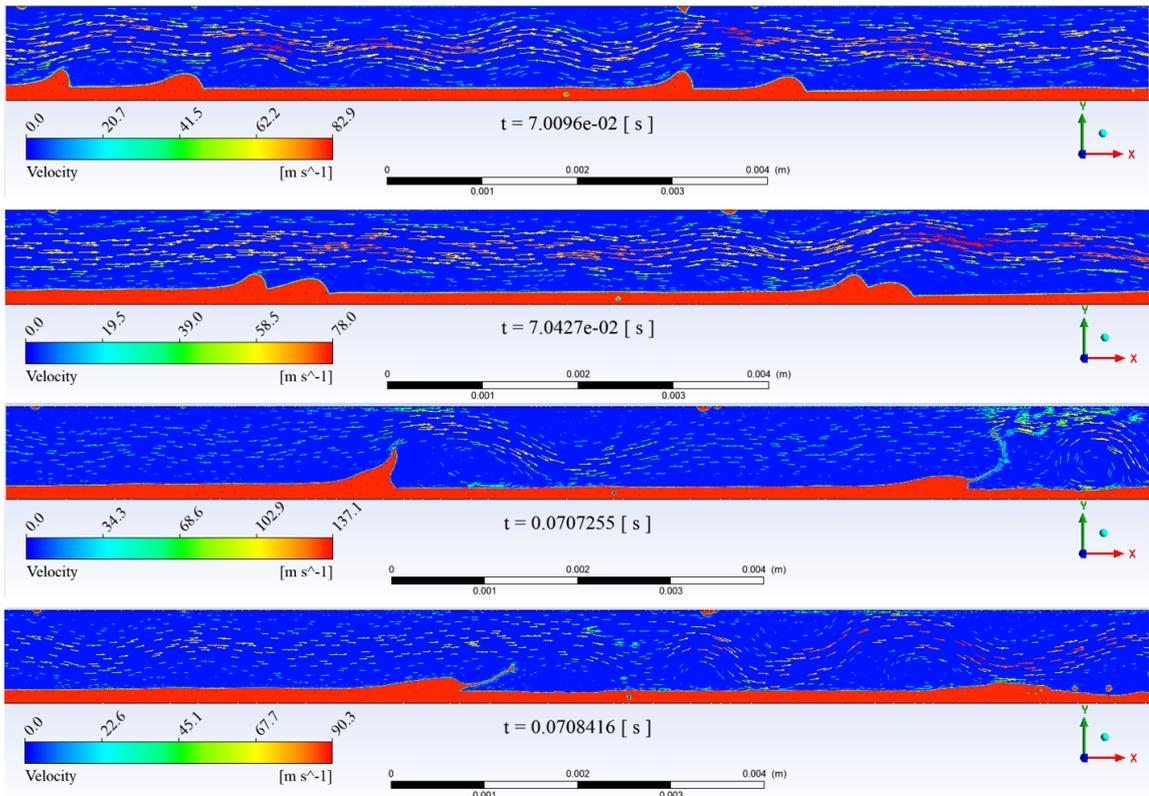


Рис. 7. Поле скоростей, а также распределение объемной доли (красный цвет – жидкость, синий-газ), вдали от смесителя. Скорости подачи газа и жидкости $\vec{v}_{gas} = 35 \text{ м/с}$, $\vec{v}_{liq} = 1 \text{ м/с}$.

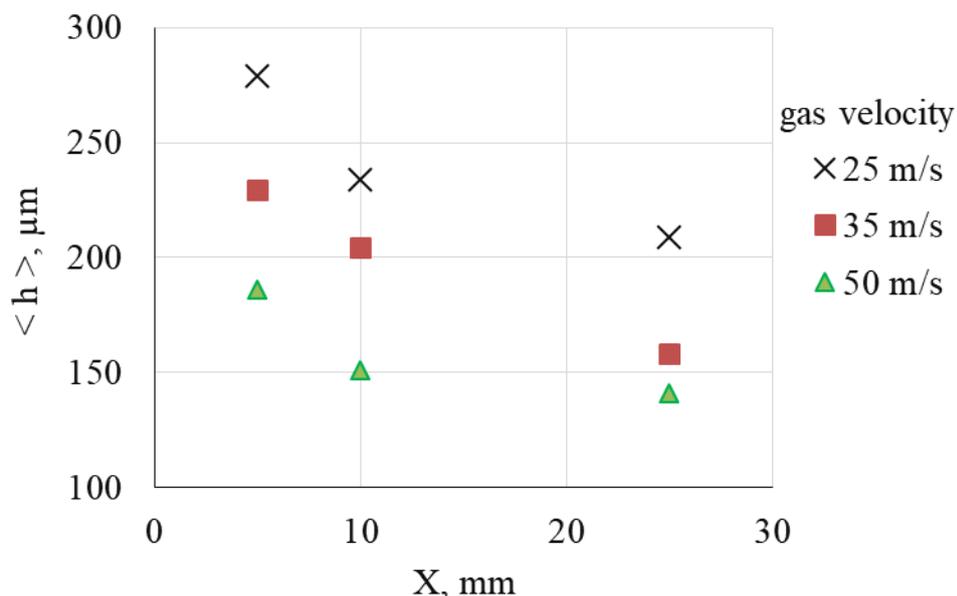


Рис. 8. Средняя локальная толщина пленки жидкости на различном расстоянии от смесителя X для различных скоростей газа на входе.

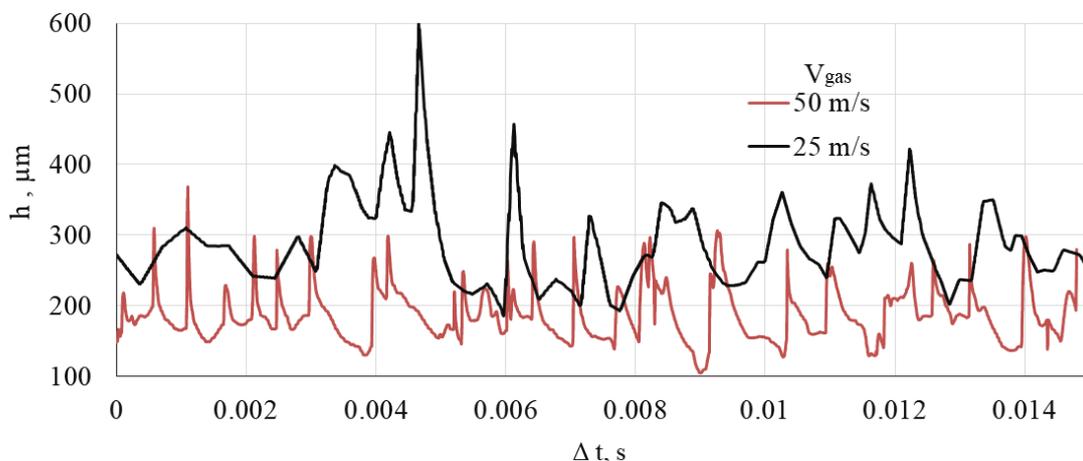


Рис. 9. Локальная толщина пленки жидкости в зависимости от времени на расстоянии от смесителя $X = 5 \text{ мм}$. Красная линия соответствует скорости подачи газа 50 м/с , черная линия – 25 м/с .

Таким образом, в миканалах был впервые обнаружен механизм перехода от расслоенного режима течения к кольцевому, который связан с опрокидыванием одиночных возмущений, а также с опрокидыванием в результате наложения возмущений. Стоит отметить, что опрокидывание возмущений при их наложении наблюдается чаще, чем опрокидывание одиночной волны. При опрокидывании возмущений происходит отрыв каплей и их попадание на верхнюю стенку. На верхней стенке наблюдается коалесценция каплей, что может привести к формированию тонкой пленки на верхней стенке миканала.

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Метод объема жидкости требует значительных вычислительных ресурсов. Более того, в представленных расчетах для более точного определения силы поверхностного

натяжения была использована адаптивная расчетная сетка с размером ячейки вблизи свободной поверхности значительно меньшим по сравнению с остальной областью. Размер ячейки вблизи межфазной поверхности составлял около 3 мкм, в остальной области 25 мкм. Использование нескольких процессоров позволило значительно сократить расчетное время.