

И. А. Евдокименко¹, К. А. Филиппский², П. Д. Лобанов¹, Р. С. Горелик¹

Исследование гидродинамики в пристенной области и теплообмена за ступенчатым расширением канала

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: evdokimenko.ilia96@mail.ru

Аннотация. Управление структурой потока является ключом к контролю над интенсивностью процессов переноса, что оказывает влияние на эффективность энергетических установок. В данной работе экспериментально исследовалось влияние одиночной преграды с сечением в виде прямоугольной трапеции на гидродинамическую картину и теплообмен на стенке двухфазного пузырькового потока в прямоугольном оргстеклянном канале с использованием методов цифровой трассерной визуализации PIV/PLIF и термографии. Полученные данные о распределении скорости жидкости вблизи стенки за преградой показали существование зоны возвратного течения для одно- и двухфазного потока. Было выяснено, что ввод газовых пузырей в поток позволяет уменьшить длину зоны рециркуляции за счет увеличения градиента пристенной скорости. Для двух потоков наблюдается область с низкой интенсивностью теплоотдачи сразу за преградой. По мере удаления от преграды интенсивность теплоотдачи на стенке возрастает с максимумом в точке присоединения и последующей стабилизацией в зоне релаксации.

Ключевые слова: отрывное течение, двухфазный пузырьковый поток, цифровая трассерная визуализация, теплообмен, термография

I. A. Evdokimenko¹, K. A. Filippskiy², P. D. Lobanov¹, R. S. Gorelik¹

Investigation of Hydrodynamics in the Near-wall Region and Heat Transfer behind Step Channel Expansion

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: evdokimenko.ilia96@mail.ru

Abstract. Controlling the flow pattern is the key to controlling the intensity of transport processes, which has an impact on the efficiency of power plants. In this work, the effect of a single obstacle with a rectangular trapezoidal cross section on the hydrodynamic structure and heat transfer at the wall of two-phase bubble flow in a rectangular plexiglas channel was experimentally investigated using PIV/PLIF and thermography techniques. The obtained data on the liquid velocity distribution near the wall behind the obstacle showed the existence of a reverse flow zone for single- and two-phase flows. It was found that the injection of gas bubbles into the flow reduces the length of the recirculation zone by increasing the near-wall velocity gradient. For the two flows, a region of low heat transfer intensity is observed immediately behind the barrier. With distance from the barrier, the heat transfer intensity at the wall increases with a maximum at the reattachment point and subsequent stabilization in the relaxation zone.

Keywords: separation flow, two-phase bubble flow, particle image velocimetry, heat transfer, thermography

Введение

Двухфазные потоки широко распространены в различных сферах промышленности. Одним из актуальных направлений является применение пузырьковых потоков в биореакторах для выращивания микроводорослевых культур. Повышение эффективности биореакторов при помощи управления гидродинамической структурой потока и, как следствие, процессами переноса является важной и комплексной задачей. Известно, что контроль над структурой потока возможен при помощи введения в него газовой фазы определенного размера.

Другой способ контроля гидродинамической структуры потока – это намеренное изменение геометрии поперечного сечения канала, что может вызвать отрыв потока [1]. Симуляция таких отрывных потоков является сложной задачей из-за их сложного строения, включающего в себя зоны обратного течения, которые формируются позади препятствия, способствующего отделению [2, 3]. Несмотря на увеличивающийся интерес к этим потокам в связи с прогрессом в области вычислительных технологий, недостаток всесторонних экспериментальных данных, в частности, по двухфазным потокам, осложняет разработку математических моделей, которые должны отражать влияние структуры потока на механизмы переноса в разнообразных геометрических условиях каналов. Тем не менее, количество литературы, посвященной исследованию теплообмена в двухфазных потоках в каналах с отрывом потока, остается ограниченным.

Данное исследование направлено на экспериментальное изучение гидродинамических характеристик двухфазного пузырькового потока и теплообмена на стенке в прямоугольном канале с одиночной преградой, с использованием метода цифровой трассерной визуализации PIV/PLIF и термографии.

Методы и материалы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Стенд представляет собой замкнутый контур, рабочим участком которого является оргстеклянный канал прямоугольного сечения с размерами 200x16x1000 мм. В качестве одиночной преграды использовалась оргстеклянная прозрачная вставка высотой 8 мм (H) в виде ступени в форме прямоугольной трапеции, которая крепилась в канале при помощи магнитов.

Рабочая жидкость (дистиллированная вода) при помощи центробежного насоса марки Grundfos CNI 4-40 подавалась из бака в рабочий участок. Контроль над расходом жидкости осуществлялся при помощи ультразвукового расходомера КАРАТ-520-32-0. Рабочий газ (воздух) вводился в канал через газовый смеситель, в который были вмонтированы 9 капилляров, расположенных по всей ширине канала поперечно основному потоку. Смеситель размещался на расстоянии 150 мм от входа жидкости.

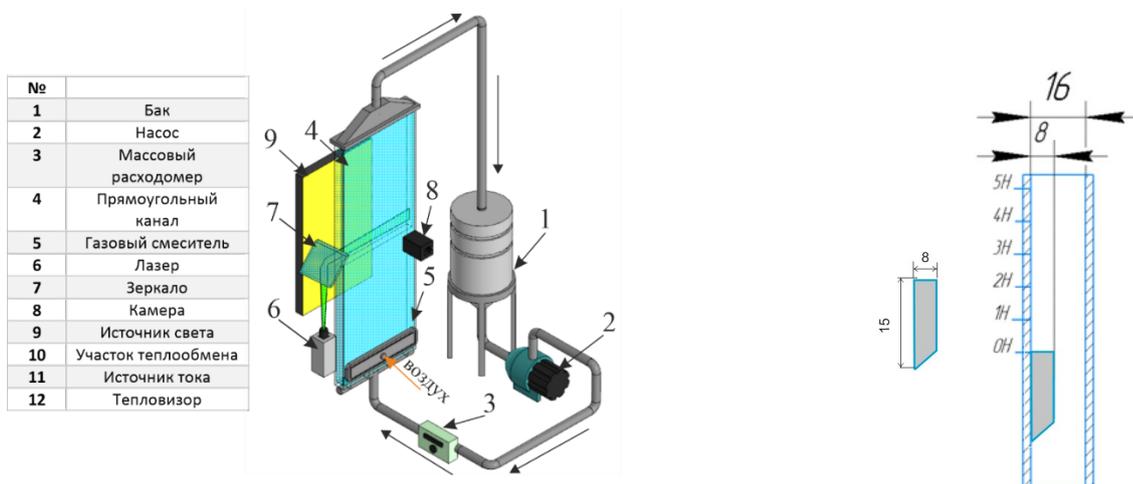


Рис. 1. Экспериментальная установка

Лазерный нож для проведения PIV/PLIF измерений устанавливался на координатно-перемещающее устройство (КПУ) и располагался параллельно каналу у боковой стенки (рис. 2). Этот метод установки позволяет перемещать лазер по толщине канала для сбора информации о скоростном распределении жидкости как вдоль, так и поперек сечения канала.

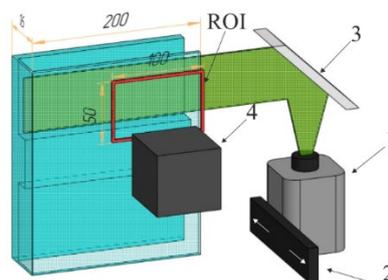


Рис. 2. Схема расположения лазерного ножа для PIV/PLIF измерений:
1 – лазер; 2 – КПУ; 3 – зеркало; 4 – цифровая камера

Использовался зеленый лазер с непрерывным излучением (длина волны 532 нм) и мощностью в 1 Вт для создания эффекта лазерного луча. Оптическое зеркало, установленное на высоте ступени, служило для переотражения луча и освещения измеряемой зоны (ROI) размером 100x50 мм. В поток вводили флуоресцентные частицы от Dantec размером от 1 до 20 мкм, плотность которых аналогична плотности потока. При такой плотности, частицы не влияют на характеристики потока. Съемка процесса велась с помощью высокоскоростной камеры JET 19 (KaYa Instruments, Хайфа, Израиль) с частотой кадров 1000 в секунду, расположенной перпендикулярно к исследуемой области.

Теплообменный участок располагается на высоте 730 мм от основания канала и представляет собой пластину из нержавеющей стали с размерами 70x140

мм с толщиной 0,2 мм установленную заподлицо со стенкой канала. Пластина нагревается посредством пропускания через нее электрического тока в 120 А от источника ($q=9100 \text{ Вт/м}^2=\text{const}$). Проводились измерения температуры внешней стенки пластины. Съемка проводилась при помощи тепловизора марки Fluke Ti32. Эксперименты проводились при $Re_H=5000$ и газосодержании β от 0 до 1%.

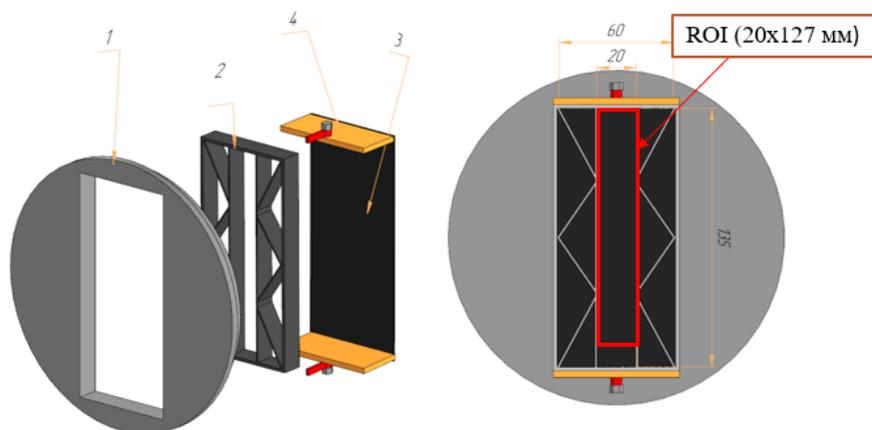


Рис. 3. Схема измерений теплообмена: 1 – пластиковый круг; 2 – фиксирующая решетка; 3 – нержавеющая пластина; 4 – тоководы

Результаты

Были получены данные о распределении скорости жидкой фазы вблизи стенки ($Y=1 \text{ мм}$) на различном расстоянии от преграды $Z=0\dots 50 \text{ мм}$ (рис. 4) при $Re_H=5000$ при $\beta=0\%$ и $\beta=1\%$.

На рис. 5 показана интенсивность теплоотдачи на стенке на различном расстоянии от преграды при тех же значениях расходах жидкости и газа.

Обсуждение

Измеренные поля скорости жидкости дают возможность характеризовать гидродинамическую структуру течения. Важно подчеркнуть, что наблюдается зона с минимальными скоростями жидкости непосредственно за препятствием как в однофазном, так и в двухфазном потоке. Это явление обусловлено переориентацией направления скорости вследствие вихревых структур в области рециркуляции. По мере удаления от преграды распределение скорости жидкости становится более однородным за счет уменьшения эффекта вихря, который формируется в зоне рециркуляции из-за отрыва потока. Наблюдается, что добавление газовых пузырьков в поток уменьшает длину зоны рециркуляции по сравнению с однофазным потоком, что обеспечивает перемещение точки повторного присоединения потоков ближе к преграде. В однофазном потоке скоростной профиль восстанавливается медленнее, чем в двухфазном, что может быть обусловлено воздействием пузырьков на уровень турбулентности в потоке.

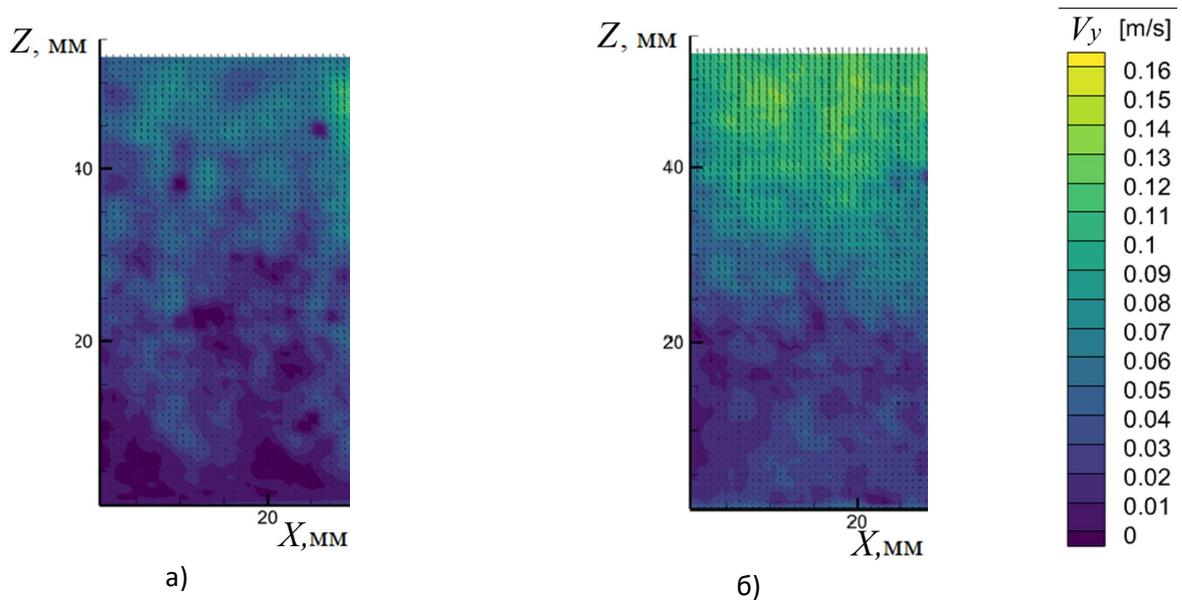


Рис. 4. Поля скорости жидкости в пристенной области на высоте $Y=1$ мм при $\beta=0\%$ (а) и $\beta=1\%$ (б)

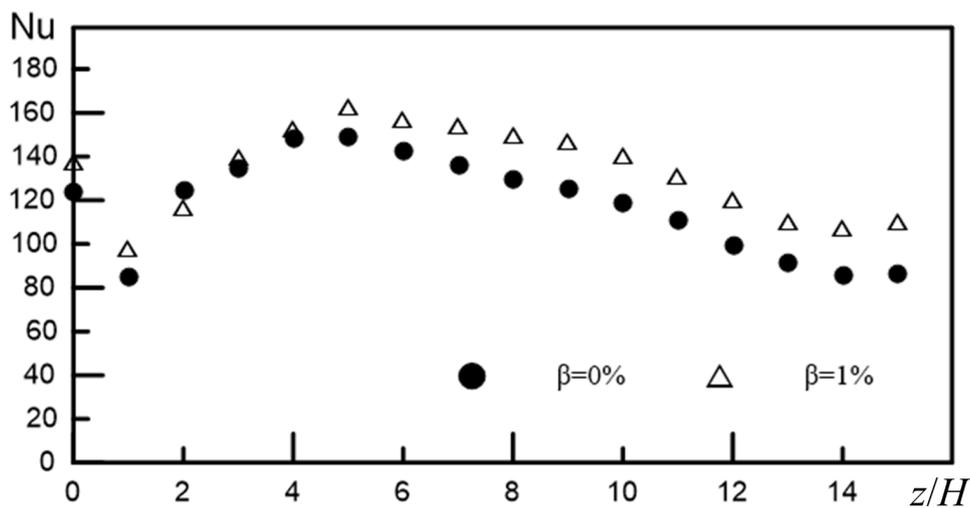


Рис. 5. Интенсивность теплоотдачи на стенке

Измерения теплообмена показали, что для однофазного потока за препятствием существует область с уменьшенными значениями числа Нуссельта Nu , которые затем возрастают и достигают максимума в районе $5H$ от уступа. Предполагается, что область с пониженными значениями Nu соответствует зоне рециркуляции, а пиковое значение совпадает с точкой повторного присоединения потока. За этим следует постепенное снижение Nu до его стабилизации, что характеризует зону релаксации потока. Для двухфазного потока кривая распределения Nu имеет аналогичный вид, однако зона с пониженными значениями Nu оказывается меньше, и максимальное значение Nu расположено ближе к уступу. Кроме того, было установлено, что повышение содержания газа в потоке приводит к увеличению Nu в зоне релаксации по сравнению с однофазным потоком.

Отмечается, что введение пузырей приводит к увеличению теплообмена на величину до 20%.

Заключение

Было проведено исследование локальной гидродинамической структуры и теплообмена на стенке газожидкостного пузырькового потока в прямоугольном канале с одиночной преградой с сечением в форме прямоугольной трапеции при помощи PIV/PLIF метода и термографии. Были получены поля скорости жидкости и распределения коэффициента Nu за одиночной преградой для $Re_H=5000$ при $\beta=0\%$ и $\beta=1\%$. Введение пузырьков в поток способствовало уменьшению длины зоны рециркуляции и более быстрому восстановлению скоростного профиля в двухфазном потоке по сравнению с однофазным, что может быть связано с увеличением внешней турбулентности и изменениями в механизмах переноса. Наблюдалось, что распределение интенсивности теплоотдачи было похожем как для однофазных, так и для двухфазных потоков. Кроме того, было выявлено, что введение газовой фазы в поток может усилить теплообмен на 20% по сравнению с однофазным потоком жидкости.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.
2. Terekhov V.I., Yarygina N.I. and Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flow in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46, No. 23. P. 4535–4551.
3. Wang, L., Hejcik, J., Sunden, B., PIV Measurement of Separated Flow in a Square Channel With Streamwise Periodic Ribs on One Wall // Journal of Fluids Engineering. 2007. 129, 834–841.

© И. А. Евдокименко, К. А. Филиппский, П. Д. Лобанов, Р. С. Горелик, 2024