

УДК 532.529.5

## **ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПУСКНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ\***

**О.Н. КАШИНСКИЙ, В.В. РАНДИН, П.Д. ЛОБАНОВ, Г.В. БОГОСЛОВЦЕВ**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

В работе приводятся результаты исследования опускного спутного пузырькового течения в вертикальной трубе внутренним диаметром 20 мм. Формирование двухфазного потока производилось с использованием специального смесителя, позволявшего изменять размер пузырьков газа. С помощью электрохимического метода измерены локальное газосодержание, скорость жидкой фазы и ее пульсации. Отмечен эффект значительного подавления турбулентных пульсаций скорости жидкости в двухфазном течении по сравнению с однофазным. Показано существенное влияние дисперсного состава газовой фазы на средние и пульсационные характеристики течения.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Структура двухфазного газожидкостного потока существенно зависит от ориентации канала и направления в нем течения. В частности, при движении двухфазного потока в вертикальной трубе имеется значительное различие в характеристиках восходящего и опускного течений.

В настоящее время в литературе существует достаточно широкий спектр публикаций, посвященных восходящему течению. Количество исследований, посвященных опускному пузырьковому течению в трубе, весьма ограничено. В работах [1 – 12] проведено экспериментальное исследование опускных течений. В [1] измерены газосодержание и перепад давления в восходящем и опускном течениях в вертикальной трубе внутренним диаметром 25,4 мм. Показано, что в опускном потоке истинное газосодержание выше, чем в восходящем, а также потери давления на трение увеличиваются с ростом расхода газа. При добавлении глицерина в рабочую жидкость потери давления на трение увеличивались с повышением концентрации глицерина. В работе [2] исследованы газосодержание, гидравлическое сопротивление, теплоотдача и структура опускных пузырьковых потоков в режимах спутного течения и зависания газовой фазы. Показано, что распределение газосодержания характеризуется наличием его максимума на некотором расстоянии от стенки трубы, большим градиентом в пристенной области, где содержание газа уменьшается до нуля; в ядре потока газосодержание остается практически неизменным. Распределение скорости жидкости в трубе также характеризуется наличием максимума в пристенной области. Гидравлическое сопротивление в двухфазном потоке значительно повышается по сравнению с однофазным. В работе [3]

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-01-00328).

проведено исследование локальной структуры опускного пузырькового потока при малых размерах пузырьков в вертикальной трубе внутренним диаметром 15 мм, скоростях потока ( $V_L$ ) 0,3 – 0,6 м/с, расходном газосодержании  $\beta$  4 – 9,6 %. Отмечен пик газосодержания в пристенной области, а также существенные снижения пульсаций скорости жидкости в этой области и пульсаций трения на стенке двухфазного течения по сравнению с однофазным. Исследование турбулентной структуры и распределения фаз в опускном пузырьковом течении в трубе внутренним диаметром 57,2 мм проведено в [4]. Измерены такие параметры течения, как локальное газосодержание, профили скорости жидкости и Рейнольдсовы напряжения. В работе [5] исследовалось опускное течение в трубах внутренними диаметрами 16 и 24 мм, расходная скорость жидкости и газосодержание составляли соответственно 0,332 – 1 м/с и 6,43 – 88,3 %. Результаты исследования турбулентной структуры и локальных характеристик опускного течения в вертикальной трубе внутренним диаметром 42,3 мм опубликованы в работе [6]. С помощью электродиффузионной методики здесь были измерены локальное газосодержание, профиль скорости жидкости и ее пульсации. Работа проведена в диапазонах  $V_L$  0,3 – 1 м/с,  $\beta$  2,21 – 17 %. Цикл работ [7 – 10] посвящен исследованию опускного пузырькового течения в трубах внутренними диаметрами 25,4 и 50,8 мм при помощи мультисенсорного датчика проводимости и ЛДА. Размеры пузырьков находились в пределах 1–2 мм. Предложена база данных исследованных опускных течений [10], на основе которых создана их классификация в зависимости от расположения пиков газосодержания: 1 — в центре канала, 2 — колоколообразное, 3 — не в центре канала. В работе [11] проведено экспериментальное и теоретическое исследование структуры опускного течения в вертикальной трубе, внутренним диаметром 20 мм. Скорость жидкости течения варьировалась в пределах 0,2 – 1 м/с, расходное газосодержание — 2 – 20 %.

Несмотря на появление в последнее время в литературе новых данных, опускные течения до сих пор изучены не до конца. Измерения, в основном, проводились в таких течениях при больших числах Рейнольдса в развитом турбулентном режиме. Ранее было показано, что введение в поток пузырьков даже в очень малых концентрациях может оказывать значительное влияние на профили осредненных и пульсационных характеристик жидкой фазы. На настоящий момент область малых газосодержаний при относительно низких скоростях жидкости практически не исследована. В [12] проведено исследование структуры опускного течения в вертикальной трубе внутренним диаметром 20 мм и расходными параметрами  $V_L$  0,3 – 1 м/с,  $\beta$  0,01 – 0,03. С помощью электродиффузионной методики измерены такие параметры течения, как локальное газосодержание, профили и пульсации скорости жидкости. Было отмечено, что даже при малых расходах газа характеристики опускного течения могут значительно отличаться от однофазного. Наблюдался эффект подавления пульсаций скорости жидкости в пристенной области течения по сравнению с однофазным потоком. Отмечено, что отличие локальных гидродинамических характеристик двухфазного течения от однофазного потока увеличивается с ростом объемного расходного газосодержания. Увеличение приведенной скорости жидкости влечет за собой уменьшение относительного влияния газа на характеристики течения. Поэтому характеристики потока становятся близки однофазным.

В последнее время в научных публикациях имеется значительный интерес к течениям, содержащим мелкодисперсную газовую фазу. Такие течения могут существенно повысить эффективность существующих промышленных аппаратов. Целью настоящей работы является изучение влияния дисперсного состава газовой

фазы на локальные характеристики опускного пузырькового течения при малых расходных газосодержаниях.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на установке, описанной в [12]. Рабочим участком установки служила вертикальная труба внутренним диаметром 20 мм. Измерения выполнялись при помощи электрохимического метода [13]. Для определения профилей скорости жидкости и локального газосодержания использовался датчик скорости, одновременно работавший в режиме датчика проводимости [13].

Диапазон приведенных скоростей жидкости составлял 0,3 – 0,4 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса, построенным по параметрам жидкой фазы, в диапазоне 5650 – 7750. Для создания пузырькового течения использовались два газожидкостных смесителя. Первый из них ранее использовался в [12]. Газ подавался в поток жидкости через 12 капилляров внутренними диаметрами 0,2 мм, расположенных в форкамере внутренним диаметром 116 мм. Вследствие малой скорости жидкости в форкамере можно было считать, что происходит свободный отрыв пузырьков от отверстия капилляра. Данный смеситель позволял получить пузыри большого размера, средний диаметр которых составлял 1,7 – 2 мм.

Для получения пузырьков меньшего размера использовался смеситель другой конструкции. Поток жидкости, подаваемый насосом, разделялся на две напорные линии, имеющие отдельные регулирующие краны и ротаметры. Газ подавался в жидкость через 12 капилляров внутренними диаметрами 0,2 мм. Они были вклеены в оргстеклянную вставку внутренним диаметром 20 мм, торцы капилляров были зашлифованы заподлицо со стенкой вставки. Образование пузырьков происходило в кольцевом зазоре, образованном внутренней поверхностью вставки и наружной поверхностью центрального тела, установленного соосно со вставкой. Ширина зазора составляла 0,5 мм. Изменением расхода жидкости через зазор можно было регулировать средний размер пузырьков газа в одном и том же режиме. Данный смеситель использовался для получения пузырьков малого размера, средний диаметр которых составлял 0,4 – 0,9 мм.

Размеры пузырьков определялись с помощью фотосъемки цифровой камерой Nikon Coolpix 5700. Съемки проводились в специальном оптическом участке, где стеклянная трубка помещалась в короб из оргстекла, заполненный иммерсионной жидкостью для предотвращения оптических искажений. Фотографии пузырьков обрабатывались на компьютере с помощью специальной программы. На рис. 1 приведены фотографии потока жидкости при одинаковых расходных параметрах ( $V_L$  и  $\beta$ ), но разных размерах пузырьков.

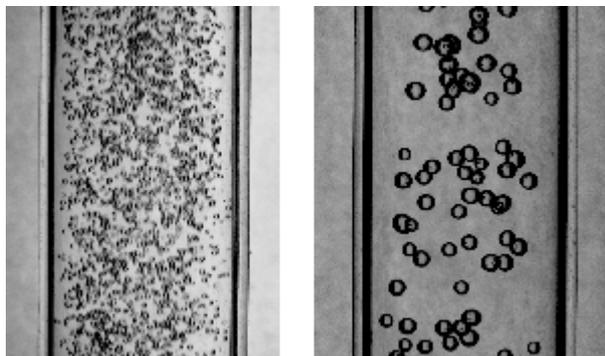


Рис. 1. Пузырьковое течение при  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,03$ , но разных размерах пузырьков.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Распределение локального газосодержания

Во всех измеренных режимах можно отметить отсутствие пузырьков вблизи стенки, что характерно для опускного течения и неоднократно отмечалось как в экспериментальных, так и в теоретических работах, например в [10, 11, 12].

В пузырьковых газожидкостных потоках среднее по сечению локальное газосодержание в большинстве случаев отличается от расходного газосодержания. Этот эффект связан с подъемной силой, действующей на пузырек. Таким образом, в восходящем течении локальное газосодержание меньше, чем объемное, поскольку пузырьки из-за своей большей скорости опережают жидкость. В опускном течении, в отличие от восходящего, газ отстает от жидкости, что приводит к превышению истинного газосодержания над среднерасходным. В случае опускного течения при снижении скорости жидкости или увеличении размера пузырька можно прийти к такому режиму, при котором подъемная сила полностью компенсирует силу сопротивления и пузырек перестанет двигаться. Такое поведение двухфазной смеси называется режимом зависания. Примерно равные значения истинного и расходного газосодержаний можно получить, увеличивая скорость жидкости, т. е. снижая влияние собственной скорости пузырька, или уменьшая размер пузырька, поскольку для малых размеров пузырьков скорость всплытия существенно зависит от их размера, см. [14].

На рис. 2, *a* приведены профили локального газосодержания для разных размеров пузырьков при одинаковых расходных параметрах жидкости и газа. Заметно, что для крупных пузырей профили локального газосодержания более наполнены, что объясняется большим отставанием таких пузырьков от жидкости. Интересно, что в пристеночной области ( $y < 2$  мм) профили для больших и маленьких пузырьков ведут себя примерно одинаково.

На рис. 2, *b* приведены профили локального газосодержания при малых (0,525 – 0,726 мм) размерах пузырьков. Пристенная зона, свободная от газа, имеет ширину около 1 мм. В центре потока существует область с примерно постоянным локальным газосодержанием. С увеличением расхода газа становится заметен пик газосодержания на расстоянии около двух миллиметров от стенки, который также

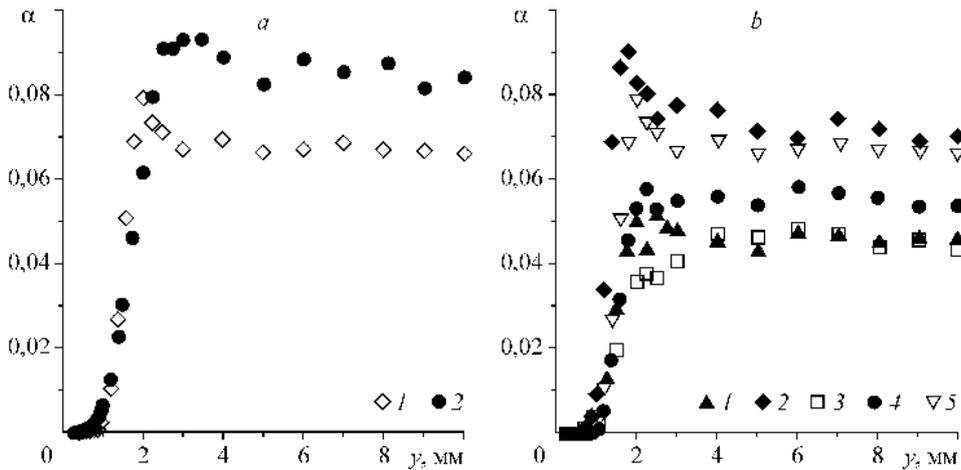


Рис. 2. Профили локального газосодержания.

*a* —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,05$ ,  $d_n = 0,726$  мм (1), 1,76 мм (2); *b* —  $V_L = 0,3$  (1, 2), 0,4 (3–5) м/с,  $\beta = 0,03$  (1), 0,05 (2), 0,03 (3), 0,04 (4), 0,05 (5).

отмечается в [6, 10 – 12]. Согласно работе [10] такое распределение газа характерно для области 3, где пик газосодержания находится вне центра канала, что можно объяснить при помощи модели пристенных вихрей, предложенной в [15]. Следуя данной модели, пузырьки газа притягиваются к стенке канала центробежной силой вихрей, вращающихся в пристенной области, что может привести к появлению пристенного пика газосодержания даже в опускном течении.

## 2.2. Распределение скорости жидкости

Добавление в жидкость пузырьков газа приводит к выполаживанию профиля скорости жидкости [6, 8, 12], т. е. такому режиму течения, при котором скорость жидкости в центральной части канала практически постоянна, и это приводит к увеличению скорости жидкости вблизи стенки канала, по сравнению с восходящим течением. Особенно это заметно при низких скоростях потока. При повышении скорости жидкости различие между профилями скорости жидкости для опускного и восходящего течения становится менее заметно. В работах [6, 8, 12] в некоторых режимах вблизи стенки обнаружен максимум скорости жидкости в отличие от восходящего течения, где этот максимум всегда находится в центре канала. В работе [8] такое поведение жидкости объясняется уменьшением ее скорости в центральной части канала из-за взаимодействия со следами пузырьков.

На рис. 3, *a* приведено сравнение профилей скорости жидкости для больших и маленьких размеров пузырьков при  $V_L = 0,4$  и  $\beta = 0,05$ . В этих профилях можно заметить существенные различия. Для  $d = 1,76$  мм скорость жидкости на расстоянии до 6 мм от центра канала примерно постоянна, ближе к стенке существует четко выраженный пик, здесь находится ее максимальная скорость. В случае  $d = 0,726$  мм скорость жидкости постепенно возрастает до своего максимума, находящегося в центре канала.

Профили скорости жидкости для различных расходных параметров приведены на рисунке 3, *b*. Для скорости жидкости 0,3 м/с характерно наличие небольшого пика на расстоянии примерно 2 мм от стенки канала, после которого скорость жидкости постепенно возрастает. При  $V_L$  0,4 м/с в центральной части канала скорость имеет практически постоянное значение и на расстоянии около 2 мм от

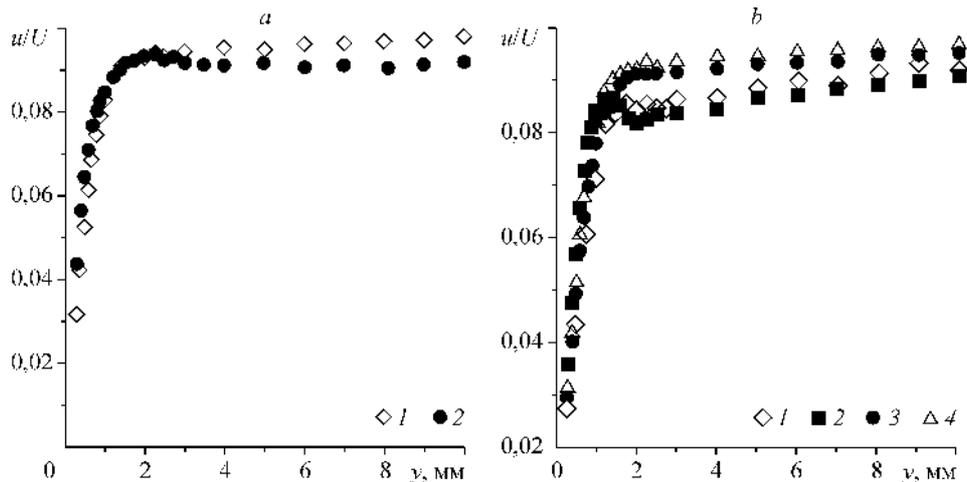


Рис. 3. Профили распределения скорости жидкости.

*a* —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,05$ ,  $d_n = 0,726$  мм (1), 1,76 мм (2); *b* — 1 —  $V_L = 0,3$  м/с,  $\beta = 0,03$ ; 2 —  $V_L = 0,3$  м/с,  $\beta = 0,05$ ; 3 —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,04$ ; 4 —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,05$ .

стенки происходит резкое ее снижение. Падение скорости до нулевого значения происходит в достаточно узкой области шириной 1,5 мм. Зона больших градиентов скорости свободна от пузырьков, что подтверждает наличие боковой силы, направленной от стенки к центру трубы. При  $V_L$  0,3 м/с и  $\beta = 0,05$  вблизи стенки обнаружен заметный пик скорости, сравнимый со скоростью жидкости в центральной части канала.

### 2.3. Пульсационные характеристики потока

Результаты измерения пульсаций скорости жидкости приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, *a*, относительная интенсивность пульсаций скорости существенно зависит от среднего размера пузырьков газа. На рис. 4, *b* приведены пульсации скорости жидкости при малых размерах пузырьков. В области, занятой газовой фазой (при  $y > 2$  мм),  $u'/u$  меняется слабо и находится в пределах 0,07–0,12. В центральной части трубы интенсивность пульсаций скорости выше, чем в однофазном турбулентном течении. Интересно поведение пульсаций вблизи стенки, где пузырьки газа отсутствуют. Значения пульсаций скорости жидкости  $u'/u$  в этой области значительно ниже, чем в однофазном потоке. Особенно это заметно при низких скоростях потока. С повышением  $V_L$  наблюдается рост  $u'/u$  вблизи стенки, и с увеличением скорости жидкости распределение интенсивности пульсаций скорости приближается к однофазному. Таким образом, в опускном течении существует демпфирующее влияние газовой фазы, приводящее к снижению турбулентных пульсаций жидкости. Это влияние становится более заметным при мелкодисперсной газовой фазе.

Эффекты подавления турбулентности в пузырьковом течении наблюдались в ряде работ как для восходящего течения, так и в опускных потоках. Поведение пульсаций скорости, качественно аналогичное приведенному на рис. 4, отмечено в [6] для трубы диаметром 42,3 мм и существенно более высоких значений чисел Рейнольдса потока. Было высказано предположение, что основным механизмом, ответственным за подавление турбулентных пульсаций, является снижение уровня собственной турбулентности жидкости за счет уменьшения градиента средней скорости. Данный механизм не может объяснить подавление пульсаций в пристенной

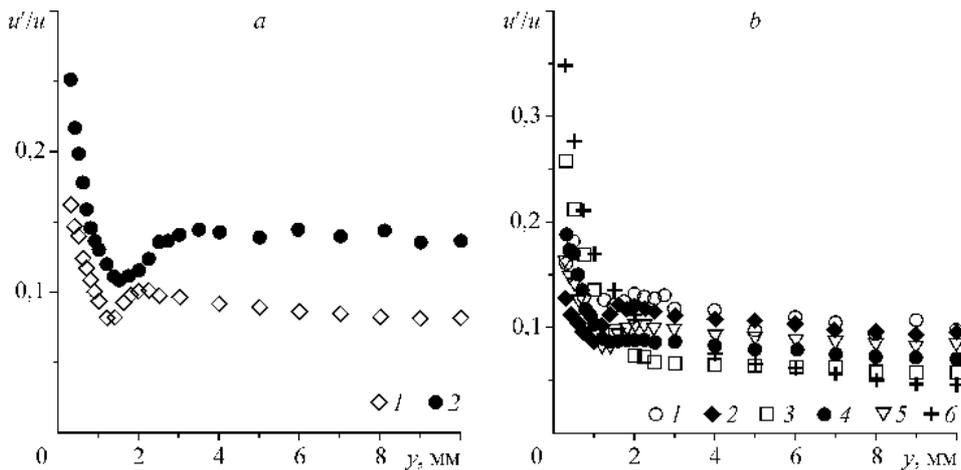


Рис. 4. Пульсации скорости жидкости.

*a* —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,05$ ,  $d_n = 0,726$  мм (1), 1,76 мм (2); *b* — 1 —  $V_L = 0,3$  м/с,  $\beta = 0,03$ ; 2 —  $V_L = 0,3$  м/с,  $\beta = 0,05$ ; 3 —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,03$ ; 4 —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,04$ ; 5 —  $V_L = 0,4$  м/с,  $\beta = 0,05$ ; 6 — однофазное течение.

зоне двухфазного течения, где градиент скорости жидкости может быть выше, чем в однофазном течении. Наблюдающееся в данной работе снижение интенсивности турбулентности в пристенной зоне, по всей видимости, связано с низкими значениями чисел Рейнольдса. Существенное влияние дисперсного состава газовой фазы на турбулентные пульсации скорости ранее было отмечено только в работе [3], что связано со сложностью получения мелкодисперсной двухфазной смеси.

### ВЫВОДЫ

В работе получены новые экспериментальные данные по течению газожидкостного опускного потока при малых газосодержаниях и малых числах Рейнольдса. Отмечено существенное снижение пульсационных характеристик потока при добавлении даже малых количеств газа. Показано, что это явление существенно зависит от дисперсного состава газовой фазы.

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\beta$ — расходное объемное газосодержание,	$y$ — расстояние от стенки трубы, мм,
$V_L$ — приведенная скорость жидкости, м/с,	$u'/u$ — пульсации скорости жидкости,
$d$ — диаметр пузырька, мм,	$u$ — локальная скорость жидкости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oshinovo T., Charles M.E. Vertical two-phase flow: Pt 2. Holdup and pressure drop // The Canadian J. of Chem. Eng. — 1974. — Vol. 52. — P. 438–448.
2. Ганчев Б.Г., Пересадыко В.Г. Процессы гидродинамики и теплообмена в опускных пузырьковых потоках // ИФЖ, 1985. — Т. 49, No. 2. — С. 181–189.
3. Горелик Р.С., Кашинский О.Н., Накоряков В.Е. Исследование опускного пузырькового течения в вертикальной трубе // Журн. прикл. мех. и техн. физики. — 1987. — № 1. — С. 69–73.
4. Wang S.K., Lee S.J., Jones O.S. Jr, Lahey R.T. Jr. 3-D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows // Intern. J. Multiphase Flow. — 1987. — Vol. 13. — P. 327–343.
5. Usui K., Sato K. Vertically downward two-phase flow, (I) Void distribution and average void fraction // J. Nucl. Sci. Technol. — 1989. — Vol. 26. — P. 670–680.
6. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // Int. J. Multiphase Flow. — 1999. — Vol. 25, No. 1. — P. 109–138.
7. Hibiki T., Coda H., Kim S., Ishii M., Uhle J. Experimental study on interfacial area transport of a vertical downward bubbly flow // Experiments in Fluids. — 2003. — Vol. 35. — P. 100–111.
8. Sun X., Paranjape S., Kim S., Ozar B., Ishii M. Liquid velocity in upward and downward air-water flows // Annals of Nuclear Energy. — 2004. — No. 31. — P. 357–373.
9. Sun X., Paranjape S., Ishii M., Uhle J. LDA measurements in air-water downward flow // Exp. Thermal and Fluid Science. — 2004. — Vol. 28. — P. 317–328.
10. Hibiki T., Coda H., Kim S., Ishii M., Uhle J. Structure of vertical downward bubbly flow // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47. — P. 1847–1862.
11. Лобанов П.Д., Пахомов М.А. Исследование структуры опускного течения // Докл. молодеж. конф. Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. — 2005. — Вып. 10. — С. 114–118.
12. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Чимитов Т.Д. Опускное пузырьковое течение при малых расходных газосодержаниях // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Том 11, № 4. — С. 619–625.
13. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений. Новосибирск, Ин-т теплофизики, 1986, 247 с.
14. Wallis G.B. The terminal speed of single drops or bubbles in an infinite medium. — I Intern. J. Multiphase Flow. — 1974. — Vol. 1. — P. 491–511.
15. Rouhani Z. Effect of wall friction and vortex generation on the radial distribution of different phases // Intern. J. Multiphase Flow. — 1976. — Vol. 3, No. 1. — P. 35–50.

*Статья поступила в редакцию 25 августа 2005 г.*