

## **ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ГРУППИРОВКИ ПУЗЫРЕЙ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ**

**О. Н. Кашинский, Е.В. Каипова, А.В. Чинак**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирское отделение РАН, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты экспериментального исследования пузырькового газожидкостного течения в горизонтальном и слабонаклоненном (от  $-20^\circ$  до  $+20^\circ$ ) плоском канале. Измерения гидродинамической структуры были проведены с помощью электрохимического метода с использованием микродатчиков трения и датчика проводимости. При проведении экспериментов были выполнены полные записи реализаций сигналов трения на верхней стенке канала и локального газосодержания. В результате цифровой обработки записанных реализаций получены профили локального газосодержания, определены значения среднего трения и его относительных среднеквадратичных пульсаций на верхней стенке канала. Показано, что в изученных режимах имеет место эффект группировки пузырей в кластеры, а пузырьковый поток представляет собой чередование пузырьковых кластеров и однофазной жидкости с отдельными пузырями или без них. Получено среднее трение и абсолютные пульсации трения в области пузырьковых кластеров и вне их. Получены гистограммы распределения плотности вероятности значений касательного напряжения на верхней стенке. Показано, что среднее трение и абсолютные пульсации в кластерах существенно выше, чем в области свободного от пузырей течения.

### **Ключевые слова.**

Пузырьковое течение, газосодержание, концентрация пузырей, трение на стенке, пульсации трения.

### **1. Введение и постановка задачи.**

Многообразие режимов двухфазных газожидкостных потоков существенно усложняет теоретическое предсказание гидродинамики течения, требуя использования различных гипотез и приближений. Сложность структуры течения делает невозможным чисто теоретическое описание

его поведения и требует использования эмпирических данных. Поэтому экспериментальное изучение газожидкостных потоков остается актуальным.

В литературе широко и подробно представлены экспериментальные исследования восходящего газожидкостного течения в вертикальных трубах и каналах [1, 2]. Значительно менее исследовано газожидкостное течение в каналах другой ориентации. В отличие от однофазного течения, в двухфазном потоке его структура существенно зависит от ориентации канала и направления движения смеси.

В статье [3] представлены результаты измерений профилей средней скорости и локального газосодержания в развитом восходящем пузырьковом течении в прямоугольном канале. Канал располагался под углами до  $30^\circ$  к вертикали, числа Рейнольдса превышали  $10^4$ , а расходное газосодержание составляло 2÷4%. С помощью специальной конфигурации трубок Пито и статических трубок были измерены средняя скорость жидкости и локальное газосодержание. В статье показано, что вблизи верхней стенки профили скорости существенно искажены присутствием пузырей. Авторы пришли к выводу, что пузырьковый слой вблизи верхней стенки может существенно подавлять среднее трение на эту стенку. Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном прямоугольном канале изучалось в работе [4]. Было показано, что ориентация канала существенно влияет на гидродинамику течения.

Поведение пузырьковых потоков в горизонтальном канале рассмотрено в работах [5, 6]. В работе [6] проведено экспериментальное исследование распределения газовой фазы в горизонтальном пузырьковом течении. С использованием датчиков электропроводности были измерены профили локального газосодержания, значения диаметров и скоростей пузырей. В статье показана существенная зависимость локального газосодержания и размеров пузырей от радиальной координаты вдоль поперечного сечения трубы. Максимумы этих зависимостей наблюдались у верхней стенки. Был изучен переход течения от режима дисперсных пузырей к режиму снарядного течения. В переходном режиме показано резкое изменение размера пузырей при небольших изменениях расходных скоростей смеси.

В последние годы в литературе стали появляться работы, описывающие экспериментальное наблюдение крупномасштабных структур в пузырьковом течении.

В работе [7] замечены небольшие флуктуации плотности распределения пузырей (образование перемежающиеся пузырьковых облаков). Скорость таких пузырьковых облаков больше средней скорости течения. В работе [8] показано, что при малых значениях газосодержания пузыри группируются в цепочку, образуя пузырьковую область, далее они движутся вместе волнообразным способом. Области между стенками канала и пузырьковой лентой заняты вихревыми крупномасштабными структурами, в которых наблюдаются области возвратного течения. В работе [9] показано, что турбулентность, индуцированная пузырями, доминирует над сдвиговой турбулентностью однофазной жидкости, а в следе пузыря образуются вихри.

В работе [10] было отмечено образование пузырьковых кластеров вблизи стенки в монодисперсном пузырьковом течении в вертикальном плоском канале. Авторы этой работы проводили измерения характеристик восходящего потока в вертикальном канале с соотношениями сторон  $40 \times 400$  мм с помощью лазер-доплеровского измерителя скорости, размер пузырьковых включений составлял 1 мм. Эксперименты были выполнены при числах Рейнольдса 8200, 4100 и 1350 и малом расходе газосодержания 0,3 и 0,6%. Были измерены профили локального газосодержания, профили относительных скоростей жидкости и относительных среднеквадратичных пульсаций скорости жидкости. В работе приведена гистограмма распределения по размерам кластеров. В [10] отмечено, что кластеры пузырей в восходящем течении движутся быстрее отдельных не сгруппировавшихся газовых включений, добавление в поток флуоресцентных частиц приводит к исчезновению эффекта группировки пузырей.

В работе [11] была отмечена группировка небольшого количества пузырей в структуры в вертикальном плоском канале при течении монодисперсного пузырькового потока при больших числах Рейнольдса.

Вышеописанный эффект группировки пузырей наблюдался в вертикальных каналах, образование пузырьковых волнообразных структур в горизонтальных и наклонных каналах в литературе не описано.

Целью настоящей работы является изучение влияния группировки пузырей на характеристики двухфазного течения в горизонтальном и слабонаклонном (относительно горизонтали) канале. Эксперименты были проведены в пузырьковом газожидкостном течении в плоском канале при

приведенных скоростях жидкости  $0,2 \div 1 \text{ м/с}$  и расходом объемном газосодержании  $0,05 \div 0,2$ . Канал располагался под углами от  $-20^\circ$  до  $+20^\circ$ ; угол наклона  $-20^\circ$  соответствует восходящему течению,  $0^\circ$  - горизонтальному потоку, а  $+20^\circ$  – опускающему. Эксперименты были выполнены с использованием электрохимического метода [12].

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений.

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый по жидкости и разомкнутый по газу двухфазный контур. Жидкость из основного бака с помощью центробежного насоса поступала в рабочий участок. Для измерения расхода жидкости использовались два ротаметра. После расходомеров жидкость подавалась в рабочий участок. Газожидкостная смесь из рабочего участка попадала в верхний бак-сепаратор, где освобождалась от газовых включений. Из бака-сепаратора жидкость вновь поступала в основной бак.

Рабочий участок установки представлял собой прямоугольный канал поперечным сечением  $10 \times 100 \text{ мм}$  и длиной  $1,7 \text{ м}$ . Газ вводился в поток через 21 капилляр с внутренним диаметром  $0,25 \text{ мм}$ , вклеенных в оргстеклянной вставке, помещенной на нижней стенке канала. Расход газа определялся по перепаду давления на расходомерной диафрагме. Пузыри газа образовывались при отрыве газа от торцов капилляров, которые выступали на  $5 \text{ мм}$  от нижней стенки. Расстояние от места ввода газа до измерительной секции было равно  $1300 \text{ мм}$ . Газожидкостный поток, получающийся при смешении газа и жидкости, поступал в измерительную секцию рабочего участка. Во всех режимах производилась видеосъемка потока с помощью цифровой видеокамеры.

Положение рабочего участка можно варьировать с помощью координатного устройства, угол наклона канала  $\theta$  отсчитывался от горизонтального положения:  $\theta = 0^\circ$  соответствует горизонтальному потоку,

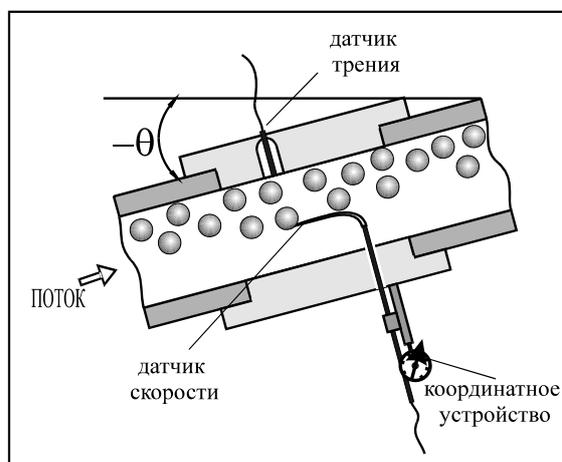


Рис.1. Измерительный блок.

отрицательные значения угла  $\theta$  - восходящему течению, положительные  $\theta$  - опускному течению.

Исследования гидродинамики течения проводилось электродиффузионным (электрохимическим) методом [12]. В качестве рабочей жидкости использовался электролит, состоящий из раствора ферри- и ферроцианида калия  $K_3Fe(CN)_6$  и  $K_4Fe(CN)_6$  и натрия углекислого  $Na_2CO_3$  в дистиллированной воде. Концентрация углекислого натрия была выбрана 0,25 моль/литр, концентрации ферри- и ферроцианида калия составляли  $5 \cdot 10^{-3}$  моль/литр.

Температура электролита поддерживалась постоянной, равной  $24^\circ C$  с помощью автоматической системы термостатирования.

Локальное газосодержание было измерено датчиком проводимости (рис.1).. Диаметр электрода датчика был равен 50 мкм. Датчик был смонтирован на координатном устройстве и мог подходить вплотную к верхней стенке канала. Для измерения нижних полупрофилей локального газосодержания, измерительная секция была повернута на  $180^\circ$  относительно вертикали. Датчик касательного напряжения был установлен на верхней стенке измерительного участка. Он имел размер электрода  $0,1 \times 0,9$  мм, клеивался в стенку измерительного блока и был зашлифован заподлицо с ней. Датчик касательного напряжения трения располагался в том же поперечном сечении канала, что и датчик проводимости.

Сигналы с датчиков трения и проводимости подавались на многоканальный усилитель постоянного тока. Коэффициенты усиления каналов были подобраны таким образом, чтобы в рабочем диапазоне изменений трения на стенке выходные напряжения каналов усилителя менялись в пределах 0,5 – 5 вольт. Усиленные сигналы датчиков подавались на АЦП через коммутатор. Обработка сигналов датчиков трения и скорости производилась с помощью

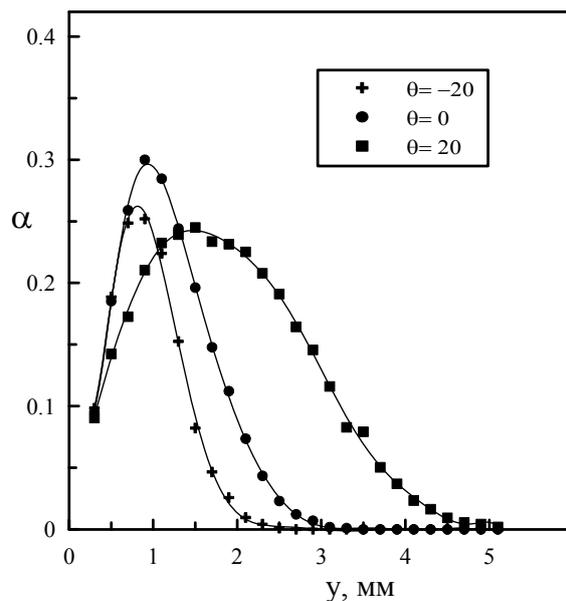


Рис.2. Профили локального газосодержания:  $V_1=0,4$ м/с;  $\beta=0,05$ .

компьютера. Были записаны и обработаны реализации сигналов датчиков проводимости и касательного напряжения трения длительностью 20с и частотой опроса 5 кГц.

Перед измерениями была проведена калибровка датчиков. Калибровка производилась при однофазном течении жидкости в канале. Значения трения при калибровке вычислялись по закону сопротивления Блазиуса.

Эксперименты проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости  $V_L$  от 0,2 до 1 м/с. Расходное газосодержание  $\beta=V_G/(V_L+V_G)$  изменялось от 0 до 0,20. Во всех режимах поток оставался пузырьковым.

### 3. Результаты измерений и обсуждение.

#### 3.1. Структура двухфазного потока.

Во всех исследованных режимах производилась видеосъемка потока. Пузыри газа образовывались в генераторе пузырей, установленном на нижней стенке канала. После отрыва газа от торцов капилляров, располагавшихся в центре потока, под действием силы Архимеда происходила достаточно быстрая миграция пузырей к верхней стенке канала. Координата  $y$  отсчитывается от верхней стенки:  $y=0$  соответствует верхней стенке,  $y=5$  мм – центру канала,  $y=10$  мм – нижней стенке. Место положения пика локального газосодержания существенно зависит от угла наклона канала, расходного газосодержания и приведенной скорости жидкости.

На рисунке 2 представлены профили локального газосодержания. В восходящем течении при угле –  $20^\circ$  пик газосодержания у верхней стенки четко выражен на расстоянии порядка среднего радиуса пузыря. При уменьшении угла наклона до горизонтального течения происходит перестройка

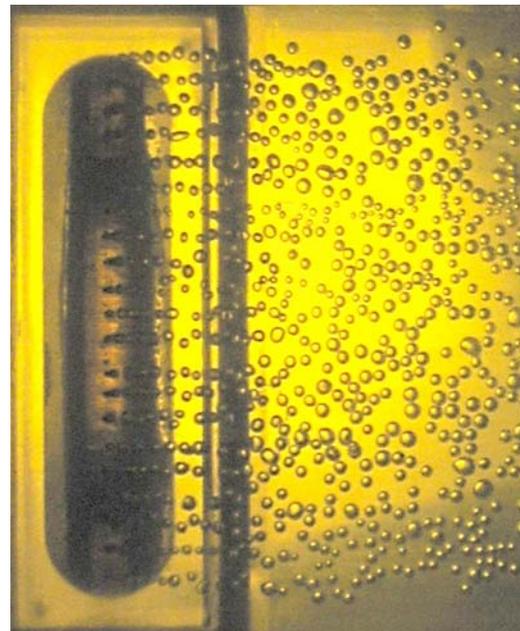


Рис.3. Картина течения вблизи генератора пузырей:  $V_L=0,4$ м/с;  $\beta=0,05$ ;  $\theta=-18^\circ$ .

структуры потока. При изменении угла до  $+20^\circ$  (опускное течение) толщина пузырькового слоя вблизи верхней стенки канала резко возрастает, а максимальное значение  $\alpha$  уменьшается.

Наибольшая высота пика газосодержания наблюдается при горизонтальном течении. В этом случае пузырь движется с меньшей скоростью, чем при восходящем течении и вероятность найти его в единице объёма возрастает по сравнению с восходящим течением, где большая величина скорости газовых включений обусловлена положительной проекцией Архимедовой силы на направление движения. В опускном течении, несмотря на то, что пузыри движутся медленней, чем в случае горизонтального течения, максимальное значение локального газосодержания ниже, чем в горизонтальном потоке. В этом случае боковая сила, действуя против сил плавучести, размывает  $\alpha$  по сечению канала и увеличивается средний радиус пузыря.

Пузыри образовывались при отрыве газа от торцов капилляров, находящихся в центре канала ( $y=5\text{мм}$ ), они располагались равномерно по потоку. Далее, пузыри под действием сил плавучести занимали место вблизи верхней стенки канала, здесь они взаимодействуют между собой и со стенкой канала (находятся в градиенте скорости жидкости). Это приводит к тому, что в некоторых изученных режимах, при умеренных приведенных скоростях жидкости ( $0,2 \div 0,6$  м/с), имеет место эффект группировки пузырей в кластеры, а пузырьковый поток представляет собой чередование пузырьковых кластеров и однофазной жидкости с отдельными пузырями или без них. На рисунке 3

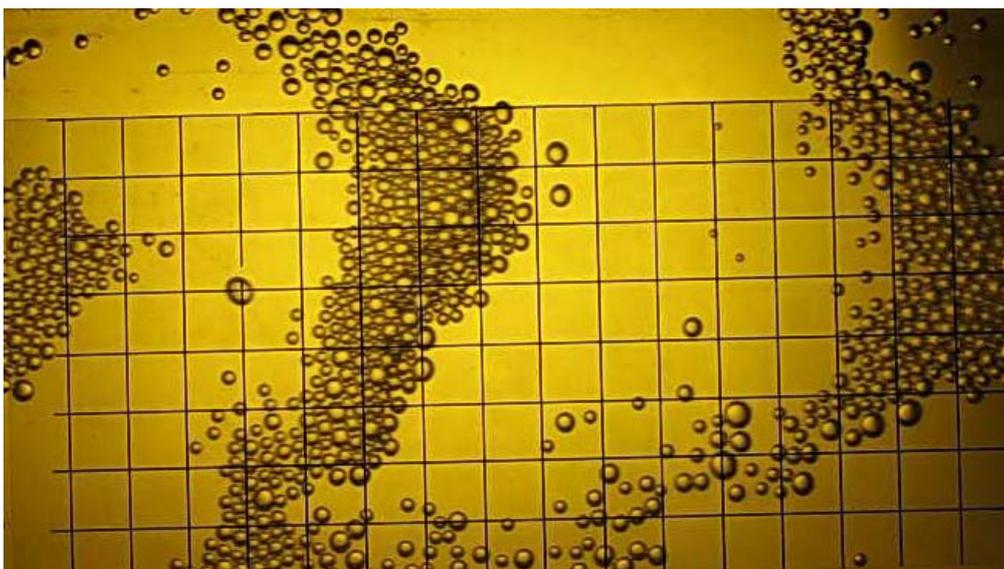


Рис.4. Картина течения в визуализационном блоке:  $V_L=0,2\text{м/с}$ ;  $\beta=0,10$ ;  $\theta=-18^\circ$ .

представлена фотография картины течения вблизи генератора пузырей при  $V_L=0,4$  м/с,  $\beta=0,05$ ;  $\theta=18^\circ$ , в данном режиме в измерительной секции были зафиксированы волнообразные пузырьковые структуры. Фотография пузырьковых волнообразных структур представлены на рисунке 4. Такое поведение наиболее характерно для восходящего течения, где пик локального газосодержания находится ближе к стенке, а градиент скорости жидкости в окрестности пузырей наиболее сильный.

При переходе от восходящего течения к опускному, профиль скорости жидкости вблизи верхней стенки канала из более заполненного (по сравнению с однофазным) переходит к менее заполненному (по сравнению с однофазным профилем). Такие изменения приводят к перестройке структуры течения, пик локального газосодержания отодвигается от верхней стенки канала, а эффект группировки пузырей становится менее выражен, кроме того существенно возрастает коалесценция пузырей. Увеличение приведенной скорости жидкости, несмотря на больший градиент скорости жидкости вблизи верхней стенки канала, приводит к уменьшению, а затем и к исчезновению, эффекта группировки пузырей в кластеры. Возможная причина этого, заключается в том, что пик локального газосодержания в этом случае располагается дальше от стенки канала, чем в случае меньших приведенных скоростей жидкости.

Несмотря на то, что группировка пузырей в кластеры наблюдается при одинаковых расходных скоростях жидкости и газа, как в восходящем, так и в опускном потоке, наиболее выраженные структуры можно видеть в восходящем течении. В этом случае можно найти режимы, где поток представляет собой только чередование пузырьковых структур и однофазной жидкости. В других рассмотренных условиях добавляется еще жидкости с отдельными или почти равномерно распределенными пузырями. В случае опускного течения, сгруппированные пузыри сливаются и эффект становится смазанным.

Одним из возможных объяснений возникновения кластеров может быть то, что пузыри с разными размерами и скоростями всплытия движутся в следе друг друга. При этом возникновение такого эффекта в горизонтальном канале и при малых углах наклона может быть связано с тем, что за счёт силы Архимеда, действующей на пузыри, у верхней стенки канала возникает пузырьковый монослой и пузырькам сложнее “обогнать” друг друга, передвигаясь ближе к ядру потока. Следует отметить, что в слабонаклонном и горизонтальном канале на скорость движения пузырей влияет не

только сила Архимеда и сопротивление пузыря, но и взаимодействие с потоком. При этом, пузыри большого размера в большей степени взаимодействуют с ядром потока и поэтому, как и в случае бесконечного объема, их скорость выше, чем скорость маленьких пузырей.

На фотографиях, полученных в экспериментах можно заметить, что расстояние между “облаками” примерно одинаковое, но из полученных экспериментов нельзя с уверенностью утверждать, что такая ситуация сохранилась бы при дальнейшем движении кластеров. Вполне возможно, что, имея некоторую разницу скорости движения, в дальнейшем кластеры будут объединяться в кластеры большего размера с другой частотой следования.

### ***3.2. Влияние пузырьковых кластеров на касательное напряжение трения на верхней стенке.***

Группировка пузырей в кластеры существенно влияет на мгновенные показания датчика трения, расположенного на верхней стенке канала. На рисунке 5 представлены реализации сигнала с датчика трения и обработанный сигнал с датчика проводимости (значения соответствующие единице характерны для моментов нахождения датчика проводимости в газовой фазе, нулю - в жидкой). Видно, что областям группировки пузырей соответствуют, как наибольшие значения среднего трения, так и наибольшие показания абсолютных пульсаций трения.

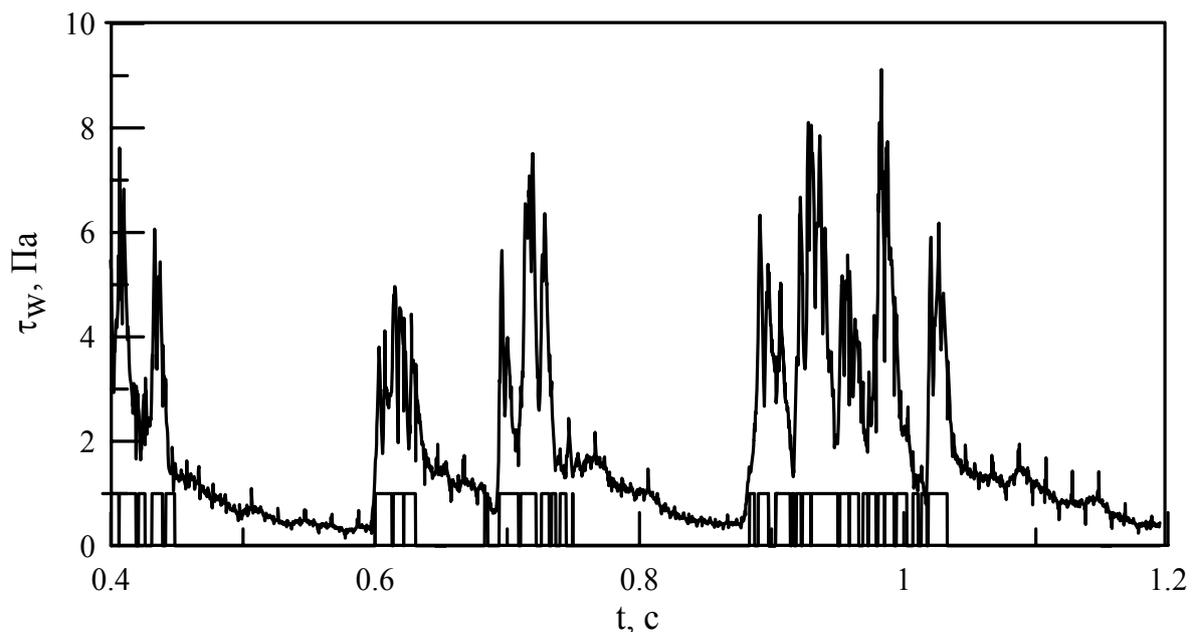


Рис.5. Обработанный сигнал датчика проводимости, сигнал датчика трения:  
 $V_L=0,2\text{м/с}$ ;  $\beta=0,10$ ;  $\theta=-18^\circ$ ,  $y=1\text{мм}$ .

На рисунке 6 представлены гистограммы распределения плотности вероятности величины трения. Видно, что в однофазном потоке плотность вероятности имеет более симметричную форму, чем в пузырьковом течении при формировании пузырьковых волнообразных структур. В случае восходящего течения, в режимах для которых наиболее характерно формирование пузырьковых структур, гистограмма распределения трения более асимметрична и более размыта в сторону больших значений трения. При переходе к опускному течению, для которого формирование кластеров становится менее характерным, максимум плотности вероятности увеличивается и распределение становится менее размытым.

При увеличении расходного газосодержания гистограмма распределения трения становится более размытой возле возросшего наиболее вероятного значения трения на стенке. При переходе к таким  $\beta$  и  $V_L$ , при которых наблюдается плотно заполненный равномерный пузырьковый слой вблизи верхней стенки канала ( $\beta=0,2$  на рис.6), гистограмма распределения вновь становится почти симметричной, пик которой будет совпадать со средним трением в потоке, а ширина будет зависеть от величины пульсаций трения пузырькового потока.

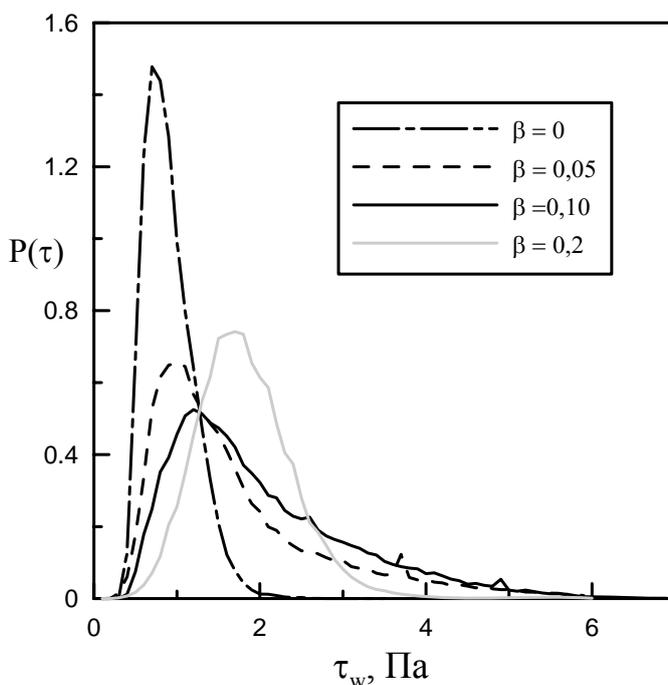


Рис.6. Распределение плотности вероятности:  
 $V_L=0,4\text{м/с}$ ;  $\theta=0^\circ$ .

### Выводы.

Проведенные экспериментальные исследования двухфазного пузырькового течения в наклонном плоском канале позволяют сделать следующие выводы:

- Структура течения существенно отличается от однофазного течения, что связано с неравномерным распределением газовой фазы по сечению.

- Показано, что в изученных режимах имеет место эффект группировки пузырей в кластеры, а пузырьковый поток представляет собой чередование пузырьковых кластеров и однофазной жидкости с отдельными пузырями или без них.
- Показано, что среднее трение и абсолютные пульсации в кластерах существенно выше, чем в области свободного от пузырей течения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-08-00405)

### Литература.

1. **Sun X., Kim S., Smith T. R., Ishii M.** Local liquid velocity measurements in air-water bubbly flow // *Experiments in Fluids* – 2002. – № 33 – P 653-662.
2. **Magaud F., Souhar M., Wild G., Boisson N.**, Experimental study of bubble column hydrodynamics // *Experiments in Fluids* – 2001. – № 56 – P 4597-4607.
3. **Sanaullah K., Thomas N. H.**, Velocity and voidage profiles for steeply inclined bubbly flows in segregated – disperse regime.// *Experimental and Computational Aspects of Validation of Multiphase Flow CFD Codes*, - 1994 - FED-Vol.180, P. 119-127..
4. **О.Н. Кашинский, А.В. Чинак, Е.В.Каипова**, Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном прямоугольном канале.// *Теплофизика и Аэромеханика*, 2003, том 10, № 1, с.71-78.
5. **Gabillet C., Colin C., Fabre J.**, Experimental study of bubble injection in a turbulent boundary layer// *International Journal of Multiphase Flow*, - 2002 - № 28 - P. 553-578.
6. **Andreussi P., Paglianti A., Silva F.S.**, Dispersed bubble flow in horizontal pipes// *Chemical Engineering Science* – 1999 - № 54 – P. 1101-1107.
7. **M.R. Davis, B. Fungtamasan.** Large scale structures in gas-liquid mixture flows// *Int. J. Multiphase Flow*-1984.- Vol.10, № 6 - pp. 663-676.
8. **R.F. Mudde, D.J. Lee, J. Reese, L.-S. Fan.** Role of coherent structures on Reynolds stresses in a 2-D bubble column// *AIChE Journal* - 1997. - Vol.43, №4 - pp. 913- 926.

9. **Zhe Cui, L.S. Fan.** Turbulence energy distributions in bubbling gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems// Chemical Engineering Science - 2004 - № 59 - pp. 1755- 1766.
10. **Toshiyuki Ogasawara, Yoshiyuki Tagawa, Akiko Fujiwara, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto,** The clustering phenomena near the wall in a turbulent bubbly channel flow.//3<sup>rd</sup> International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, 22-24 September, 2004.
11. **R. Zenit, D.L. Koch, A.S. Sangani,** Measurement of average properties of a suspension of bubbles rising in a vertical channel// J. Fluid Mech. – 2001 – Vol. 429, pp. 307-342.
12. **Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И.;** Электродиффузионный метод исследования локальных характеристик турбулентных течений/ Институт теплофизики. Новосибирск. 1986. 247 с.