

*И.Н. Ершов, В.В. Кузнецов, А.С. Шамирзаев*

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

## ГИДРОДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО СНАРЯДА И МЕЖФАЗНЫЙ МАССООБМЕН В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ МИНИ-КАНАЛАХ

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены данные экспериментального исследования всплытия одиночных воздушных снарядов в покоящейся жидкости в вертикальных и наклонных прямоугольных мини-каналах. Длинная сторона каналов больше, а короткая меньше капиллярной постоянной. Показано, что скорость всплытия снарядов в таких каналах в основном определяется протеканием жидкости в углах канала и снаряды всплывают даже при малых числах Этвеша. Представлена корреляционная зависимость для скорости всплытия одиночных снарядов в таких каналах. Также в работе представлены результаты экспериментального исследования межфазного массообмена в системе углекислый газ – вода (с добавлением щелочи КОН в малой концентрации для улучшения смачивания) при зависании одиночных снарядов в прямоугольных каналах различных проходных сечений. Выявлено влияние температуры и химической реакции на массообмен в этой системе.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные течения в каналах малого размера широко встречаются в компактных теплообменниках. В последнее время интерес к этим течениям обусловлен применением микроканальных технологий для охлаждения высоконапряженных энергетических устройств. Процессы межфазного тепло- и массообмена в каналах малого размера широко используются также в различных аппаратах химической и биотехнологии. К ним можно отнести разного типа пленочные и трубчатые абсорбцеры, ректификационные колонны, трубчатые реакторы для выращивания микроводорослей и т.д. Одним из основных режимов восходящего течения в каналах с размером меньше капиллярной постоянной является снарядный режим течения. Гидродинамика течения и форма снарядов существенно определяются соотношением сил гравитации и капиллярных сил, особенно в прямоугольных каналах с острыми углами. В таких каналах капиллярные силы перераспределяют потоки жидкости, что изменяет гидродинамику течения, скорость движения снарядов и протекание тепломассообмена по сравнению с каналами большого размера.

При построении моделей снарядного течения многие авторы используют за основу модель из [1], включающую в себя скорость всплытия снаряда в канале с неподвижной жидкостью. Эти корреляции используются и при построении моделей снарядного режима течения в каналах компактных теплообменников, при учете влияния прохождения пузырей на тепло- и массообмен. Эта модель построена для

цилиндрических каналов с  $Eo > 4$ , т.е. для каналов большого размера. Как показал анализ [2], в трубах с  $Eo < 3.37$  снаряды вообще не всплывают из-за формирования сверхтонкой пленки на стенках. Это может служить ограничением на размер канала при проектировании тепло- и массообменных устройств с восходящим газожидкостным течением.

Целью данной работы являлось исследование гидродинамики движения газовых снарядов в прямоугольных каналах различного размера для жидкостей с различными физическими свойствами, измерение скорости их движения и изучение межфазного массообмена.

### 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЛЫТИЯ ОДИНОЧНОГО СНАРЯДА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ МАЛОГО РАЗМЕРА

#### 2.1. Методика эксперимента

Экспериментальные участки изготовлены из калиброванных пластин из нержавеющей стали с наклеенными стеклами. Толщина клеевого слоя меньше 100 мкм. В нижней части каналов организован ввод газа. Исследовалось поведение снарядов в покоящейся жидкости при открытом верхе и заглушенном дне канала. Схема измерительной установки показана на рис.1.

Измерение скорости всплытия осуществлялось времяпролётным способом. Луч He-Ne лазера разделяется на два параллельных луча и направляется на фотодиоды сквозь экспериментальный участок. Расстояние между лучами составляло 9 см. При прохождении снаряда лучи рассеиваются на границе раздела фаз и пиковое уменьшение интенсивности регистрируется фотодиодами, сигналы с которых смешиваются и направляются на самописец. Схема настроена так, что сигналы с верхнего и нижнего фотодиода различаются по интенсивности в несколько раз, что позволяет различить прохождение границы снаряда на уровне верхнего и нижнего луча. Скорость всплытия снарядов определялась как  $U=L/\sin(\Theta)/\tau$ , где  $L$  – расстояние между лучами,  $\Theta$  – угол наклона канала,  $\tau$  – время пролёта между лучами. Зная скорость всплытия снаряда по времени прохождения головной и хвостовой частей снаряда, определялась его длина по сигналу с нижнего и верхнего фотодиодов. В проведенных опытах не наблюдалось изменения длины снаряда за время прохождения между лучами, что говорит об отсутствии испарения жидкости.

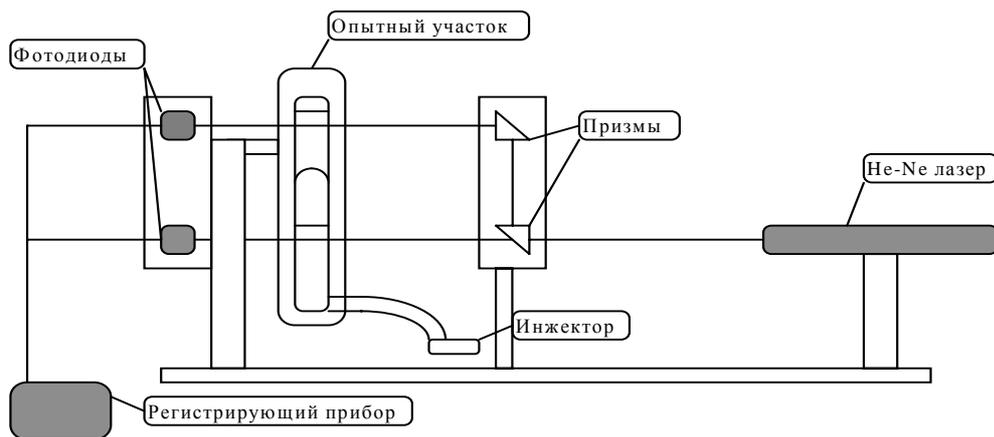


Рис.1. Схема установки для измерения скорости всплытия одиночных снарядов

Были проведены эксперименты с ацетоном, этанолом, изопропанолом, гептаном и водно-этаноловыми растворами для каналов 2x7, 1x7, 0.5x7, 1.23x4.9 и 1x3 мм с различными углами наклона каналов к горизонту (90, 60, 45, 30°). Зависимости скорости всплытия снарядов от длины для сформировавшихся снарядов не наблюдалось. Плотность, вязкость и поверхностное натяжение использованных жидкостей измерялись в ходе опытов. Измерение поверхностного натяжения проводилось методом взвешивания капли.

## 2.2. Результаты эксперимента

Вместо обычного числа Этвеша  $Eo$  везде использовалось модифицированное число Этвеша, где вместо  $d_h$  взят максимальный размер канала, для расчета в качестве характерного размера также взят максимальный размер канала. Когда  $d_{max}$  много больше  $\delta_\sigma$ , экспериментальные данные качественно описываются уравнениями из [1]. Когда  $d_{max}$  становится сравним с  $\delta_\sigma$ , скорость всплытия снарядов существенно выше расчетной. В прямоугольном канале пузырьки всплывают из-за течения жидкости в углах канала даже при малых  $Eo$ . Изменение угла наклона эквивалентно изменению поверхностного натяжения.

Скорость всплытия снарядов  $U$  определяет толщину формирующейся пленки в снаряде и, в конечном счете, тепломассообмен. Существенное влияние на толщину пленки и  $U$  снарядов оказывает вязкость жидкости. Влияние отношения сторон канала отсутствует у ацетона, имеющего наименьшую вязкость. Эксперименты показали, что существенное влияние на формирование головы снаряда и пленки жидкости должны иметь не только капиллярные силы, но и взаимоотношение капиллярных сил и сил вязкого трения. Определено, что числа Этвеша и Галилея являются параметрами, определяющими скорость всплытия снаряда.

На основании проведенных экспериментов получена эмпирическая формула, описывающая скорость всплытия в прямоугольных миканалах:

$$Ca = 0.0047 Eo_{max}^{1.91} Eo_{min}^{-1/12} Ga^{-0.85}, \quad (3)$$

На рис.2 представлена зависимость капиллярного числа, помноженного на комплекс чисел Галилея и Этвеша, подобранный так, чтобы исключить характерный размер канала и влияние свойств жидкости, и отвечающий за отношение капиллярных сил к силам вязкого трения. Когда модифицированное число Этвеша  $Eo_{max}$  становится меньше 2, характер движения снарядов качественно меняется. Скорость их всплытия становится малой, но снаряды всплывают при всех числах Этвеша. По всей видимости это связано с тем, что когда максимальный размер канала меньше 2, капиллярные силы препятствуют формированию толстых пленок на короткой стороне канала и жидкость может перетекать только через мениски в углах.

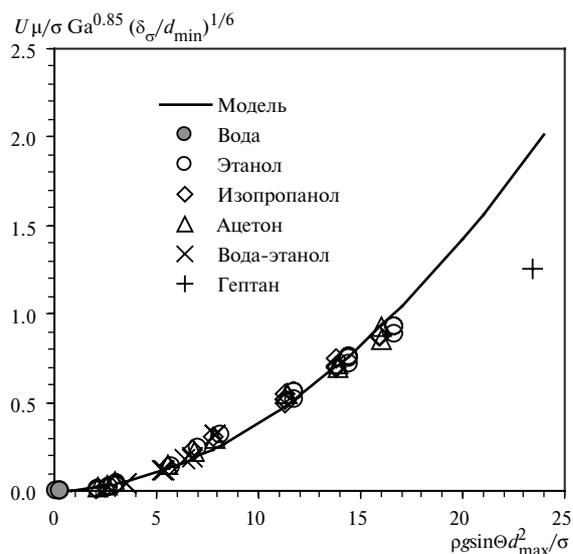


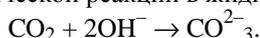
Рис. 2. Экспериментальные и литературные данные для скоростей всплытия снарядов. Данные для воды взяты из [3]

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖФАЗНОГО МАССООБМЕНА ОТ ОДИНОЧНОГО СНАРЯДА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ МАЛОГО РАЗМЕРА

#### 3.1. Описание эксперимента

В качестве рабочего участка использовались прямоугольные каналы различного сечения, склеенные из стекол, на входе и выходе из которых приклеены переходные фланцы из оргстекла, и стеклянная трубка диаметром 8.5 мм; фланцы и концы трубки были связаны с баками верхнего и нижнего уровней гибкими шлангами. Дистиллированная вода протекала по рабочему участку из верхнего бака в нижний, при этом расход регулировался вентилем внизу. Через инжектор внизу впрыскивался углекислый газ, всплывал и формировался снаряд, возле линейки он завешивался на месте регулированием расхода. Далее процесс растворения фиксировался на цифровую камеру, данные с которой сразу отправлялись на ПК. В записи фиксировалось время отсчета кадра, длина снаряда определялась по линейке. Во время опытов проводилось измерение температуры. Далее строилась зависимость объема от времени; объем снаряда рассчитывался по экспериментальным кривым для каналов некруглого сечения и по расчетам для трубки диаметром 8.5 мм. Скорость растворения определялась по начальному этапу (интервал длительностью порядка пяти секунд). Полная погрешность измерения коэффициента массоотдачи равна 10%.

Для измерения коэффициентов массоотдачи в прямоугольных каналах использовался слабый раствор щелочи КОН, для лучшего смачивания тонкой пленкой стеклянной поверхности, концентрация составляла  $C=0.33$  г/л. Были измерены  $\mu$  и  $\sigma$  этого раствора, отличий от значения для дистиллированной воды не было. Для учета влияния щелочи в растворе на массообмен были проведены опыты со стеклянной трубкой большого диаметра (8.5 мм), где смачивание не оказывало влияния на скорость всплытия снарядов, измерялись коэффициенты массоотдачи для раствора КОН и в чистой воде. Использование КОН для улучшения смачивания поверхности стекла приводит к возникновению химической реакции в жидкой фазе:



Химическая реакция приводит к увеличению коэффициента массоотдачи в жидкой фазе. Реакция необратима, следовательно, можно ввести коэффициент, учитывающий увеличение массопереноса из-за реакции, зависящий от условий проведения. Такой коэффициент был найден из измерений коэффициентов массоотдачи снаряда в круглой трубке для раствора щелочи в воде и в чистой воде при одной температуре (23°).

#### 3.2. Полученные результаты

На рис. 3 приведено изменение формы снаряда  $\text{CO}_2$  в воде в зависимости от времени. Опыты были проведены в вертикальной стеклянной трубке диаметром 8.5 мм.

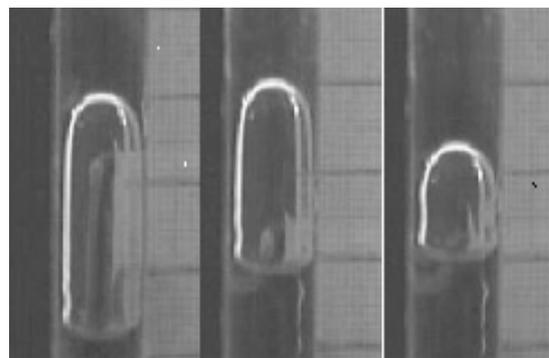


Рис. 3. Последовательные фотографии процесса абсорбции  $\text{CO}_2$  в воде со щелочью в трубке диаметром 8.5 мм: слева направо – 0.8 с, 3.8 с, 12.2 с момента начала съемки

Форма головки остается постоянной, пока снаряд имеет длину порядка и больше диаметра трубки. При дальнейшем уменьшении длины снаряд превращается в эллипсоидальный (в профиле) пузырь.

Ниже в виде графиков представлены коэффициенты массоотдачи, рассчитанные как модифицированные числа Шервуда  $Sh^*$ [4].

Для измерения увеличения коэффициента массоотдачи вследствие химической реакции были проведены опыты с растворением углекислого газа в воде и воде со щелочью при одной температуре ( $23^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Сравнение опытных данных показывает, что гомогенная химическая реакция в жидкой фазе интенсифицирует массообмен в  $1.18 \pm 4\%$  раз и степень интенсификации практически не зависит от длины снаряда в диапазоне изменения  $l/d$  от 1,5 до 3.

Для учета влияния температуры были проведены измерения для воды в круглой трубке при разных температурах ( $31^\circ\text{C}$  и  $23^\circ\text{C}$ ). Получилось, что из-за повышения на один градус температуры коэффициент массоотдачи уменьшается на 3%.

На рис. 4 показаны все полученные экспериментальные данные в виде зависимостей  $Sh^*/Pe^{1/2}$  от  $l/d$ . Представлены данные для каналов сечением 3.5x4.9, 3.9x3.8, 3.9x7.5, 4.5x13 и 9.6x9.7 мм и трубок диаметром 8.5 и 8.6 мм [5]. Все данные приведены к одной температуре  $T=20^\circ\text{C}$ , учтено влияние щелочи (для каналов прямоугольного и квадратного сечений). Как видно из этих графиков, зависимости коэффициентов массоотдачи для прямоугольных каналов и каналов квадратного сечения имеют различный вид. Были получены степенные аппроксимации для безразмерного коэффициента массообмена в каналах прямоугольного сечения:

$$Sh^*=3.06(l/d)^{0.55} \quad (2)$$

и в каналах круглого и квадратного сечений:

$$Sh^*=5.99(l/d)^{0.06} \quad (3)$$

Для всех каналов в качестве значения  $d$  из двух характерных размеров берется  $d_{\max}$ .

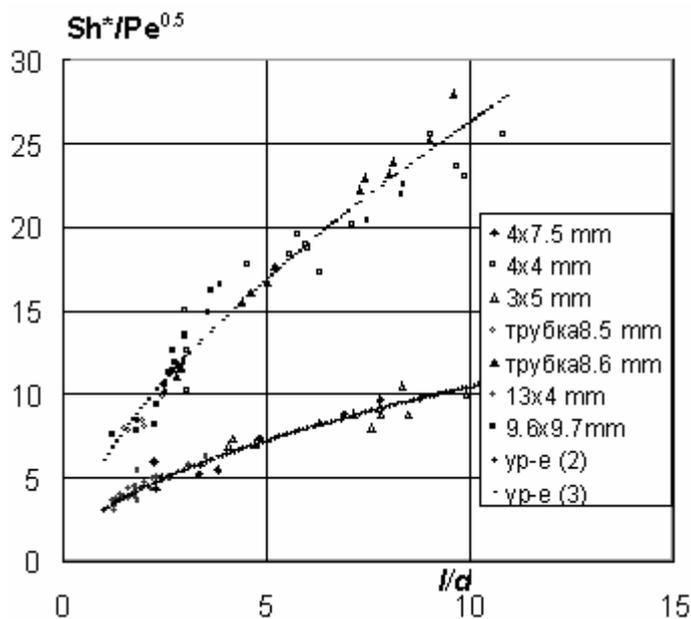


Рис. 4. Экспериментально полученные коэффициенты массоотдачи для всех каналов и трубок

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена формула для скоростей всплытия снарядов в прямоугольных мини-каналах с одной из сторон порядка или меньше капиллярной постоянной, для диапазона  $Е_{0\max} < 20$ ,  $Е_{0\min}$  порядка 1 и меньше.

Впервые проведено экспериментальное исследование межфазного массообмена от одиночного снаряда в мини-каналах прямоугольного сечения. Получены формулы для расчета коэффициентов массоотдачи для снарядов в таких каналах. Выяснено, что коэффициенты массоотдачи в каналах прямоугольного и квадратного сечений зависят от  $l/d_{\max}$  в различной степени. Определено влияние химической реакции и изменения температуры на протекание процесса массообмена.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы» на 2005 г., проект № 8158.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$U$  – скорость всплытия снаряда, м/с;  
 $Ar = (\rho \Delta\rho g d^3 / \mu^2)^{1/2}$  – число Архимеда;  
 $Ca = \mu U / \sigma$  – капиллярное число;

$Ga = g d^3 \rho^2 / \mu^2$  – число Галилея;

$E_0 = \frac{g d_h^2 \Delta\rho}{\sigma}$  – число Этвеша;

$E_0^* = \frac{g d_{\max}^2 \Delta\rho}{\sigma}$  – модифицированное число Этвеша;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$d$  – диаметр канала, м;

$d_h$  – гидравлический диаметр канала, м;

$d_{\min}$  – длина короткой стороны канала, м;

$d_{\max}$  – длина длинной стороны канала, м;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta\rho$  – разность плотностей жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$D$  – коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$C$  – концентрация растворенного газа, кг/м<sup>3</sup>;

$T$  – температура, К;

$K$  – коэффициент массопередачи, м/с;

$l$  – длина снаряда, м;

$V$  – объем снаряда, м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поверхности снаряда, м<sup>2</sup>;

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$\delta_\sigma$  – капиллярная постоянная, м;

$Sh = \beta d / D$  – число Шервуда;

$Sh^* = \beta S / (dD)$  – модифицированное число Шервуда;

$\beta = (-dV/dt^* \rho) / C_0$  – коэффициент массоотдачи, м/с;

$C_0$  – равновесная концентрация углекислоты на межфазной границе;

$Pe = Ud / D$  – число Пекле.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wallis G.B.** One Dimensional Two-Phase Flow. McGraw-Hill, New York. 1969.
2. **White and Beardmore.** The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes, Chemical Engineering Science. 1962. Vol. 17. P. 351–361.
3. **Bi Q.C., Zhao T.S.** Taylor bubbles in miniaturized circular and noncircular channel // Int. J. of Multiphase Flow. 2001. 27. P. 561–570.
4. **Filla M., Davidson J. F., Bates J. F., Eccles M. A.** Gas phase controlled mass transfer from a bubble // Chem. Eng. Sci. 1976. V. 31. P. 359 – 367.
5. **Петухов А. В.,** Гидродинамика и межфазный массообмен при снарядном газожидкостном движении в трубах: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Институт теплофизики, 1988.