

*Л.А. Большов<sup>1</sup>, В.Ф. Стрижов<sup>1</sup>, В.В. Чуданов<sup>1</sup>,  
С.В. Алексеенко<sup>2</sup>, В.Г. Меледин<sup>2</sup>, Н.А. Прибатурин<sup>2</sup>*

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия (1)

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия (2)

## НОВАЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

### АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается расчетно-экспериментальная методология исследования пузырьковых течений. Предлагаются эффективные вычислительные CFD алгоритмы для 3D расчетов двухфазных течений с явным выделением межфазной границы и учетом сил поверхностного натяжения. Описывается новая экспериментальная методика, позволяющая контролировать и описывать 3D эффекты пузырьковых течений, как осредненные, так и локальные во времени и пространстве. Основной акцент доклада сделан на валидации и верификации вычислительной математической модели с использованием как доступных из литературы тестов, так и результатов экспериментов, полученных в Институте теплофизики СО РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на длительную историю исследования двухфазных паро- и газожидкостных течений удовлетворительного вычислительного подхода для определения движения разных фаз и поведения двухфазных смесей до сих пор нет. Одной из причин такого положения является отсутствие ясной и детальной картины взаимодействия пузырьков как с несущей средой, так и между собой. В этой связи актуальными являются развитие вычислительных методов и алгоритмов для решения задач тепло- и массопереноса в несжимаемых средах с учетом сил поверхностного натяжения, а также разработка вычислительных модулей для трехмерного CFD кода, отвечающего современному уровню развития вычислительных средств и численных методов.

В данной работе представлены особенности развитой в ИБРАЭ РАН методологии моделирования пузырьковых течений и приведены результаты её валидации на базе экспериментов, проводимых в ИТ СО РАН. Особое внимание уделено рассмотрению задач всплытия одного и группы пузырей в плоском канале и взаимодействия капель жидкости с малой разностью плотностей с учетом их слияния и разрыва капель.

### 2. ТЕХНИКА ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Для моделирования поведения пара внутри пузыря предлагается модель сжимаемых сред при малых числах Маха [1]. Для моделирования поведения жидкости вне пузыря используются нестационарные уравнения Навье-Стокса в естественных переменных для несжимаемой жидкости вместе с уравнением энергии [2]. Для наблюдения за поверхностью

раздела двухфазной системы использованы: модифицированный метод набора уровней для прямого численного моделирования двухфазной системы типа жидкость-пар [3]; монотонная многомерная схема адвекции с малой схемной диффузией с использованием подсеточного моделирования [4]; эффективные вычислительные алгоритмы для решения уравнения давления в гидродинамике несжимаемой жидкости с переменной плотностью.

Развитые алгоритмы, методы и программное обеспечение были тестированы на широком наборе тестов [1-5].

### 3. МАТРИЦА ВАЛИДАЦИИ

Первый тест «Всплытие сферической шапки пузыря в неподвижной жидкости» [6] можно рассматривать как предварительный для валидации новых численных методов. Этот тест заслуживает особого внимания к результату, который заключается не только в определении окончательной формы пузыря, но также и в точном вычислении скорости пузыря, начиная от его состояния покоя и вплоть до достижения им заключительного асимптотического значения.

На рис. 3.1 показано сравнение численных предсказаний с данными [6] по скорости роста пузыря в зависимости от времени. Как можно видеть, наблюдается хорошее совпадение по динамике и форме траектории кривой скорости роста пузыря. На рис. 3.2 представлены двумерная (а) и трехмерная (б) картины всплытия одиночного пузыря, полученные в результате численного моделирования.

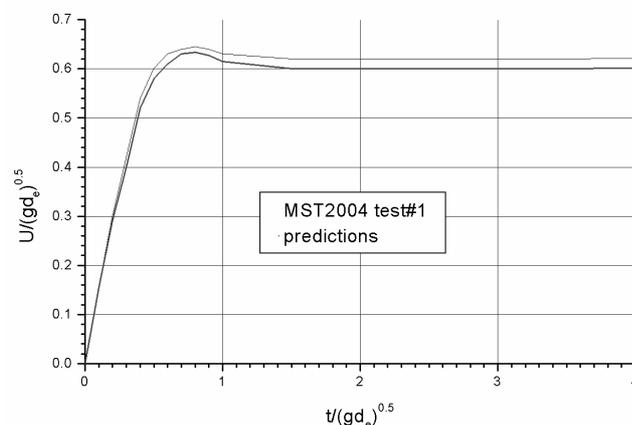


Рис. 3.1. Зависимость скорости подъема пузыря от времени

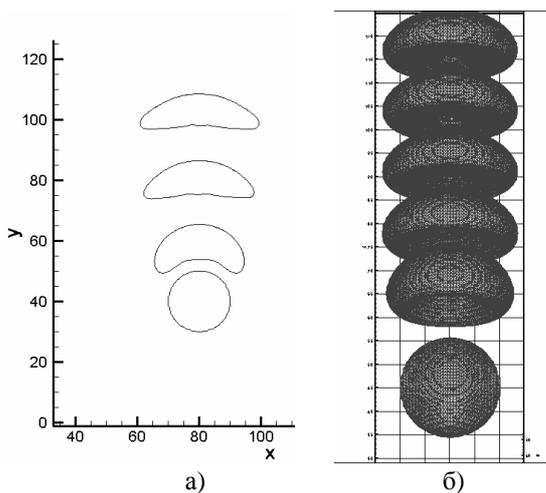


Рис. 3.2. Картины всплытия пузыря в неподвижной жидкости

Второй тест «Свободное всплытие капли жидкости в неподвижной жидкости» [6] посвящен определению стабильности пузыря, свободно всплывающего под действием только силы тяжести, которая, как известно, нелинейным способом зависит от начальных условий. В частности, существует критическое капиллярное число, вне которого всплытие пузыря становится непостоянным, и это критическое значение нелинейно зависит от формы пузыря. Когда возникает неустойчивость, интерфейсное движение зависит только от равновесия между эффектами поверхностного натяжения и эффектами вязких сдвиговых напряжений. Эта ситуация представляет собой очень серьезный тест для описания поверхностного натяжения и вязких напряжений на поверхности раздела для вычислительных кодов, имеющих дело с поверхностями раздела. Эксперименты проводятся в силиконовом масле, вязкость которого сопоставима с внутренним жидким числом 1 [6]. Жидкость в капле - смесь касторового масла и 3%-ного раствора метанола. Разница плотностей  $\Delta\rho = 17 \text{ кг/м}^3$ . На рис. 3.3 и 3.4. показаны экспериментальная и расчетная (3D) эволюции формы капли в начальный момент времени  $t = 0$  и в более поздние времена  $t = 5.4, 8.5$  и  $14.8$  с.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ РАСЧЕТЫ

Эксперименты ИТ СО РАН по всплытию воздушных пузырьков в плоском зазоре проводились как для одиночного пузырька, так и для группы пузырей. Основное внимание в эксперименте уделялось определению детальных данных по траекториям пузырьков в плоскости  $xu$ ; компонентам вектора скорости всплывающего пузырька  $V_x, V_y$ , площади пузыря, эксцентриситету пузыря, углу наклона главной оси пузыря, поперечному и продольному размерам пузыря. Эксперименты проводились на лабораторной установке, представляющей собой щелевой канал толщиной 3 мм, высотой 0,5 м и шириной 0,2 м. Канал заполнялся дистиллированной водой. Генерация пузырьков осуществлялась через капил-

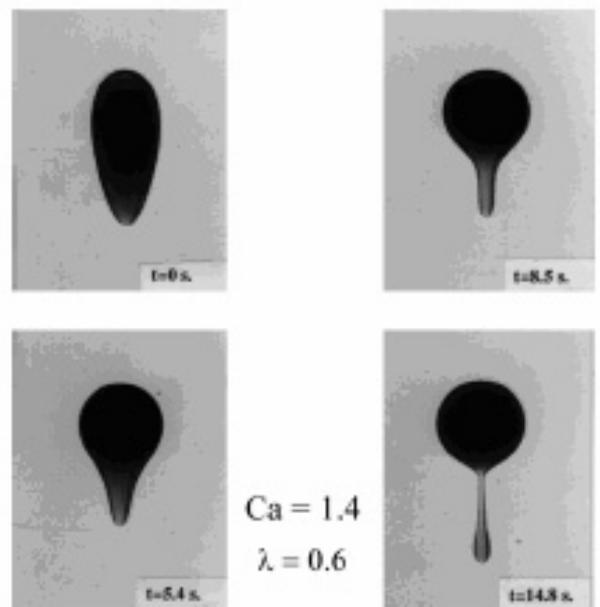


Рис. 3.3. Всплытие капли жидкости в другой жидкости

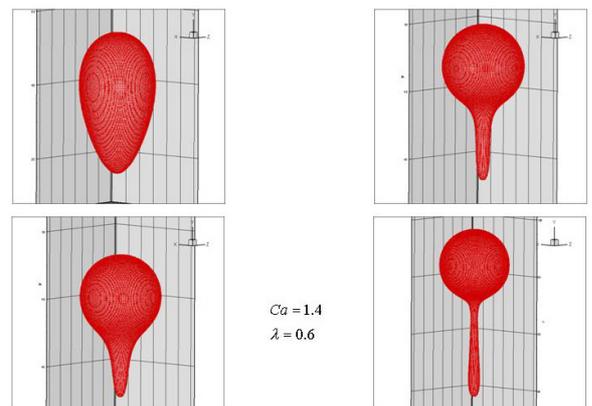


Рис. 3.4. Расчетная 3D форма капли жидкости

ляры, расположенные в нижней части канала. Диаметр капилляров варьировался. Жидкость внутри рабочего канала была неподвижная. Производились опыты по всплытию одиночного пузырька различного диаметра, цепочки пузырьков с разным расстоянием между ними, по началу образования и отрыва пузырька, всплытию пузырьков из нескольких источников, всплытию пузырьков различного диаметра, коалисценции пузырьков. Фиксация движения пузырьков осуществлялась скоростной цветной камерой MotionPro, скорость записи изображения варьировалась от 500 до 2000 кадров в секунду.

Обработка полученного изображения осуществлялась по специально разработанному алгоритму на основе самых современных методов цифровой обработки изображений. В их числе: спектральный анализ и адаптивная пространственная фильтрация, морфологический анализ и сегментация, а также нелинейные преобразования полей [7]. Уменьшение шумов достигалось путем фильтрации спектрально усредненных кадров динамически формируемым адап-

тивным пространственным фильтром. Затем осуществлялась компенсация пространственной неравномерности яркости источника. Для этого производилась выборка уровня яркости окрестностей пузырьков контурным адаптивным пространственным фильтром. Резкость изображения повышалась обратной сверткой с заданной функцией размытия точки на основе алгоритма Люси-Ричардсона. После этого проводились дискриминация изображения по рассчитанному оптимальному порогу, переход к бинарным образам, их морфологический анализ и сегментация [7-9]. При цифровой обработке изображения каждому распознанному пузырьку присваивалась своя метка и записывалась полная информация об этом пузырьке, включающая координаты центра пузырька, площадь, линейные размеры, эксцентриситет, угол наклона главной оси, контур пузырька. Полученная база данных позволила не только реконструировать траектории движения любого пузырька, содержащегося в исходном кадре, и строить матрицу газосодержания, но и осуществлять 2D и 3D визуализацию движений пузырьков.

Простейший пример для случая всплывающего в покоящейся жидкости одиночного пузырька приведен на рис. 4.1, где показано исходное изображение пузырька, траектория его центра массы и теоретически вычисленная траектория, форма пузырька. На рис. 4.2 приведены расчетные поля скоростей при всплытии одиночного пузырька. В случае цепочки пузырей существенное влияние на траекторию всплытия пузыря оказывает движение предыдущего пузыря.

Начиная с некоторого расстояния между пузырьками, каждый последующий пузырек испытывает на себе воздействие гидродинамического следа от предыдущего пузыря. Это приводит к существенному размытию траекторий по ширине канала. Полная объемно-временная развертка траекторий всех пузырьков в цепочке приведена на рис.4.3. Здесь каждая кривая соответствует траектории отдельного

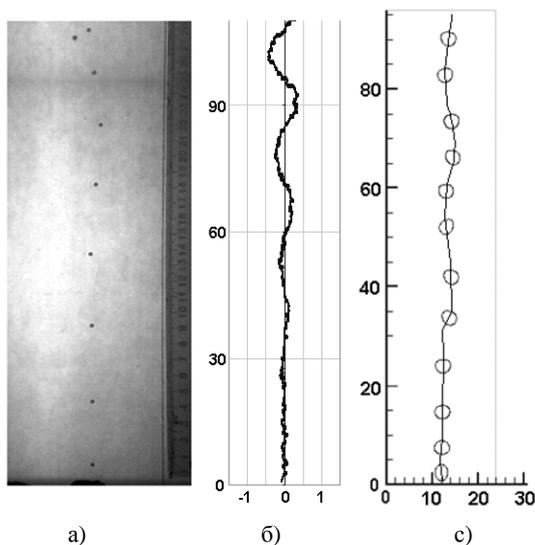


Рис. 4.1. Всплывающие в заполненном водой плоском зазоре воздушные пузырьки. Кадр исходного изображения (а), траектория (б), расчетная траектория пузырька (с)

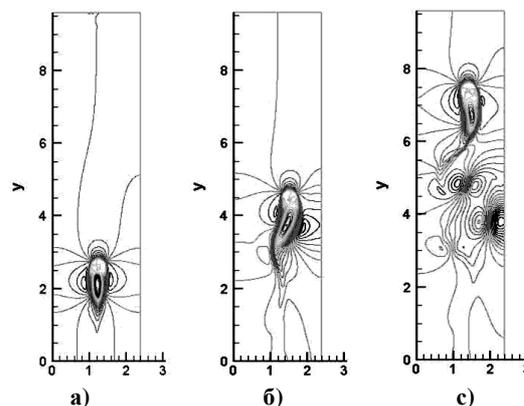


Рис. 4.2. Поле скорости вокруг всплывающего пузырька в разные моменты времени

пузырька при генерации цепочки пузырей. Отметим, что вначале все пузырьки двигаются прямолинейно с постоянной и равной скоростью. На определенном расстоянии от места генерации пузырьков их траектории теряют свою прямолинейную форму. Интересно, что, как в эксперименте, так и в расчете нет строгой определенности, в какую сторону отклоняется каждый последующий пузырек от первоначально прямолинейной траектории. Поле относительной объемной концентрации газовой фазы по высоте и ширине канала, полученное по результатам обработки изображений всех пузырьков приведено на рис. 4.4.

На рисунке это распределение приведено в сравнении с расчетом (слева), выполненным для условий данного эксперимента. Видно, что и в опытах и в расчетах наблюдается заметная дискретизация распределения газовой фазы на начальном участке всплытия пузырей, с увеличением расстояния от источника генерации пузырьков эта неравномерность сглаживается, что связано с более случайным распределением пузырьков по ширине канала.

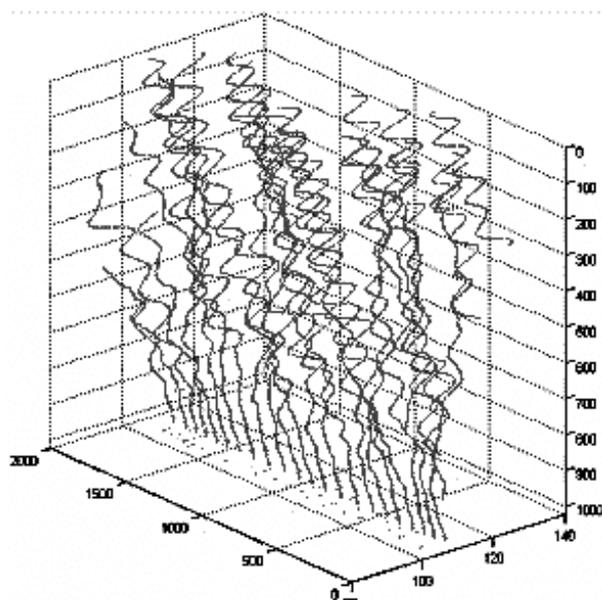


Рис.4.3. Траектории пузырьков в цепочке: высота и ширина канала в пикселях, время в миллисекундах

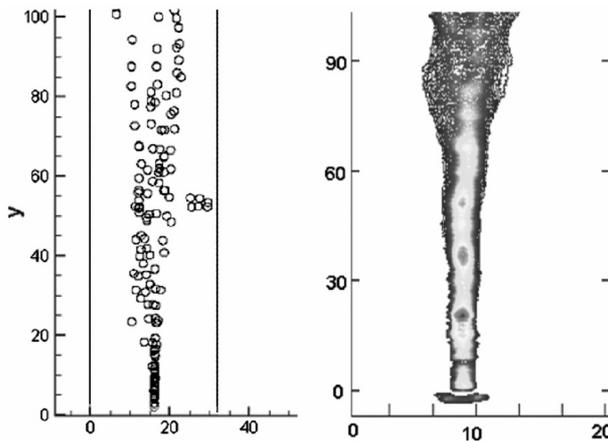


Рис. 4.4. Концентрация газовой фазы в жидкости при всплывании цепочки пузырей

Пример начала развития «пузырьковой струи» показан на рис. 4.5, где приведены исходные кадры с временным интервалом 20 мс. Пузырьковое течение не формируется сразу же после начала генерации пузырьков: первые пузыри имеют скорость всплывания даже меньше, чем последующие. Развитое пузырьковое течение возникает спустя 200 – 300 мс после начала движения пузырьков через жидкость. На рис. 4.5 справа приведены также результаты численного моделирования формирования «пузырьковой струи» в плоском канале с водой.

Приведенные примеры показывают лишь часть полученных результатов, существует детальная база данных по каждому рассмотренному случаю, а возможности разработанной методики экспериментального исследования пузырьковых течений и обработки экспериментальных данных позволяют существенно расширить эту базу.

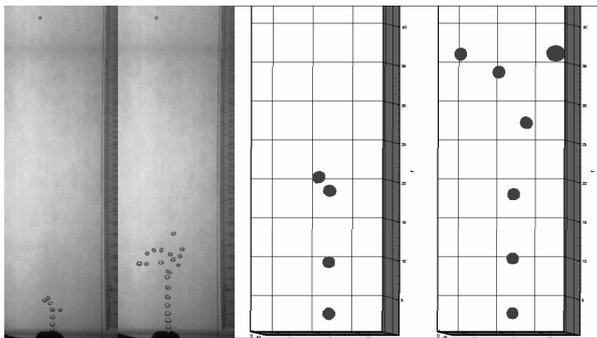


Рис.4.5. Пример формирования «пузырьковой струи»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения проблем вычислительной тепло-и гидродинамики двухфазных пузырьковых течений разработан и оттестирован эффективный трехмерный численный алгоритм.

Развитый алгоритм применяется к уравнениям тепло- и массопереноса в естественных переменных для несжимаемых и слабо сжимаемых течений при малых числах Маха.

Было проведено тестирование развитого теоретического подхода на наборе бенчмарк тестов из Journal Multiphase Science and Technology [6] и экспериментов, проводимых в ИТ СО РАН. Предварительные расчетные результаты для задач всплывающих пузырьков и капель в жидкости, полученные методом прямого численного моделирования с помощью наблюдения за траекториями и объемной фракцией, позволяют говорить об адекватном качестве соответствия расчетной модели экспериментальным данным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Churbanov A.G. and Pavlov A.N.** A pressure-based algorithm to solve the full Navier-Stokes equations at low Mach number, in *Proc. Computational Fluid Dynamics '98*, (Eds. K.D.Papailiou et al.) Wiley, Chichester, 1998. **1** (2). 894-899.
2. **Chudanov V.V., Aksenova A.E., Pervichko V.A.** Proc. of IAEA Technical Meeting on Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes for Safety Analysis of Nuclear Reactor Systems, Including Containment, University of Pisa, Italy, 11-14 November, 2002. (CD-disk, Session-7). Summary report IAEA-TECDOC-1379, 2003. P.14.
3. **Chudanov V.V., Aksenova A.E., Pervichko V.A.** 3D unified CFD approach to modeling of bubble phenomena // Proc. 11<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11) Popes' Palace Conference Center, Avignon, France, October 2-6, 2005.
4. **Chudanov V. et al.** Non-linear regularized difference schemes for multidimensional advection equations // *J. of computing mathematics and of mathematical physics*. 2001. **40**(6). 900-907.
5. **Chudanov V.V., Aksenova A.E., Pervichko V.A. et al.** Grid Office" for orthogonal grid generation with CAD for CFD calculations. TCN CAE. Lecce, Italy, October 5-8, 2005.
6. **J. Multiphase Science and Technology**. Vol. 16. Nos. 1-3. P. 1-5.
7. **Meledin V., Pavlov V., Tselodub O., Yavorsky N.** Gravity-Capillary Waves on the Surface of a Liquid Dielectric // *Doklady Physics*. 2005. Vol. 50. No. 8. P. 426-430.
8. **Meledin V., Naumov I.V., Sotnikov V.V.** Machine Vision system for noncontact weighing. Proc. ISA 2001, IMEKO Special Millennium Sessions // ISA Emerging Technologies Conference. Houston, Texas. USA. CD ISA. 2001. Vol.415.
9. **Real Time Machine Vision System for Non-contact Measurements of the Masses of Free Falling Hot Glass Drops / V. Meledin, G.V. Bakakin, I.V. Naumov et al // Current Research on Holography and Interferometric Methods for Measurement of Object Properties: Selected Paper of SPIE**. 2000-2002. Vol. 5134. P. 139-149.