УДК 532.546

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВСПЛЫТИЯ ГАЗОВЫХ СНАРЯДОВ В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ С ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ

Храмцов Д.П., Некрасов Д.А., Покусаев Б.Г., Кондрашов Н.П.

Московский Государственный Машиностроительный Университет, Москва, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-08-00368-а, 12-08-00734-а, 12-08-31243 мол_а), а также Минобрнауки проект 7.7787.2013г.

АННОТАЦИЯ

Выполнены экспериментальные исследования гидродинамики свободно всплывающих газовых снарядов в наклонных трубах в системах газ–жидкость и газ–жидкость-твердые частицы. В качестве жидкой фазы использовались вода и этанол, а в качестве твёрдой – стеклянные шарики диаметром от 3 до 20 мм. Показано, что скорость всплытия в зависимости от угла наклона немонотонна. При добавлении твёрдых частиц максимумы скоростей смещаются в область больших углов наклона трубки относительно горизонта. Наличие зернистого слоя может приводить как к увеличению скорости всплытия, так и к её уменьшению в зависимости от диаметра засыпки. Малый диаметр засыпки приводит к запиранию снаряда. Разработана расчётная модель с использованием решёточных уравнений Больцмана и применён параллельный алгоритм, реализованный на графическом процессоре nVidia Tesla C2075. Результаты моделирования согласуются с данными, полученными в ходе экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики газожидкостных потоков в зернистом слое являются актуальными, поскольку такие системы реализуются, например, в нефтедобывающей отрасли, химической и биотехнологиях, теплоэнергетике, а также медицине. Данная работа посвящена изучению снарядного режима движения пузырей, как наиболее распространённому при малых относительных скоростях фаз. Проблемы динамики газовых снарядов изучались как экспериментально [1], так и теоретически [2,3]. При этом большое количество вопросов, связанных с гидродинамикой и массопереносом в зернистом слое остаются открытыми. Стоит также отметить, что работы, посвящённые экспериментальному исследованию и моделированию гидродинамики многофазных систем в наклонных трубах, практически отсутствуют. Одними из немногих работ в этой области являются экспериментальные исследования [4,5]. В предлагаемой работе представлены новые экспериментальные данные и результаты моделирования скорости всплытия газовых пузырей в наклонных трубах в присутствии зернистого слоя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для экспериментального исследования динамики газовых снарядов использовалась установка, изображённая на рис.1. Стенд представлял собой рабочий участок с системой подсветки, закреплённой на штативе с возможностью изменения угла наклона (в экспериментах шаг составлял 10°). Перед началом опыта вся система заполняется жидкостью (вода или этанол) и твёрдой фазой (стеклянные шарики диаметром 3, 5, 7, 10 и 20 мм). Газ (воздух) необходимого объёма вводился в рабочий участок с помощью шприца. В работе представлены результаты для трубки диаметром 24 мм и длиной участка измерения скорости 400 мм. Прохождение пузырём контрольного участка фиксируется на видеокамеру, установленную на гибком штативе, что позволяет стабилизировать по-

лучаемое изображение и даёт возможность снимать прохождение пузыря в разных плоскостях.

Перед проведением опыта трубка устанавливается на заданный угол. Затем в шланг с помощью шприца вводится необходимый объём газа (в данной работе 20 мл). Далее включается видеозапись, и газовый снаряд запускается в основную часть трубки. Для измерения скорости всплытия фиксировалось время прохождения начальной и конечной меток. После выполнения эксперимента проводилась раскадровка записи и рассчитывалась скорость движения по формуле (1).

$$V=L_{уч}/(t_2 - t_1) \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время прохождения начальной и конечной меток соотвественно, $L_{уч}$ – длина рабочего участка трубки.

По результатам экспериментов строились графики в системе координат угол наклона – скорость. После проведения всех серий экспериментов определялись зависимости максимальных скоростей всплытия от диаметра шаровой засыпки.

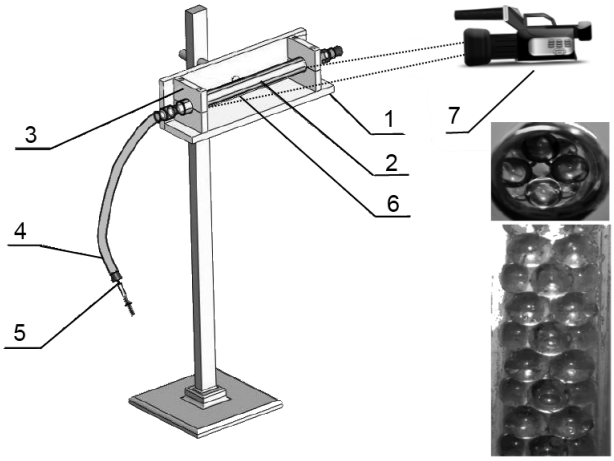

Рис.1 Экспериментальный стенд для измерения скорости всплытия газовых снарядов в наклонных трубках: 1 – штатив; 2 – стеклянная трубка; 3 – зажим; 4 – прозрачный резиновый шланг; 5 – шприц; 6 – подсветка, 7 – видеокамера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам экспериментов установлено, что скорости всплытия газовых пузырей во всех случаях носят экстремальный характер. При этом в чистой жидкости скорость всплытия достигает максимума при углах наклона 30 – 40°. Добавление шаровой засыпки приводит к смещению максимумов скоростей в сторону больших углов ~ 50 - 60° (рис. 2). Также подробный анализ видеозаписей позволил установить, что скорость всплытия пузыря зависит от его объёма, а следовательно, от профиля сечения в плоскости, перпендикулярной направлению движения. Установлено, что при определённом соотношении площади, занимаемой пузырём к площади жидкости, скорость перестаёт зависеть от объёма. Такой случай можно рассматривать как слив жидкости из трубки бесконечной длины. Данные по скоростям всплытия газовых снарядов хорошо согласуются с результатами, полученными в [6]. Таким образом, существует взаимосвязь между объёмом газового снаряда, диаметром трубки и скоростью всплытия. Опыты с шариками разного диаметра показали также, что наличие засыпки приводит как к увеличению скорости всплытия относительно чистой жидкости, так и к уменьшению в зависимости от диаметра зерна.

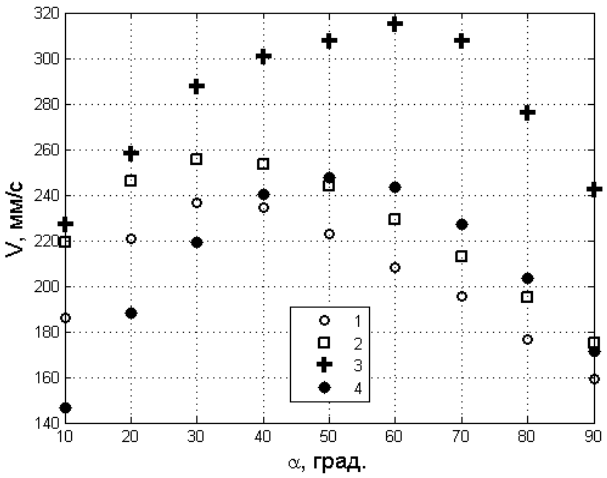

Рис.2 Скорость всплытия газового снаряда в зависимости от угла наклона: диаметр трубки – 24 мм, 1 – вода без засыпки, 2 – этанол без засыпки, 3 – вода в зернистом слое d=5мм, 4 – этанол в зернистом слое d=5мм.

Как видно из рис.2, заполнение трубки засыпкой d=5 мм приводит к тому, что скорость всплытия в воде становится выше, чем в случае без засыпки. При этом в случае этанола на малых углах скорость всплытия снаряда становится ниже, а на больших выше. Этот эффект объясняется, по-видимому, возрастающим влиянием капиллярных сил [7].

С увеличением диаметра шаровой засыпки наблюдается уменьшение скоростей всплытия как для воды, так и этанола. При диаметрах засыпки 10 и 20 мм скорость всплытия газового снаряда в этаноле становится выше, чем в воде (рис. 3). При малых диаметрах засыпки, как для воды, так и для этанола наблюдается резкое уменьшение скорости всплытия снаряда, что в итоге приводит к эффекту запирания.

Экстремальный вид зависимостей скорости всплытия от угла наклона может быть объяснён изменением формы газового снаряда. При углах наклона, близких к вертикальному положению, газовый снаряд заполняет большую часть сечения трубки, что создаёт большое гидравлическое сопротивление. Дальнейший наклон приводит к тому, что форма снаряда становится более обтекаемой и скорость всплытия возрастает. Однако при дальнейшем уменьшении угла наклона сила архимеда в направлении движения становится мала, что снова приводит к уменьшению скорости всплытия.

Смещение максимумов скоростей при наличии твёрдой фазы может быть объяснено влиянием засыпки на форму газового снаряда. При малых диаметрах засыпки на скорость всплытия также оказывают влияние капиллярные силы. При диаметрах засыпки порядка 4 мм наблюдается запирание газового снаряда при любых наклонах трубки, а также при её вертикальном положении.

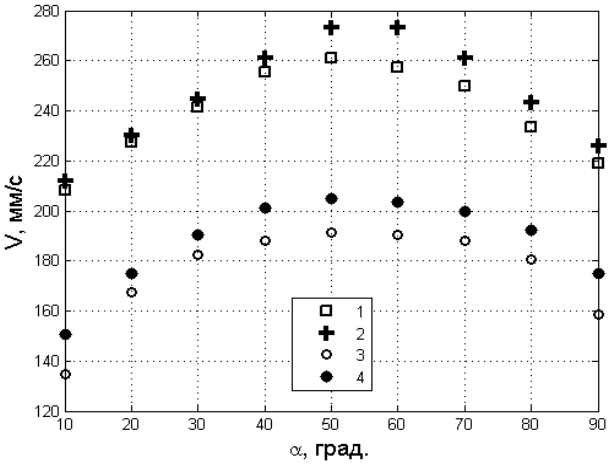

Рис.3 Скорость всплытия газового снаряда в зависимости от угла наклона в зернистом слое с шариками разного диаметра: 1 – вода в зернистом слое d=10 мм, 2 – этанол в зернистом слое, d=10 мм, 3 - вода в зернистом слое d=20 мм, 4 – этанол в зернистом слое d=20 мм.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Расчётная модель основана на методе решёточных уравнений Больцмана, который широко применяется при моделировании задач гидродинамики. Метод основан на представлении жидкости как совокупности псевдочастиц, каждая из которых имеет определённое распределение скоростей в трёхмерном пространстве. В процессе моделирования производится расчёт движения и столкновения частиц. Для расчёта столкновений применяется оператор Бхатангара-Гросса-Крука. В данной работе использовалась дискретная модель скоростей D3Q19, имеющая 19 векторов скорости в 3 пространственных измерениях. Метод подробно описан в работе [8].

Взаимодействие газообразной и жидкой фазы учитывается с помощью подхода, предложенного Shan X., Chen H. [9], который заключается в исключении разрыва в плотности вещества на границе раздела двух сред, для чего вводится пограничный слой между газообразной и жидкой фазой.

Благодаря тому, что метод решёточных уравнений Больцмана предполагает проведение вычислений в локальных узлах расчётной области, становится возможным разработка на его основе эффективных параллельных алгоритмов. При этом наибольший выигрыш в применении параллельных вычислений позволяет достичь использование графических процессоров, которые имеют большое количество ядер, что позволяет проводить параллельные вычисления быстрее, чем на многоядерных процессорах. Используемый при моделировании графический процессор nVidia Tesla C2075 имеет 448 ядер, тогда

как процессор семейства Intel Xeon E7 имеет только 10. Эффективность использования графического процессора для моделирования двухфазных систем методом решёточных уравнений Больцмана показана в [10]. Для исследования динамики всплытия газового снаряда использовалась вычислительная система с центральным процессором Intel Xeon E5-1620 и 32 Гб оперативной памяти. Моделирование проводилось на графическом процессоре nVidia Tesla C2075. Пиковая производительность графического процессора составляет 1,03 ТФлоп. Алгоритм был реализован на специальном диалекте языка Си, предназначенного для программирования видеокарт – CUDA C.

Расчётная область представляет собой цилиндр, имеющий свободное пространство в начале для стабилизации скорости газового снаряда и в конце для приёма снаряда после прохождения через зернистый слой. На газовый снаряд оказывает воздействие сила Архимеда, которая компенсируется силой тяжести. Также на скорость всплытия оказывает влияние гидравлическое сопротивление среды (рис. 4). При малых диаметрах засыпки также становится ощутимым влияние капиллярных сил. В качестве входных параметров задаётся угол наклона трубки и диаметр зерна засыпки. Размер расчётной сетки составлял $5 \cdot 10^6$ узлов. Геометрия расчётной области задаётся трёхмерным массивом, определяющим плотность вещества в каждом узле расчётной сетки. Узлам, соотвествующим твёрдой фазе, присваивается значение 0. Метод решёточных уравнений Больцмана позволяет единообразно описывать жидкую и газообразную фазы, поэтому разделение на жидкость и газ осуществляется заданием соотвествующих плотностей для воздуха и воды.

Газовый снаряд задаётся как область в форме прямоугольного параллелепипеда, имеющая плотность воздуха. В течение нескольких десятков итераций после начала процесса моделирования исходная область с воздухом преобразуется в форму газового снаряда, наблюдаемого в эксперименте.

Твёрдая фаза формируется с помощью подпрограммы, которая проводит укладку шаров в цилиндре. Работа подпрограммы заключается в том, чтобы обозначить определённые узлы сетки, как узлы, содержащие твёрдую фазу. В результате получившаяся совокупность узлов с твёрдой фазой формирует геометрию, соотвествующую шаровой засыпке. В качестве входных данных подпрограмма принимает диаметр зерна засыпки и тип укладки.

Массив данных, хранящий информацию о плотности вещества, модифицируется в процессе моделирования движения газового снаряда. Также формируется массив с данными о распределении скоростей в каждом узле. Промежуточные результаты сохраняются на жёсткий диск в формате VTK. Сохранение данных в подобном формате позволяет провести последующий визуальный анализ и обработку данных с помощью специализированного программного обеспечения для визуализации ParaView.

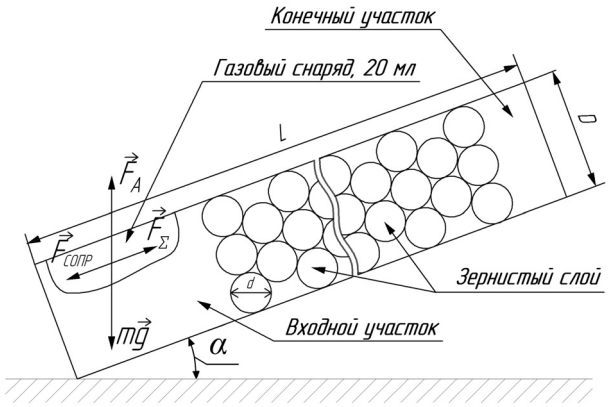

Рис.4 Расчётная область.

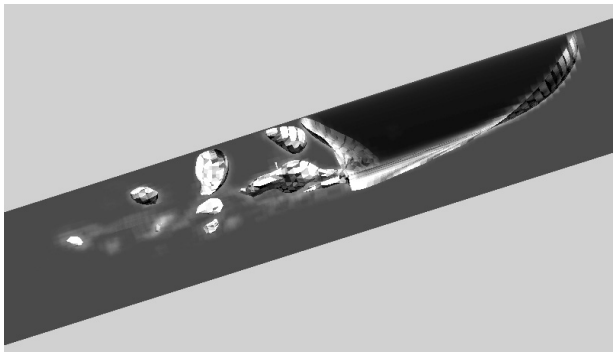

Рис.5 Результат трёхмерного моделирования движения газового снаряда в наклонной трубке, угол наклона: 40°, начальный объём пузыря – 20 мл, рабочее вещество: вода.

Проведено трёхмерное моделирование всплытия газового снаряда в двухфазной системе жидкость-газ и трёхфазной системе жидкость-газ-твёрдые частицы. Результат моделирования газового снаряда при дви-

жении в наклонной трубке показан на рис. 5. Моделировались случаи засыпки с диаметрами шариков от 4 до 20 мм с шагом 0.5 мм, при этом угол наклона трубки менялся от 10° до 90° с шагом 10°. Шаги наклона трубки и диаметра зерна засыпки выбирались из соображений оптимизиации затрат машинного времени и получения при этом достоверных результатов.

На рис. 6 показаны зависимости максимальных скоростей всплытия газового снаряда от диаметра шариков для воды и этанола, полученные экспериментально. Для воды также показана зависимость, построенная по результатам компьютерного моделирования.

Согласно экспериментальным данным значения максимальных скоростей для воды с увеличением диаметра шариков монотонно убывают. Проведённое моделирование подтверждает экспериментальные результаты.

С помощью математического моделирования также были получены данные для скоростей газового снаряда при диаметрах засыпки 4, 4.25, 4.5 и 4.75 мм. При данных значениях наблюдается спад скорости всплытия с уменьшением диаметра шариков. При меньших размерах наблюдается запирание снаряда. При движении газового пузыря в этаноле скорость всплытия сначала монотонно возрастает с увеличением диаметра шариков и достигает максимума при d=10 мм. При дальнейшем увеличении диаметра шаровой засыпки скорость всплытия мотонно уменьшается.

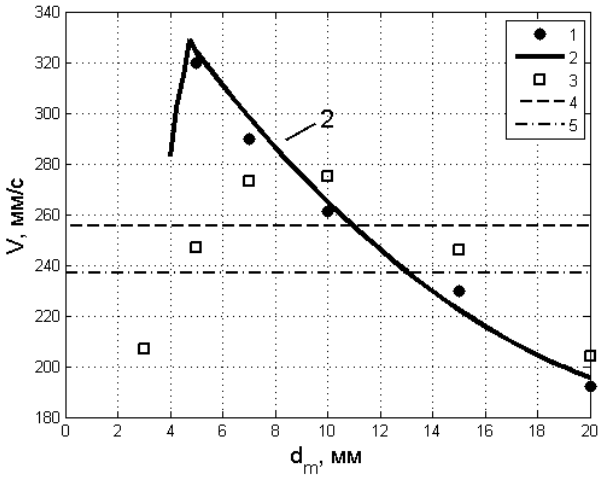

Рис.6 Максимальные значения скоростей всплытия газового снаряда в зернистом слое: 1 – вода эксперимент, 2 – вода моделирование, 3 – этанол эксперимент, 4 – максимальная скорость всплытия в чистом этаноле, 5 - максимальная скорость всплытия в чистой воде.

ВЫВОДЫ

Исследование гидродинамики всплытия газового пузыря в наклонной трубке показало, что в двухфазной системе газ-жидкость скорость всплытия газового снаряда не зависит от объёма газа при определённом соотношении площади, занимаемой пузырём к площади жидкости в плоскости, перпендикулярной направлению движения. Добавление засыпки приводит к смещению максимума скорости в сторону больших углов. При этом скорость всплытия может быть как выше, чем в чистой жидкости (для воды d=5-12 мм, а для этанола d=5-14 мм), так и ниже (для воды d=12-20 мм, а для этанола d=14-20 мм).

Экспериментально полученные максимальные значения скоростей всплытия газового снаряда для воды монотонно убывают с ростом диаметра зерна засыпки. Моделирование показало, что при диаметрах менее 5 мм начинается резкий спад скорости с полным газодинамическим запиранием при диаметрах засыпки меньше 4 мм.

Применение метода решёточных уравнений Больцама и технологий параллельного программирования на базе графического процессора позволило проводить вычислительные эксперименты по моделированию трёхмерных задач гидрогазодинамики при наличии твёрдой, жидкой и газообразной фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bercic G., Pintar A. The role of gas bubbles and liquid slug lengths on mass transport in the Taylor flow through capillaries // Chem. Eng. Sci. 1997. vol.52. pp. 3709-3719.
2. Taha T., Cui Z. F. CFD modelling of slug flow in vertical tubes // Chem. Eng. Sci. 2006. V.61. P. 676.
3. Абиев Р.Ш.Моделирование гидроди-

намики снарядного режима течения газожидкостной системы в капиллярах // ТОХТ. 2008. Т. 42. № 2. С.115. Abyev R.S. Modelirovanie gidrodinamiki snaryadnogo rezhima techeniya gazozhidkostnoj sistemy v kapillyarax [Modelling of gas-liquid slug flow regime in capillaries] // Theor. Found. of Chem. Eng. 2008. vol. 42. № 2. P.115.

4. Покусаев Б.Г., Зайцев А.А., Зайцев В.А. Процессы переноса в снарядном режиме течения трёхфазных сред // ТОХТ. 1999. Т. 33. № 6. С. 595 Pokusaev B.G., Zajcev A.A., Zajcev V.A. Processy perenosa v snaryadnom rezhime techeniya tryohfaznykh sred [Mass transfer in slug flow regime for three-phase systems] // Theor. Found. of Chem. Eng. 1999. vol. 33. № 6. P.595.
5. Покусаев Б.Г. Процессы переноса в многофазной среде//ТОХТ, 2007. Т. 41. №1. С.35. Pokusaev B.G. Processy perenosa v mnogofaznoj srede [Mess transfer in multiphase flow] // Theor. Found. of Chem. Eng, 2007. vol. 41., №1. P.35.
6. Серавин А.С., Карпенко А.С. Измерение скорости движения газовых снарядов в наклонных трубах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 11. с.4 – 5. Seravin A.S., Karpenko A.S. Izmerenie skorosti dvizheniya gazovyx snaryadov v naklonnyx trubax [Slug flow speed measurements in inclined pipes] // Chem. Petrol Eng.2010, №11, pp.4-5.
7. Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Карлов С.П., Ермолаев В.С. Скорость движения газового снаряда в наклонных трубах // ТОХТ. 2011. Т. 45. № 5. С. 550 Pokusaev B.G., Kazenin D.A., Karlov S.P., Ermolaev V.S. Skorost dvizheniya gazovogo snaryada v naklonnykh trubah [Slug flow speed in inclined pipes] // Theor. Found. of Chem. Eng. 2011. vol. 45. №5. P. 550
8. Chen S., Doolen G.D. Lattice Boltzmann method for fluid flow // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. V. 30. P. 329–364.
9. Shan X., Chen H. Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation // Phys. Rev. E. 1994. V. 49, N 4. P. 2941–2948.
10. Куперштох А.Л. Трехмерное моделирование двухфазных систем типа жидкость-пар методом решеточных уравнений Больцмана на GPU // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т.13 С.130 - 138. Kupershtokh A.L. Trekhmernoe modelirovanie dvuhfaznykh sistem tipa zhidkost-par metodom reshetochnykh uravnenij bolcmana na GPU [Three-dimensional simulations of two-phase liquid-vapor systems on GPU using the lattice Boltzmann method] // Comp. Methods Prog. 2012. vol.13 pp.130 – 138.

© Храмцов Д.П., Некрасов Д.А., Покусаев Б.Г., Кондрашов Н.П.