

- Dynamics of transition processes and structure formation in critical heat-mass transfer regimes during liquid boiling and cavitation // Journal of Engineering Thermophysics. 2009. Т. 18. № 1. с. 20-38.
6. Хауф В, Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир. 1973, 240 с.
7. Покусаев Б.Г., Карлов С.П., Шрейбер И. Иммерсионная томография газожидкостной среды в зернистом слое. // Теор. основы хим. технологии. 2004. Т. 38. № 1. с. 3.
8. Казенин Д.А., Карлов С.П., Покусаев Б.Г., Скочилова Ю.Н. Некоторые современные оптические методы диагностики процессов в многофазных зернистых средах. // Теор. основы хим. технологии. 2007. Т. 41. № 6. с. 602.
9. Meissner S., Herold J., Kirsten L., Schneider C., Koch E. 3D optical coherence tomography as new tool for microscopic investigations of nucleate boiling on heated surfaces // International Journal of Heat and Mass Transfer 2012. V.55. P. 5565.

Гидродинамика свободно всплывающих газовых снарядов в наклонных трубах с зернистой насадкой

чл.-корр. РАН Покусаев Б.Г., к.т.н. Некрасов Д.А., Карпенко А.С., Храмов Д.П.
Университет машиностроения
artem-karpenko@list.ru

Аннотация. Выполнены экспериментальные исследования гидродинамики свободно всплывающих газовых снарядов в наклонных трубах в системах (газ–жидкость) и (газ–жидкость–твердые частицы). Рабочими веществами являлись вода и этанол. Показано, что скорость всплытия в зависимости от угла наклона имеет немонотонный характер, а максимумы скоростей при добавлении твердой фазы смещаются в сторону больших углов наклона трубки относительно горизонта.

Ключевые слова: *газовый снаряд, гидродинамика многофазных систем.*

Проблема исследования микроструктуры и динамики двухфазных газожидкостных потоков в зернистых и пористых средах остается актуальной для целого ряда отраслей современной техники, таких, как химические и биотехнологии, теплоэнергетика, нефте- и газодобыча. Одной из таких проблем является задача гидродинамики движения газовых снарядов в наклонных трубах. Не смотря на довольно значительное количество работ в этой области, начиная с ранних экспериментальных [1] и заканчивая целым рядом современных [2, 3], остается много неисследованных вопросов, связанных с динамикой движения и процессами массопереноса при свободном и вынужденном всплытии газовых снарядов в засыпках. Одними из немногих работ в этой области являются экспериментальные работы [4, 5], в которых представлены результаты по скорости всплытия как одиночных пузырьков, так и газовых снарядов в вертикальных трубах. При этом работы по исследованию гидродинамических процессов в системе газ-жидкость-твердые частицы в наклонных трубах практически отсутствуют.

Экспериментальный стенд для измерения скорости всплытия газовых пузырей

Скорость всплытия газовых пузырей исследовалась на экспериментальном стенде, показанном на рисунке 1(а). Стенд состоит из вращающегося на 360° штатива 1, установленного на подшипнике 2. Рабочий участок 3 крепится с двух сторон зажимами 4. На нижнем конце трубки закреплен U-образный резиновый шланг 5. Шприц 6 предназначен для подачи газа определенного объема. На расстоянии $\approx 0,5 \div 0,7$ м установлена видеокамера в нормальной плоскости по отношению к штативу. На трубку нанесена измерительная шкала с ценой деления 10 см. Подсветка обеспечивается матовыми светодиодными экранами 7, расположенными в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В качестве рабочего вещества использовались дистиллированная вода и этиловый спирт 96%. Эксперименты проводились на трубах с

внутренним диаметром 11,8 мм и 24 мм. В качестве элементов засыпки использовались стеклянные шарики с диаметром 5, 7, 10 мм. На рисунке 1(б) изображена укладка засыпки из стеклянных шариков диаметром 10 мм в стеклянной трубке диаметром 24 мм.

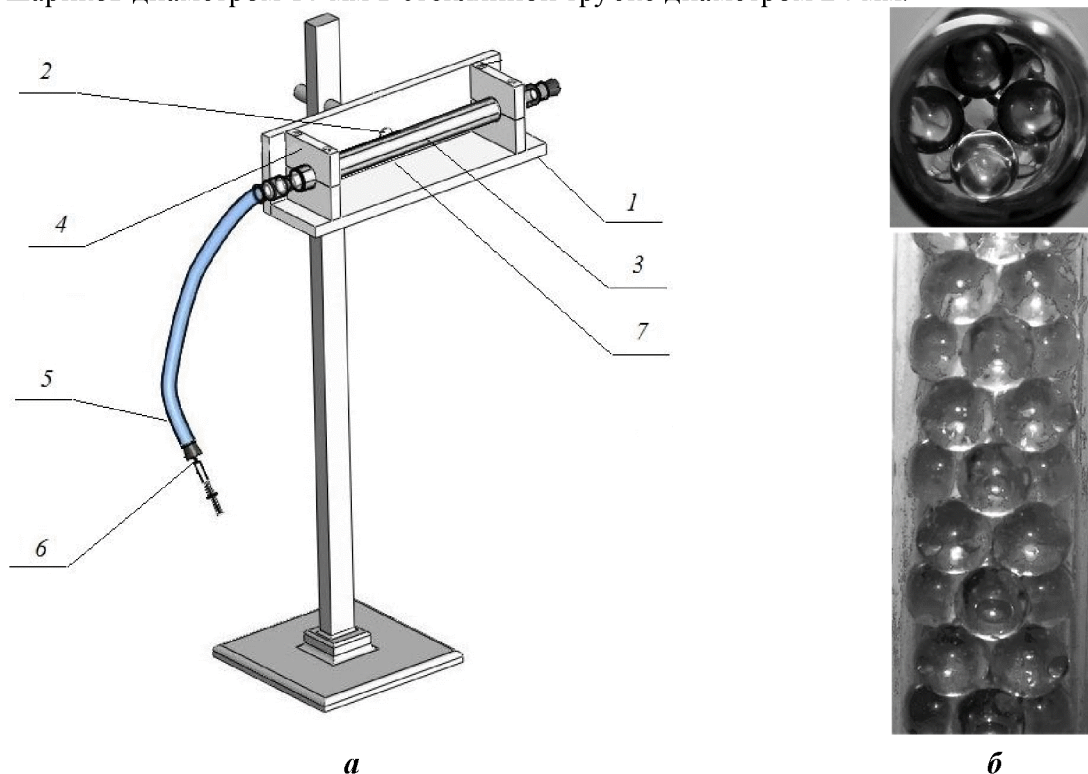


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для измерения скорости всплытия газовых снарядов в наклонных трубках: 1 – штатив; 2 – подшипник; 3 – стеклянная трубка; 4 – зажим; 5 – прозрачный резиновый шланг; 6 – шприц; 7 – подсветка

Методика измерений

Для измерения скорости всплытия газового снаряда использовался времяпролетный метод, суть которого заключается в следующем: на трубку наносятся деления с определенным шагом, при прохождении каждого деления фиксируется время. После чего методом компьютерной обработки с раскадровкой рассчитывается скорость движения снаряда.

Шаг по углу наклона трубки относительно горизонта составляет 10° . В трубке $d = 11,8$ мм объем снаряда составлял 1 и 5 см^3 , а в трубке $d = 24$ мм – 10 и 20 см^3 . Длина измеряемого участка – 40 см.

Порядок проведения эксперимента

Перед опытом трубка заполняется жидкостью и устанавливается на нужный угол наклона. После чего в U – образный входной участок при помощи шприца вводится необходимый объем газа. Далее видеокамера включается в режим записи и снаряд запускается в основную часть трубки. Для стабилизации скорости предусмотрен входной участок длиной порядка 15 см. При прохождении снарядом начальной и конечной меток фиксируется время t_1 и t_2 . После чего при помощи компьютерной обработки видеофайла вычисляется экспериментальная скорость по формуле:

$$V = L_{\text{уч}} / (t_2 - t_1) . \quad (1)$$

По полученным результатам строятся графики в системе координат угол наклона скорость.

Экспериментальные результаты

На рисунке 2 приведены результаты по скорости всплытия газовых пузырей различного объема в отсутствии засыпки. Из графиков видно, что зависимости скорости от угла наклона

имеют экстремальный характер, при этом максимальные значения как для воды, так и этанола приходятся на угол $\sim 30 \div 40$ градусов. Показано также, что скорость зависит и от объема пузыря для обеих жидкостей. Однако, когда сечения пузыря и трубки в плоскости перпендикулярной направлению движения начинают совпадать, дальнейшее увеличение объема пузыря не приводит к изменению скорости при прочих равных условиях и задачу можно рассматривать, как слив жидкости из трубы бесконечно большой длины. Данные по скоростям подъема хорошо соответствуют качественно и количественно результатам, полученным в [1, 6] для данного диапазона диаметров труб.

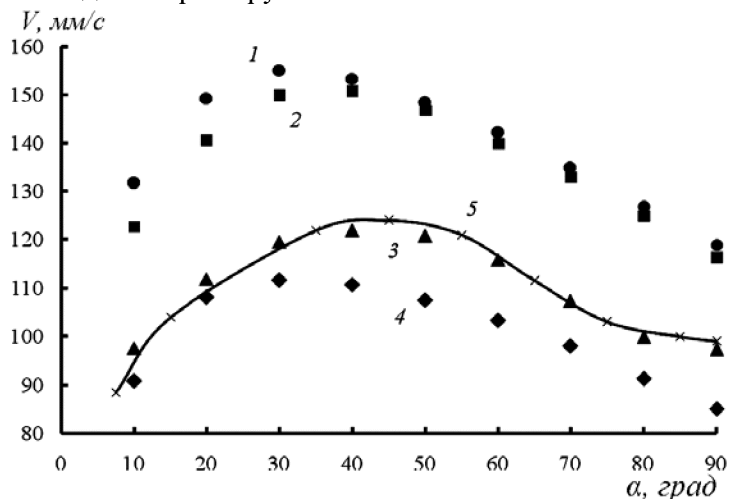


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость скорости всплытия газового снаряда от угла наклона трубки диаметром 11,8 мм: 1 – этанол, пузырь 5 мл; 2 – этанол, пузырь 1 мл; 3 – вода, пузырь 5 мл; 4 – вода, пузырь 1 мл; точки – эксперимент, кривая – расчет по формуле (2)

На рисунке 2 представлены также расчетные значения скорости всплытия, полученные по следующей методике. Скорость рассчитывалась по представленной в [7] формуле:

$$V = 0,4 \cdot \frac{d}{2R \cdot (1 + B \cdot \Sigma \cdot \sin \alpha^{0,5})} \cdot \sqrt{g \cdot d \cdot \sin \alpha}, \quad (2)$$

где R – радиус кривизны мм; B – константа ($B = 25$); α – угол наклона между осью трубы и горизонтом, град; d – внутренний диаметр трубы, мм; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\Sigma = \sigma / \Delta \rho \cdot g \cdot d^2$ – безразмерный параметр.

Для определения кривизны поверхности снаряда, всплывающего в наклонных трубах, использовались результаты цифровой видео- и фотосъемок. Съемка проводилась сразу в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (главные нормальные сечения канала). Основные измерения кривизны проводились в трубе диаметром 11,8 мм. Кривизна поверхности определялась во всех точках поверхности раздела фаз однако, для дальнейшего анализа использовалось усреднённое значение кривизны в окрестности вершины пузыря — критической точки. Это связано с тем, что кривизна в окрестности критической точки наиболее полно отражает изменение формы снаряда в зависимости от угла наклона и диаметра канала, а также свойств жидкой и газовой фаз. Кривизна поверхности пузыря в окрестности критической точки определяется как средняя кривизна \tilde{k}_* :

$$\tilde{k}_* = (k_1 + k_2) / 2 = (1/R_1 + 1/R_2) / 2, \quad (3)$$

где: R_1, R_2 – главные радиусы кривизны (k_1, k_2 – кривизна линий сечения поверхности плоскостями главных нормальных сечений xy и xz , соответственно).

Кривизна линий сечения поверхности снаряда плоскостями главных нормальных сече-

ний равна:

$$k(t) = \left(\frac{dx(t)}{dt} \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} - \frac{dy(t)}{dt} \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} \right) / \left[\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2 \right]^{3/2}, \quad (4)$$

где: $x(t)$ и $y(t)$ – параметрические функции, t – параметр.

В настоящей работе для описания поверхности пузыря используются неравномерные рациональные билинейный сплайны (NURBS), которые хорошо зарекомендовали себя для описания сложных кривых и поверхностей [8].

Кроме того, в приближении эллиптичности поверхности снаряда в его поперечном сечении, программа позволяет восстановить его трёхмерную геометрию. В качестве примера на рисунке 3 представлена геометрия пузыря, всплывающего в трубе диаметром 24 мм, наклонённым под углом 20 градусов. Здесь же точками показан экспериментальный контур головки пузыря в плоскости x - y .

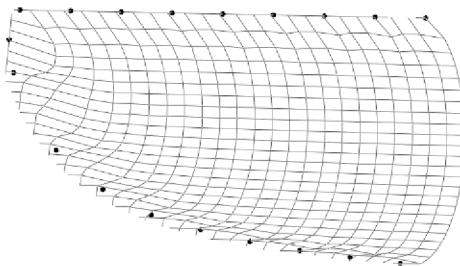


Рисунок 3 – Трёхмерная геометрия снаряда в наклонном канале, $d = 11,8$ мм, $\alpha = 20$ градусов; точки – эксперимент, плоскость $x - y$

На рисунке 4 приведены экспериментальные значения по скоростям в зависимости от угла для трубки с внутренним диаметром 24 мм. Из рисунка видно, что порядок скоростей выше, чем для трубки $d = 11,8$ мм. Заметим также, что вклад капиллярных сил здесь заметно меньше.

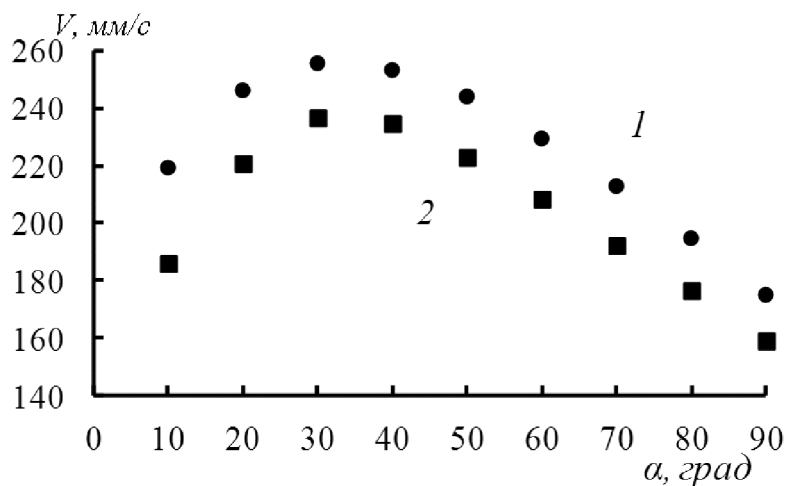


Рисунок 4 – Скорость всплытия газового снаряда в зависимости от угла наклона: диаметр трубки – 24 мм, рабочее вещество: 1– этанол; 2 – вода

На рисунке 5 представлены экспериментальные результаты скорости всплытия газовых снарядов при различных углах наклона трубки диаметром 24 мм относительно горизонта в присутствии твердой фазы (стеклянные шарики диаметром 5 мм).

Видно, что характер зависимости скорости от угла наклона трубки так же, как в системе газ-жидкость, имеет немонотонный вид. Однако максимум скорости смещается в сторону больших углов $\sim 60-70^\circ$. Важным результатом является также то, что с добавлением твердой фазы, скорость всплытия газового снаряда в воде становится выше, чем в этаноле.

По-видимому, это означает возрастающую роль капиллярных сил. Влияние капиллярных чисел в двухфазных системах достаточно хорошо разобрано в [7], там же выдвинуты гипотезы, объясняющие такой характер зависимости скорости от угла наклона. Основная идея в [7] состоит в том, что с изменением угла наклона трубки вместе со скоростью всплытия газовый снаряд меняет свою форму.

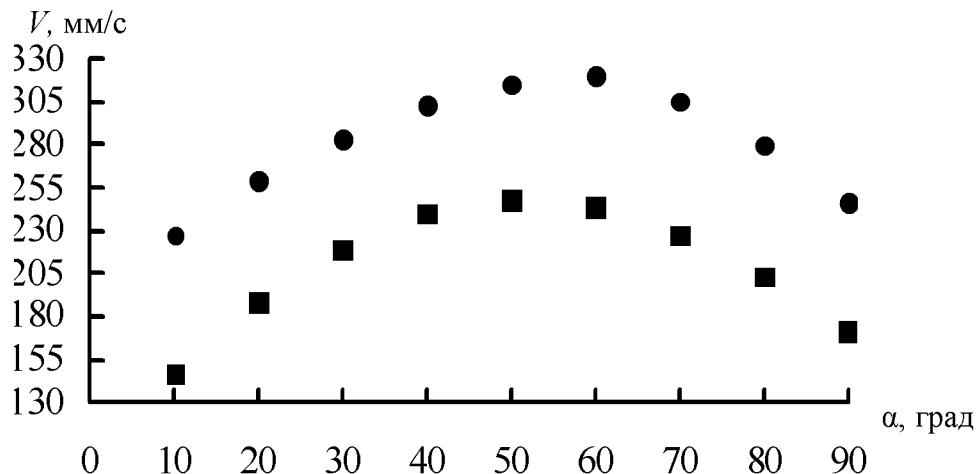


Рисунок 5 – Скорость всплытия газового снаряда в зависимости от угла наклона в зернистом слое: диаметр трубки – 24 мм, рабочее вещество: 1 – вода; 2– этанол; диаметр шариков 5 мм

На рисунках 6 и 7 приведены экспериментальные значения скоростей подъема в присутствии шариков диаметром 7 и 10 мм соответственно.

Из рисунка 6 видно, что, как и на предыдущем графике, скорость всплытия газового пузыря в воде выше, чем в этаноле.

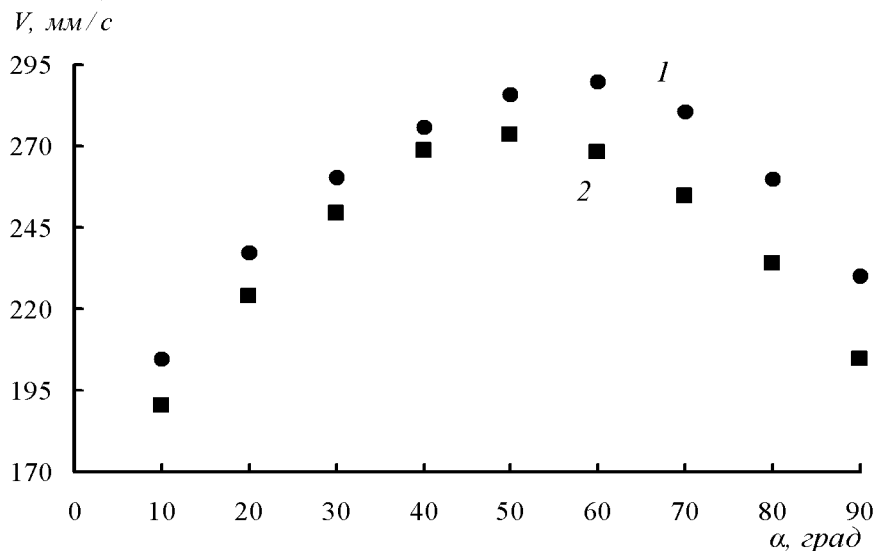


Рисунок 6 – Скорость всплытия газового снаряда в зависимости от угла наклона в зернистом слое: диаметр трубки – 24 мм, рабочее вещество: 1 – вода; 2– этанол; диаметр шариков 7 мм

Приведенные на рисунке 7 данные для диаметра засыпки 10 мм показывают, что значения скорости всплытия в этаноле становятся выше, чем в воде.

Из рисунка 8 видно, что значения максимальных скоростей в зависимости от диаметра шариков для воды монотонно убывают, и при этом для этанола значения скорости имеют максимум в районе $d_{ш} = 10$ мм, что объясняется различием физических свойств.

Выявленная особенность имеет важную роль для дальнейшего моделирования процессов абсорбции в системах такого рода.

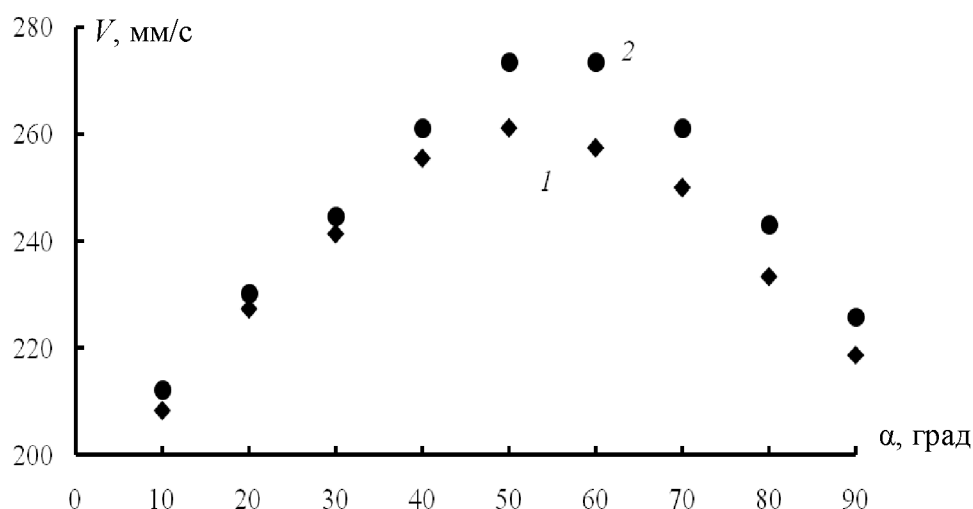


Рисунок 7 – Скорость всплытия газового снаряда в зависимости от угла наклона в зернистом слое: диаметр трубки – 24 мм, рабочее вещество: 1 – вода; 2 – этанол; диаметр шариков 10 мм

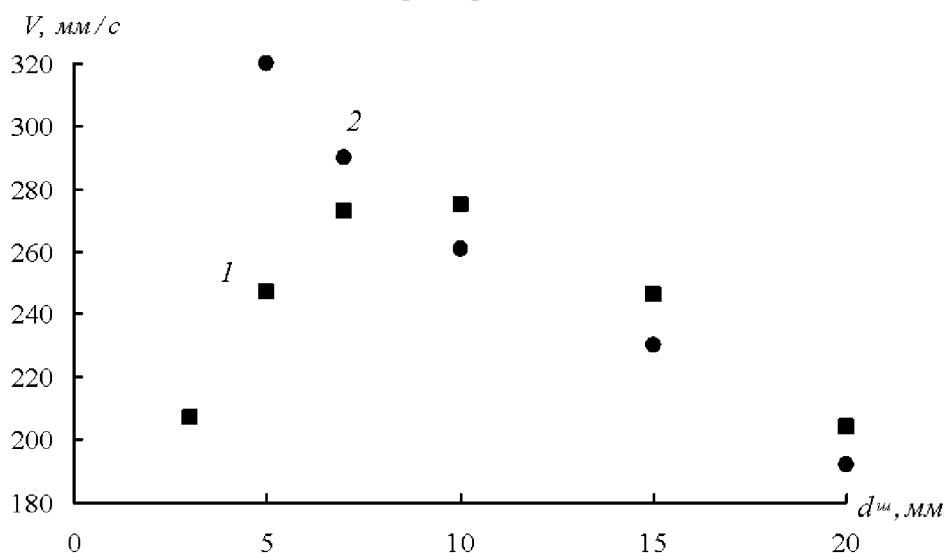


Рисунок 8 – Максимальные значения скоростей газожидкостного потока в зернистой среде. Диаметр трубки – 24 мм. Рабочее вещество: 1 – этанол; 2 – вода

Выводы

Исследована гидродинамика всплытия газового пузыря в наклонных трубах различного диаметра. Показано, что в системе (газ-жидкость) скорость всплытия газового снаряда не зависит от объема газа с момента, когда снаряд заполняет все сечение трубки. Видно, что в системе (газ-жидкость-твердые частицы) скорость выше, чем в системе (газ-жидкость). Выявлено также, что максимум скорости в присутствии засыпки смещается в сторону больших углов. Скорость всплытия газового снаряда в двухфазной системе при использовании этанола в качестве рабочего вещества выше, чем при использовании дистиллированной воды. В трехфазных системах эта закономерность наблюдается только в тех случаях, когда диаметр шариков менее ≈ 8 мм. При дальнейшем увеличении диаметра шариков максимумы скоростей монотонно убывают, при этом скорость всплытия снаряда становится выше в этаноле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-08-00368-а, 12-08-00734-а, 12-08-31243 мол_а).

Литература

1. Zukoski E.E. Motion of long bubbles in closed tubes // J. Fluid Mech. 1966. V. 25. № 4. P. 821.
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 гидродинамики снарядного режима течения газожидкостной системы в капиллярах // ТОХТ. 2008. Т. 42. № 2. с. 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
5. Покусаев Б.Г. Процессы переноса в многофазной среде // ТОХТ, 2007. Т. 41. № 1. с. 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.
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.
8. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin. 1997.

Определение полей скоростей, давления и температуры в конвергентном канале центробежного экструзионного гранулятора

к.т.н. доц. Мишта П.В., Мишта Е.А., к.т.н. доц. Щербакова Н.Л.
ФГБОУ ВПО ВолгГТУ
+7-84422-248028, mapl@vstu.ru

Аннотация. На основе системного подхода рассмотрен процесс течения неньютоновской жидкости в конвергентном криволинейном канале многосекционного ЦЭГ и разработана модель многосекционного центробежно-экструзионного гранулятора. Рассмотрен процесс течения неньютоновской среды, реологические свойства которой описываются «степенным» законом Оствальда – де Вилля, во вращающемся конвергентном криволинейном канале.

Ключевые слова: центробежное поле, неньютоновская жидкость, грануляция, проницаемость, центробежный экструзионный гранулятор.

Рассмотрим физическую модель многосекционного центробежно-экструзионного гранулятора (ЦЭГ) (рисунок 1).

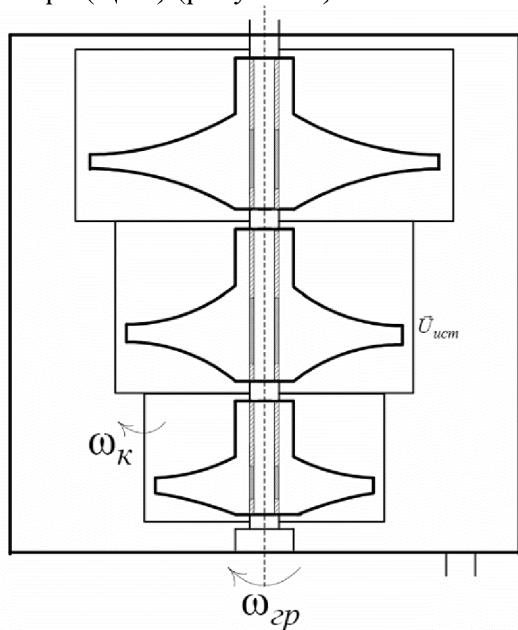


Рисунок 1 – Схема многосекционного ЦЭГ

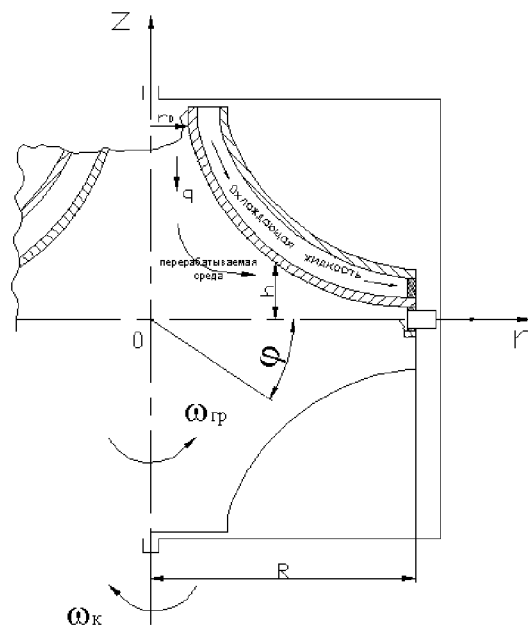


Рисунок 2 – Схема секции ЦЭГ