

BULETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 1991-3494

Volume 2, Number 360 (2016), 72 – 78

UDC 530.1

THEORETICAL ASPECTS OF CALCULATING BUBBLE LAYERS WITH HIGH DENSITY OF BUBBLE PHASE

D. D. Dairabay, V.G. Golubev, O.S. Balabekov, M.A.Serimbetov

¹ South Kazakhstan State University named after M. Auezov, Shymkent

²South Kazakhstan State Pedagogical Institute, Shymkent

³Kazakh University of technology and business, Astana

din_303@mail.ru

Key words: bubble-liquid flow, bubble clusters, two-phase flow, temperature field, mathematical model, numerical experiment.

Abstract. The gas-liquid two-phase flows in the bubbling bed regarding to systems with high load on the gas phase is characterized by the high density of bubble phase. The flow in this case has an extremely complex structure and due to the movable and non-stationary interfacial surface. The process of bubbling in these cases is accompanied by the formation and destruction of bubble structures. The authors' analysis shows that the main problem with modeling the bubble layer at high density of bubble phase is to integrate the induced by bubble clusters which are formed at high loads of the gas phase, the distortion of temperature and concentration fields in the continuous phase. The paper offers some theoretical aspects that allow closing to solve these problems. The paper deals with the new theoretic approaches to calculating temperature and concentration fields in the liquid layer perturbed by moving gas bubbles. On base of these approaches the method of calculating the transport phenomena in the bubble-liquid layer has been submitted.

УДК 530.1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТА БАРБОТАЖНЫХ СЛОЕВ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПУЗЫРЬКОВОЙ ФАЗЫ

Д.Д. Дайрабай, В.Г. Голубев, О.С. Балабеков, М.А.Серимбетов

¹Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова, г. Шымкент

²Южно-Казахстанский государственный педагогический институт, г. Шымкент

³Казахский университет технологии и бизнеса, г. Астана

Ключевые слова: барботажа, пузырьковые кластеры, двухфазный поток, температурное поле, математическая модель, численный эксперимент.

Аннотация. Газо-жидкостное двухфазное течение в барботажном слое в системах с высокой нагрузкой по газовой фазе и возникающей при этом высокой плотности пузырьковой фазы отличается чрезвычайно сложной структурой вследствие подвижной и нестационарной межфазной поверхности. Процесс барботажа в этих случаях сопровождается образованием и разрушением пузырьковых структур. Проведенный авторами анализ показал, что основная проблема, возникающая при моделировании барботажного слоя при высокой плотности капельной фазы, заключается в учете индуцированного образующимися пузырьковыми

кластерами при высоких нагрузках по газовой фазе искажения температурного и концентрационного полей в сплошной фазе. В статье предлагаются некоторые теоретические аспекты, позволяющие приблизиться к решению перечисленных проблем. Показаны новые теоретические подходы, позволяющие учесть искажения температурного и концентрационного полей в сплошной фазе, индуцированные плотным потоком всплывающих пузырей, и предложить подходы к разработке надежной методики расчета процессов переноса в барботажном слое.

Введение

Несмотря на большое количество посвященных барботажному слою исследований [1, 2], проблема полноценного описания гидродинамики и процессов переноса тепла и массы в барботажном слое остается недостаточно разработанной. Дело в том, что газо-жидкостное двухфазное течение в барботажном слое отличается чрезвычайно сложной структурой вследствие подвижной и нестационарной межфазной поверхности [2, 3]. Особенно это справедливо в системах с высокой нагрузкой по газовой фазе, т.е. при высокой плотности пузырьковой фазы. Процесс барботажа в этих случаях сопровождается образованием и разрушением пузырьковых структур 0.

Математическое моделирование таких течений представляет значительные трудности как с точки зрения постановки задачи, в особенности, граничных условий, так и с точки зрения создания надежной процедуры численного исследования [4, 5]. Важная и трудная проблема, возникающая при моделировании барботажного слоя при высокой плотности капельной фазы, заключается в учете индуцированного всплывающими пузырями искажения температурного и концентрационного полей в сплошной фазе [6]. В настоящей статье предлагаются некоторые теоретические аспекты, позволяющие приблизиться к решению перечисленных проблем.

Режимы интенсивного барботажа характеризуются наличием ячеисто-пленочных структур, в которых ячейки газа разделены пленками жидкости, с изменением соотношения кинетической энергии газа и потенциальной энергии жидкости происходит изменение структуры пены. Эти процессы сопровождаются агрегацией и деструкцией пузырьковых кластеров [7, 8]. Для этого динамического режима характерны отдельные жидкостные образования в виде крупных пузырьковых кластеров и струй, т.е. наблюдается нарушение сплошности слоя жидкости. Следует отметить, что описание барботажного слоя практически всегда подразумевает определенную статистическую однородность распределения газовых и жидкостных образований [9].

Неоднородность барботажного слоя, возникающая в промышленных аппаратах при высокой газовой нагрузке, существенно снижает эффективность контактных устройств. Поэтому обычно применяют специальные способы повышения однородности слоя, например, путем продольно-поперечного секционирования.

Математическая модель и численный эксперимент

Рассмотрим случай статистически однородного и случайного распределения газовых ячеек (пузырей), находящихся под воздействием выталкивающей силы, силы трения и сил, обусловленных турбулентными пульсациями. Анализируя перемещение ячеек, можно сделать вывод, что оно носит одновременно направленный и случайный характер.

При этом скорость газовых структур складывается из направленной осредненной скорости газовой фазы и случайной составляющей скорости хаотического турбулентного движения. По числу возможных пересечений их траекторий в единицу времени можно судить об интенсивности обновления межфазной поверхности. Истинная средняя скорость газовой компоненты в соответствии с [2, 10] определяется по выражению:

$$W = \frac{1}{\Delta\tau \sum F_i} \int \left(\sum_i \int W dF \right) d\tau. \quad (1)$$

здесь i - число отдельных образований рассматриваемой фазы в данном сечении в данный момент времени; F_i - площадь сечения, занятая этими образованиями; F - площадь поперечного сечения тарелки.

Соответствующие уравнения переноса массы и движения в сплошной фазе (т.е. в жидкости) для трехмерной двухфазной модели, осредненные по объему слоя [7, 8], можно записать следующим образом [3, 9]:

$$-\frac{d\alpha}{dt} + \nabla((1-\alpha)u_L) = 0, \quad (2)$$

$$(1-\alpha)\rho_L \left(\frac{\partial \vec{u}_L}{\partial t} + \vec{u}_L \cdot \nabla \vec{u}_L \right) = (\alpha-1)\nabla P + \alpha C_V \rho_L \left(\frac{d\vec{u}_G}{dt} - \frac{d\vec{u}_L}{dt} \right) + \vec{F}_D + \vec{F}_{LF} + \vec{F}_{GL} + \\ + (1-\alpha)\rho_L (1-\xi_T(T-T_0))\vec{g} + \vec{F}_V. \quad (3)$$

здесь \vec{F}_D - аэродинамическая сила взаимодействия между всплывающими пузырями и жидкостью в расчете на единицу объема; \vec{F}_{LF} - подъемная сила; \vec{F}_{GL} - другие возможные силы межфазового взаимодействия; \vec{F}_V - сила, обусловленная вязкостной диффузией.

При использовании такого подхода движение отдельного пузыря описывается следующим уравнением:

$$(\rho_G + C_V \rho_L) \frac{d\vec{u}^i}{dt} = -\nabla P + C_V \rho_L \frac{d\vec{u}_L}{dt} - \vec{F}_D^i - \vec{F}_{LF}^i - \vec{F}_{GL}^i + \rho_G \vec{g}, \quad (4)$$

где индекс i означает i -й пузырь.

В последнем выражении используется представление о локальных турбулентных коэффициентах кинематической вязкости [10]. При таком подходе появляется возможность учесть влияние стенок аппарата на движение жидкости и всплывающих пузырей в зависимости от текущего расстояния от стенки. Соответствующее выражение для составляющей коэффициента кинематической вязкости, обусловленной турбулентными пульсациями в жидкой фазе, дается формулой Райхарда [2]:

$$v_{SI} = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{yu_*}{26v}\right) \right\}^2 \frac{\kappa R u_*}{6} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \left(1 + 2 \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (5)$$

где y - толщина турбулентного пограничного слоя; u_* - фрикционная скорость; κ - константа Кармана; r - расстояние от оси аппарата; R - радиус аппарата.

Другая составляющая кинематической вязкости обусловлена возмущающим влиянием двигающихся в жидкости пузырей. Предложено довольно много различных аппроксимаций для

расчета этой составляющей. В настоящее время наиболее надежной считается аппроксимация, предложенная Сато с сотрудниками [1]:

$$v_{BI} = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{yu_*}{26\nu}\right) \right\}^2 k\alpha d_b u_b, \quad (6)$$

где $k = 0.6$ – эмпирическая константа; d_b – средний диаметр всплывающих пузырей; u_b – средняя относительная скорость всплывания.

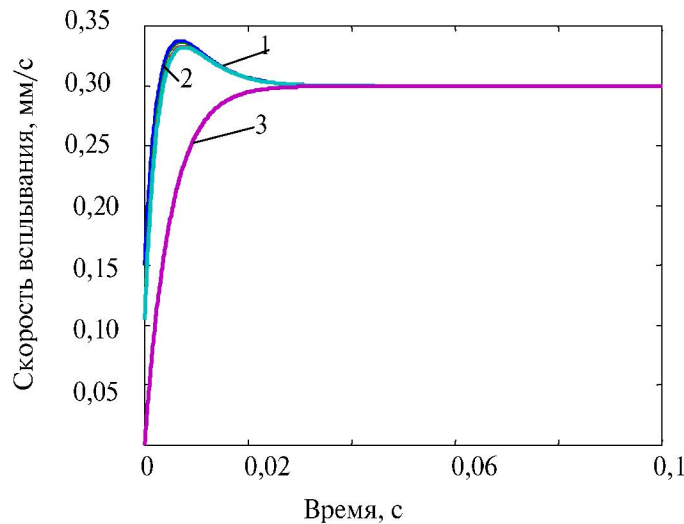
Подобный подход существенно опирается на представление о длине смешения, причем диаметр пузыря используется для оценки масштаба турбулентности. Поэтому для того, чтобы не выйти за пределы корректности, необходимо учитывать различие средних диаметров пузырей в центральной зоне и вблизи стенок.

Оценка этого фактора для касательных напряжений может быть сделана по формуле:

$$\frac{\tau}{\rho} = u_*^2 \frac{r}{R} \left(1 - \frac{1}{2Fr_*} (\langle \alpha \rangle_R - \langle \alpha \rangle_r) \right). \quad (7)$$

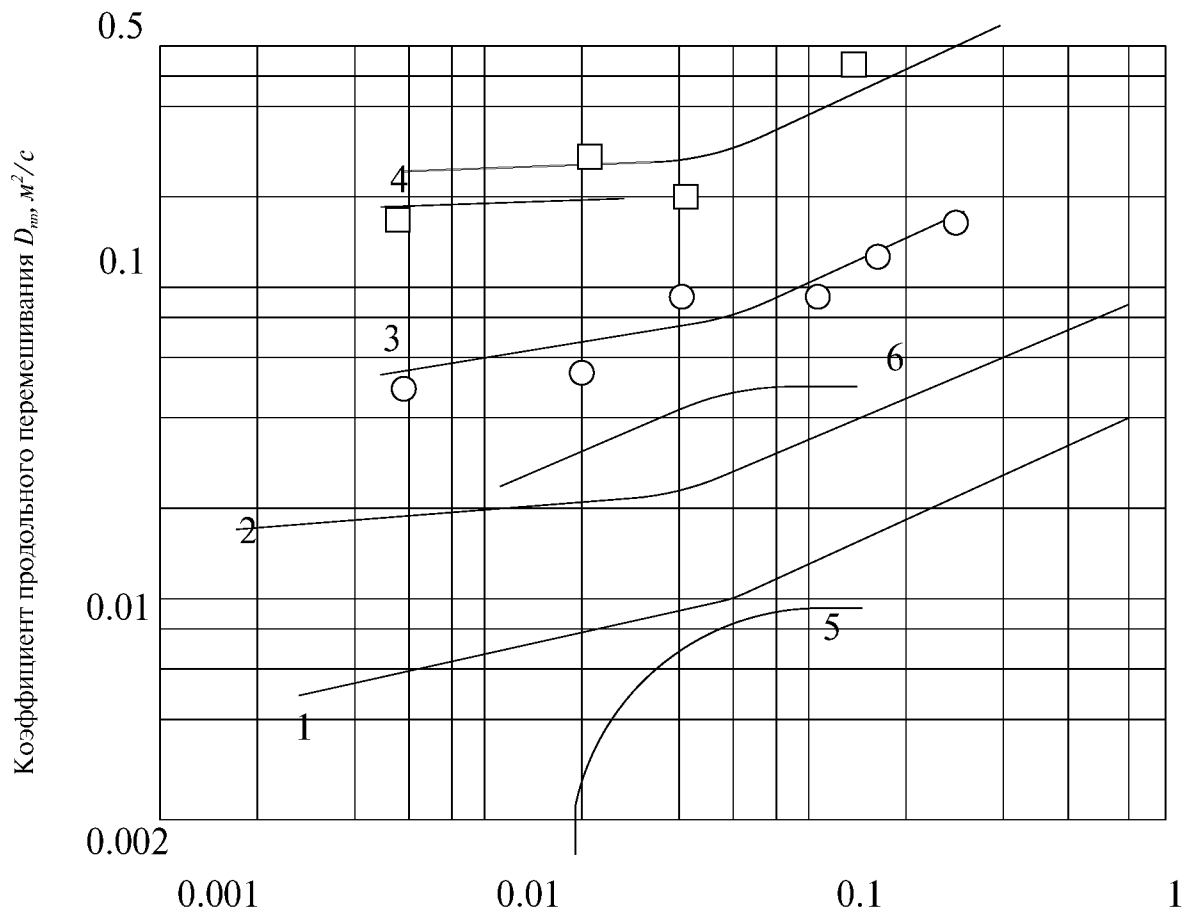
здесь число Фруда $Fr_* = u_*^2 / gR$.

На рисунках 1, 2, 3 приведены графики, показывающие использование предлагаемого метода для расчета скорости всплывания пузырей в двухфазном газожидкостном слое, а также коэффициента продольного перемешивания и пульсационных составляющих в барботажном слое.



Диаметр пузыря: 1 - $d = 6$ мм; 2 - $d = 4$ мм; 3 - $d = 2$ мм;

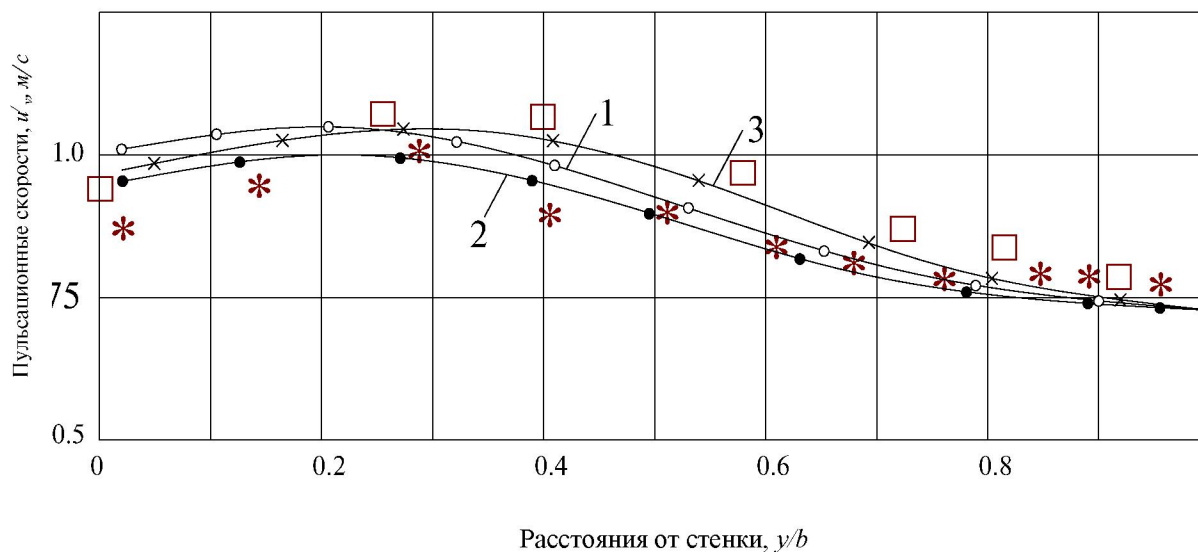
Рисунок 1 – Скорость всплывания пузырей в газожидкостном слое



Диаметр колонны: 1 – 100 мм, 2 – 250 мм, 3 – 400 мм, 4 – 800 мм, 5 – 76,5 мм, 6 – 300 мм;

Экспериментальные данные сопоставлены с [3]

Рисунок 2 – Коэффициент продольного перемешивания в барботажных колоннах различных диаметров



Экспериментальные данные сопоставлены с [4]

Рисунок 3 – Пульсационные скорости u'_y в направлении, нормальном к стенке плоского канала шириной $2b$

Выводы

Сравнение проведенных расчетов с экспериментальными данными работы [3] показывает способность модели достаточно точно описывать особенности процесса. В частности, видно, что кривые показывают максимум скорости всплывания на некоторой глубине для пузырей большого диаметра. Этот эффект находит экспериментальное подтверждение [3].

Оказываются обойденными многие специфические трудности постановки граничных условий для двухфазных потоков сложной структуры. Кроме того, что чрезвычайно важно, для численного решения предложенной системы соотношений могут быть использованы проверенные современные численные методы [6].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов от пыли. - М., Химия, 1981, 390 с.
- [2] Ахбердиев А.С., Левш В.И. Моделирование переноса тепла и массы в барботажном слое// IV Международный Форум по Теплообмену. Минск.- 2000, Т. , С.50-57.
- [3] Дуйсенов Н.Ж., Серимбетов М.А., Бренер А.М. Моделирование процессов переноса тепла и массы в газожидкостном потоке. / Научный журнал МОН РК "Поиск". Серия естественных и технических наук. №2. Алматы. 2005 год. С.206-210.
- [4] Lomholt S., Maxey M.R. Force coupling method for particulate two-phase flow: Stokes flow, J. Comput. Phys., v. 184, 2003, 381-405.
- [5] Narayanan C., Lakehal D., Botto L., Soldati A., Mechanisms of particle deposition in a fully-developed turbulent open channel flow, Phys. Fluids, v. 15, 2003, pp. 763-775.
- [6] Françoise M., Shyy W., Numerical simulation of droplets dynamics with heat transfer, Proc. 12th Intern. Conf. On Heat Transfer, Elsevier, Holland, 2002, pp. 1201-1221.
- [7] Reeks M.W., On model equations for particle dispersion in inhomogeneous turbulence, Int. J. Multiphase Flow, v. 31, 2005, pp. 93-114.
- [8] Takemura F., Migration velocities of spherical solid particles near a vertical wall for Reynolds numbers from 0.1 to 5, Phys. Fluids, v. 16, 2004, pp. 204-207.
- [9] Feng Z.-G., Michaelidis E.E., Hydrodynamic Force on Spheres in Cylindrical and Prismatic Enclosures, Int. J. Multiphase Flow, v. 28, 2003, pp. 943-957.
- [10] Bagchi P., Balachandar S., Shear versus vortex induced lift force on a rigid sphere at moderate Re, J. Fluid Mech., 2002, v. 473, pp. 379-388.

REFERENCES

- [1] Uzhov V. N., Valdberg A. Yu., Myagkov B. I. Dust removal from industrial gases. M., *Khimiya* [Chemistry], **1981**, p. 390.
- [2] Akhberdiyev A. S., V. I. Levsh. Simulation of heat and mass transfer in the bubbling bed // *IV Mezhdunarodniy Forum po Teploassoobmenu* [IV International Heat and Mass Transfer Forum]. Minsk, **2000**, T., pp. 50-57.
- [3] Duysenov N. Zh., Serimbetov M. A., Brener A. M. Simulation of heat and mass transfer in gas-liquid flow // *Nauchniy zhurnal MON RK "Poisk". Seriya yestestvennikh i technicheskikh nauk* [Scientific review of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan "The Search". The series of natural and technical sciences] No.2. Almaty, **2005**, pp. 206-210.
- [4] Lomholt S., Maxey M.R. Force coupling method for particulate two-phase flow: Stokes flow, *J. Comput. Phys.*, v. 184, **2003**, 381-405.
- [5] Narayanan C., Lakehal D., Botto L., Soldati A., Mechanisms of particle deposition in a fully-developed turbulent open channel flow, *Phys. Fluids*, v. 15, **2003**, pp. 763-775.
- [6] Francoise M., Shyy W., Numerical simulation of droplets dynamics with heat transfer, *Proc. 12th Intern. Conf. On Heat Transfer*, Elsevier, Holland, **2002**, pp. 1201-1221.
- [7] Reeks M.W., On model equations for particle dispersion in inhomogeneous turbulence, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 31, 2005, pp. 93-114.
- [8] Takemura F., Migration velocities of spherical solid particles near a vertical wall for Reynolds numbers from 0.1 to 5, *Phys. Fluids*, v. 16, **2004**, pp. 204-207.
- [9] Feng Z.-G., Michaelidis E.E., Hydrodynamic Force on Spheres in Cylindrical and Prismatic Enclosures, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 28, **2003**, pp. 943-957.
- [10] Bagchi P., Balachandar S., Shear versus vortex induced lift force on a rigid sphere at moderate Re, *J. Fluid Mech.*, **2002**, v. 473, pp. 379-388.

**ЖОҒАРЫ ТЫҒЫЗДЫҚТЫ КӨПІРШІКТІ ФАЗАНЫҢ БАРБОТАЖДЫ ҚАБАТТАРЫН
ЕСЕПТЕУДІҢ ТЕОРИЯЛЫҚ АСПЕКТІЛЕРІ**

Д.Д. Дайрабай, В.Г. Голубев, О.С. Балабеков, М.А. Серимбетов

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент қаласы

²Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік педагогикалық институты, Шымкент қаласы

³Қазақ және технология бизнес университеті, Астана қаласы

Түйін сөздер: барботаж, көпіршікті кластерлер, екі фазалық ағын, температуралық өріс, математикалық үлгі, сандық тәжірибе.

Аннотация. Газ фазасы бойынша жоғары жүктемелі жүйелердегі барботажды қабаттағы газ-сұйықтық екі фазалы ағын және, сонымен қатар, туындайтын жоғары тығыздықты көпіршікті фаза жылжымалы және стационарлық емес фазааралық бет салдарының ерекше күрделі құрылымымен ерекшеленеді. Бұл жағдайларда барботаж процесі көпіршікті құрылымдардың түзілуі және бұзылуымен жалғасады. Авторлармен жүргізілген талдау барботажды қабатты жоғары тығыздықты тамшылы фаза кезінде үлгілеу жағдайында туындайтын негізгі проблема жаппай фазада температуралық және концентраттық өрістердің газ фазасында бұрмалануы бойынша жоғары жүктемелер кезінде көпіршікті кластерлермен түзілетін индукцияланғанды есепке алуда болатынын көрсетті. Мақалада көрсетілген мәселелерді шешуге жақындауға мүмкіндік беретін бірқатар теориялық аспектілер ұсынылады. Қалқымалы көпіршіктердің тығыз ағынымен индукцияланған жаппай фазадағы температуралық және концентраттық өрістердің бұрмалануын есепке алуға және барботажды қабатта ауыстыру процестерін есептеудің сенімді әдістемесін әзірлеуге арналған тәсілдерді ұсынуға мүмкіндік беретін жаңа теориялық әдістер көрсетілген.

Поступила 13.04.2016 г.