УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖФАЗНОГО МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ ТУРБУЛЕНТОСТИ В ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ

Чернышев А.С., Шмидт А.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Изучение пузырьковых сред представляет большой интерес в силу их распространенности в природных и технологических процессах. Течения таких сред зачастую происходят в условиях, при которых реализуется турбулентный режим в несущей среде. Причем если скорость пузырей относительно жидкости велика, то создаваемые пузырями возмущения будут вносить вклад в структуру турбулентности.

Исследования в области многофазной турбулентности широко представлены в литературе (см., например, [1,2]). Стоит отметить, что в силу сложности и многообразия сопутствующих процессов авторами большинства работ рассматривались только определенные механизмы, влияющие на структуру течения, а также упрощенные расчетные области. Однако, за последние годы прогресс в области численного моделирования позволил использовать подробные модели течений пузырьковых сред с учетом турбулентности для расчета реальных задач.

В представленной работе исследуется динамика пузырьковой среды в вертикальных каналах и трубах, причем течение может определяться как воздействием силы тяжести, так и заданным расходом.

В основе математической модели лежит эйлерово-эйлеровский подход, хорошо зарекомендовавший себя при расчетах многофазных сред в условиях большого содержания дисперсной фазы. Уравнения сохранения массы и импульса для каждой фазы дополняются источниковыми слагаемыми, отвечающими за силовое взаимодействие между фазами. При описании движения пузырьков учитываются сила вязкого трения (Стокса), сила Сэффмана, присоединенных масс, сила стенки и сила, отвечающая за дисперсию пузырьков за счет турбулентных пульсаций скорости. Для описания турбулентности в работе используется k-ω-SST модель.

Существует несколько подходов к описанию влияния пузырей на параметры турбулентности несущей фазы. Самый простой заключается в непосредственной модификации эффективной вязкости несущей среды. Он прост с вычислительной стороны, однако из-за недооценки значений вязкости наблюдаются расхождения с экспериментом. Расхождение наиболее заметено при больших объемных долях пузырей и в случаях нестационарных потоков. Более точные подходы связаны с модификацией уравнений модели турбулентности. Исходные уравнения дополняются источниковыми слагаемыми, отвечающими за генерацию турбулентности за счет относительного движения пузырей. Следующими по точности и сложности идут модели, включающие дополнительное уравнение для энергии турбулентных пульсаций за счет пузырьков, однако количество неизвестных параметров в них велико, что не позволяет использовать их в большинстве задач, представляющих практический интерес.

В представленной работе используется подход, связанный с добавлением источниковых слагаемых в уравнения для k и ω. Форма такого слагаемого для k – универсальна, для ω – зависит от выбранной модели. Общая часть для всех моделей заключается в предположении, что за генерацию турбулентности отвечает силовое взаимодействие фаз. В предположении, что в пузырьковых течениях основной вклад вносит сила Стокса, она считается ответственной за генерацию турбулентности.

В рамках представленной работы было проведено тестирование нескольких наиболее широко используемых моделей, а также одной новой модели, разработанной на базе модели Trosko&Hassan.

Источниковое слагаемое для k имеет вид:

$$S_k = F_D \cdot \left(U_G - U_L\right)$$

Для слагаемого в уравнении для ω использовались модели, представленные в [3]:

Политано (PO):

$$S_\omega = \frac{S_k}{k}\left(\frac{C_B}{C_\mu} - \boldsymbol{1}\right), \quad C_B = \boldsymbol{1.92}$$

Мореля (MO):

$$S_\omega = \frac{S_k}{k}\left(\frac{C_B\left(k\omega\right)^{\boldsymbol{1/3}}}{C_\mu\left(\boldsymbol{2R}_b\right)^{\boldsymbol{2/3}}} - \omega\right), \quad C_B = \boldsymbol{2}$$

Креппера и Ржезака (K-R):

$$S_\omega = \frac{S_k}{k}\left(\frac{C_B k^{\boldsymbol{1/2}}}{C_\mu \boldsymbol{2R}_b} - \omega\right), \quad C_B = \boldsymbol{2}$$

А также новая модель, построенная на основе модели Troshko&Hassan (M1-TH):

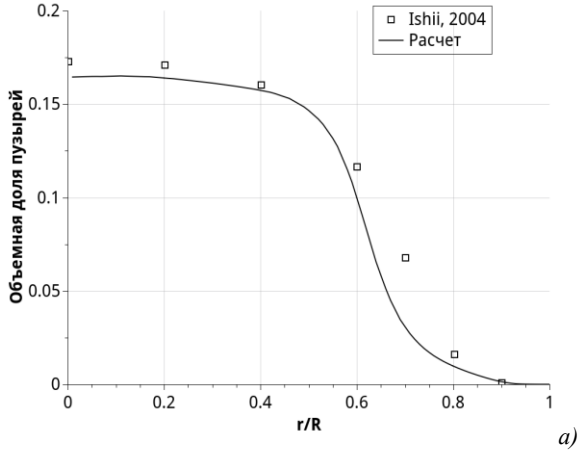
$$S_\omega = S_k \frac{\rho_L}{\mu^{turb}} \cdot C_B, \quad C_B = \boldsymbol{0.8}$$

Расчеты проводились при помощи программного кода, разработанного авторами для расчета трехмерных турбулентных многофазных течений. Он основан на методе конечных объемов и неструктурированных сетках. Аппроксимация по пространству имеет второй порядок точности и производится при помощи противопоточных схем, удовлетворяющих критерию TVD. Для расчета поля давления используется алгоритм SIMPLE с поправками на многофазность.

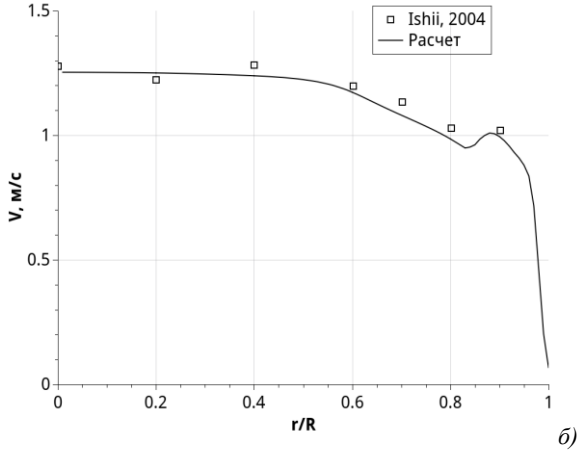
Как было указано выше, расчеты проводились в вертикальных каналах с вынужденным течением (заданный расход) и течением, возникающим из-за движения пузырей в поле силы тяжести. Для анализа эффективности моделей, полученные результаты сравнивались с данными экспериментов. Дополнительно были проведены расчеты по определению влияния размера пузырей (и сопутствующих безразмерных критериев потока) на структуру течения и параметры турбулентности.

Для апробации модели, численной схемы и ее программной реализации были проведены расчеты нисходящего течения жидкости с пузырьками в вертикальном цилиндрическом канале в поле силы тяжести. Размеры канала и параметры течения выбирались согласно работе [4]. Длина канала составляет 2 м, радиус *Rt* — 12.7 мм. Скорость жидкости на входе составляет 1.34 м/с, скорость газа: 1.3 м/с, объемная доля пузырей: 0.067. В качестве жидкости используется вода, газ — воздух при нормальных условиях. Радиус пузырьков на входе постоянен и равен 0.75 мм.

На Рис. 1 представлено распределение объемной доли пузырей и их скорости в радиальном сечении, отстоящем на $z = 2 \cdot Rt \cdot 68 = 1.7272$ м от входа в трубу. Сечение выбрано с таким расчетом, чтобы минимизировать влияние входных условий. Как видно из сравнения, расчет хорошо совпадает с экспериментом и отражает характерную структуру нисходящего пузырькового потока, при которой вблизи стенки наблюдается полное отсутствие пузырей, с ярко выраженным ядром около оси симметрии. Некоторое расхождение по объемной доле в области безразмерного радиуса 0.6-0.8 можно отнести к недостаточной дисперсии в этой области за счет неоднородного распредления пузырьков по радиусу в эксперименте.



а)



б)

Рис. 1. Распределение объемной доли (а) и продольной скорости пузырей (б) по радиусу на расстоянии 1.7272 м от входа в канал и сравнение с экспериментальными данными (Ishii, 2004)

Список литературы:

1. R.M.A. Masood, A. Delgado, Numerical investigation of the interphase forces and turbulence closure in 3D square bubble columns // Chem. Eng. Sc., 2014, V. 108, P. 154-168.
2. Чернышев А.С., Шмидт А.А., Использование эйлерово-эйлеровского подхода для моделирования турбулентных течений пузырьковых сред // ПЖТФ, 2013, Т. 39, В. 12, С. 17-24.
3. R. Rzehak, E. Krepper, Bubble-induced turbulence: Comparison of CFD models // Nucl. Eng and Design, 2013, V. 258, P. 57-65.
4. M. Ishii, S. S. Paranjape, S. Kim, & X. Sun, Interfacial structures and interfacial area transport in downward two-phase bubbly flow // International Journal of Multiphase Flow, 2004, V. 30, P. 779–801.