

УДК 532.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ  
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ**

© 2011 г.

**Р.В. Мукин, В.М. Алипченков, Л.И. Зайчик**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

mukin@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Проводится моделирование полидисперсных пузырьковых турбулентных течений на основе объединения диффузионно-инерционной модели с методом дельта-аппроксимаций. Выполнена верификация моделей коагуляции и дробления пузырьков. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что разработанный подход позволяет моделировать пузырьковые полидисперсные течения в широком диапазоне значений газосодержания.

*Ключевые слова:* двухфазные течения, пузырьковые течения, полидисперность, течения в вертикальной трубе.

Двухфазные пузырьковые турбулентные течения наблюдаются во многих энергетических установках и промышленных аппаратах. Их исследования находят широкое приложение в атомной энергетике. Поэтому моделирование пузырьковых турбулентных течений представляет большой практический интерес и ему посвящено достаточно большое количество публикаций. Предсказание распределений пузырьков (паросодержания) и других параметров двухфазного потока в каналах атомного реактора может иметь решающее значение для анализа безопасности и управления аварией.

Сложность моделирования пузырьковых турбулентных течений связана с различными явлениями физической природы, поскольку такие течения, как правило, сопровождаются процессами теплообмена, фазовых переходов, коагуляции, дробления и т.д. В настоящее время для расчета пузырьковых турбулентных течений существует целый ряд подходов.

Трехмерные расчеты выполняются большей частью с использованием двухжидкостных моделей, основанных на системе баланса массы, импульса и энергии для обеих фаз (жидкости и пузырьков) с учетом межфазного взаимодействия.

Газовая фаза представляет собой полидисперсную систему, состоящую из пузырьков различного размера. Наиболее общим способом расчета такой полидисперсной среды является подход на основе разбиения всей системы пузырьков на отдельные группы (классы) с последующим моделированием переноса массы, импульса и тепла для каждой группы – многожидкостный подход. Так,

решение полной системы уравнений массы, импульса и тепла при большом количестве групп по размерам в случае расчета сложного трехмерного течения может приводить к очень большим затратам времени даже при использовании самых быстродействующих современных ЭВМ. Поэтому с целью сокращения количества решаемых уравнений обычно применяют некоторые упрощающие допущения. Например, для сокращения количества уравнений баланса импульсов несколько групп по размерам объединяются в одну группу по скоростям [1], а в [2] даже принимается, что пузырьки всех групп имеют одинаковую скорость. Очевидно, что такого рода допущения приводят к значительному снижению точности получаемых расчетных результатов не только в отношении скорости пузырьков, но и их концентрации.

В [3] предложена диффузионно-инерционная модель (ДИМ) для описания дисперсии и осаждения малоинерционных частиц в турбулентных потоках. Модель основана на кинетическом уравнении для функции плотности вероятности распределения скорости частиц [4] и справедлива для двухфазных потоков с частицами, плотность которых много больше плотности сплошной фазы. Суть модели заключается в выражении скорости частиц через характеристики несущей сплошной среды и сведении таким образом задачи моделирования транспорта дисперсной фазы к решению уравнения диффузионного типа для концентрации частиц. В [5] выполнено обобщение ДИМ на турбулентные потоки с частицами произвольной плотности и в качестве приложения показано приме-

нение модели для расчета распределения монодисперсных пузырьков в вертикальной трубе.

Отметим, что в случае пузырьковых течений использование ДИМ вместо решения полной системы уравнений баланса импульсов в рамках двухжидкостных или многожидкостных моделей не приводит к заметной потере точности в описании пространственного распределения дисперсной фазы. Этот факт объясняется тем, что частицы дисперсной фазы (пузырьки) являются малоинерционными и быстро реагируют на флуктуации скорости турбулентной жидкости, а, следовательно, условия справедливости ДИМ хорошо выполняются [5, 6].

Общая цель настоящего исследования – развитие метода расчета газо- и парожидкостных полидисперсных турбулентных течений с теплообменом и фазовыми переходами путем моделирования поведения дисперсной фазы на основе ДИМ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №09-08-00084-а, 10-08-00210-а).*

*Список литературы*

1. Krepper E. et al. The Inhomogeneous MUSIG model for the simulation polydispersed flows // Nuclear Engineering and Design. 2008. V. 238. P. 1690.
2. Yeoh G.H., Tu J.Y. Numerical modeling of bubbly flows with and without heat and mass transfer // Appl. Math. Modelling. 2006. V. 30. P. 1067.
3. Zaichik L.I., Pershukov V.A., Kozelev M.V., Vinberg A.A. Modeling of dynamics, heat transfer, and combustion in two-phase turbulent flows: 2. Flows with heat transfer and combustion // Exper. Thermal and Fluid Science. 1997. V. 15, No 1. P. 311.
4. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. М.: Физматлит, 2007.
5. Зайчик Л.И. и др. Развитие диффузионно-инерционной модели для расчета пузырьковых турбулентных течений. Изотермическое монодисперсное течение в вертикальной трубе // ТВТ. 2011. (в печати)
6. Zaichik L.I. et al. A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows // Int J. Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. P. 154.

**MODELLING OF POLYDISPERSED BUBBLY FLOW IN TURBULENT FLUID**

*R. V. Mukin, V. M. Alipchenkov, **L.I. Zaichik***

A polydispersed bubbly flow in a vertical pipe with a turbulent fluid is modeled and based on diffusion-inertia model combined with the delta-approximation method. Validation of coalescence and break-up models is presented. Numerical predictions are compared against the experimental data; it is shown that the developed model can describe polydispersed bubbly flow in a wide range of void fractions.

*Keywords:* two-phase flow, polydispersed bubbly flow, vertical pipe flow.