

УДК 536.24:532.517.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ЧАСТИЦ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ПОСЛЕ ВНЕЗАПНОГО РАСШИРЕНИЯ ТРУБЫ**

© 2011 г.

*М.А. Пахомов*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

pakhomov@ngs.ru

*Поступила в редакцию 16.06.2011*

С использованием эйлера подхода выполнено исследование структуры течения и процесса распространения дисперсной примеси в турбулентном потоке после внезапного расширения трубы в случае небольших значений массовой концентрации частиц ( $M_{L1} = 0-0.1$ ) при вариации в широком диапазоне размера и материала частиц. Изучено влияние частиц на процессы распространения дисперсной фазы, на турбулентность газа и дисперсию твердой фазы. Показано, что малоинерционные частицы вовлекаются в циркуляционное движение и могут накапливаться в ней. Крупные частицы проходят в основном через область сдвигового течения и практически не попадают в отрывную зону. Выполнено сопоставление с данными измерений для случая монодисперсных двухфазных отрывных течений.

*Ключевые слова:* моделирование, дисперсия частиц, теплоперенос, взаимодействие капель с турбулентностью, внезапное расширение трубы.

**Введение**

Течение после внезапного расширения трубы является одним из часто встречающихся случаев отрывного потока при обтекании острых кромок тел. Процесс отрыва сопровождается значительными изменениями скорости и давления в зоне отрыва. Течение и теплообмен вниз от сечения отсоединения потока зависит от предыстории развития потока и геометрии поверхности в районе сечения отрыва. Внезапное расширение потока в трубах или каналах обычно используется в качестве стабилизатора пламени в камерах сгорания, для интенсификации тепломассообменных процессов и во многих других технических устройствах. Достаточно часто отрыв – это явление, приводящее к негативным последствиям: увеличение сопротивления газа в трубопроводах, снижение скорости и прочее. Наличие рециркуляционного течения в отрывной зоне оказывает значительное влияние на интенсивность процессов переноса импульса, теплоты и массы и определяет структуру турбулентного течения.

Достаточно часто в различных технологических приложениях используются двухфазные течения с отрывом. При этом, помимо указанных выше параметров, на процессы переноса большое влияние оказывает дисперсная фаза. Ее воздействие возрастает с ростом диаметра частиц и их концентрации. При этом заметим, что турбулентность газа оказывает значительное воздействие на

процесс распространения дисперсной фазы. Детальная информация о структуре турбулентного потока, скоростях и распределению частиц по сечению трубы имеет важное значение при разработке и оптимизации процессов испарения и (или) горения.

Цель настоящей работы – проведение численного исследования распространения дисперсной примеси в турбулентном потоке после внезапного расширения трубы при наличии теплообмена двухфазного потока с поверхностью стенки трубы.

**Математическая модель**

Для описания динамики течения и тепломассопереноса в газовой и дисперсной фазах использовался эйлеров подход, ранее разработанный авторами [1]. При моделировании турбулентности газа применялась дифференциальная модель переноса рейнольдсовых напряжений [2], модифицированная на случай присутствия дисперсной фазы. В этом заключается основное отличие от работы [1], где для замыкания модели по газовой фазе применялась модифицированная двухпараметрическая модель турбулентности, что приводило к неверному расчету уровня турбулентности газа в отрывной области. Расчет компонент пульсаций скорости, температуры и турбулентного теплового потока дисперсной фазы осуществляется с использованием модели переноса рейнольдсо-

вых напряжений частиц [3]. Первоначально дифференциальные уравнения модели [3] были записаны для течений с твердыми частицами, затем модель была адаптирована для течений с переменным размером дисперсной примеси.

При исследовании использовалась расчетная сетка, неравномерная как в аксиальном, так и в радиальном направлениях (сгущение расчетных узлов в районе рециркуляционного участка, сечения отрыва и зоны присоединения). Все расчеты проведены на сетке, содержащей  $300 \times 120 \times 16$  контрольных объемов.

### Результаты численных расчетов

Показана применимость эйлерова подхода для описания динамики и теплопереноса в газокapельных течениях после внезапного расширения трубы при наличии испарения дисперсной фазы. Число Стокса дисперсной фазы в осредненном движении  $St = \tau/\tau_f$  является основным критерием, по которому судят о вовлечении дисперсной фазы в циркуляционное движение газа, где  $\tau$  – время динамической релаксации частицы с учетом отклонения от закона обтекания Стокса и  $\tau_f$  – временной масштаб турбулентности  $\tau_f = 5H/U_1$  [4].

Отметим, что вниз от сечения отрыва наблюдается резкое изменение структуры течения. Для профилей скорости газа имеются области отрицательных скоростей, соответствующие зоне рециркуляции потока. Скорость дисперсной фазы также имеет отрицательные значения, что говорит о вовлечении мелкодисперсных капель в рециркуляционное движение. Добавление капель в турбулентный поток приводит к незначительному сдвигу точки присоединения вниз по течению. Мелкие капли ( $d_1 \leq 50$  мкм, число Стокса  $St < 1$ ) хорошо вовлекаются в рециркуляционное течение и присутствуют по всему сечению трубы. Крупные частицы ( $d_1 \approx 100$  мкм,  $St > 1$ ) проходят через сдвиговый слой и практически не попадают в отрывную область. Пристенная

часть трубы ( $r/H > 1.25$ ) оказывается практически свободной от частиц за счет интенсивного процесса испарения.

Наблюдается значительное увеличение интенсивности теплообмена при добавлении испаряющихся капель в отрывное течение (более чем в 1.5 раза по сравнению с однофазным потоком). Теплообмен при добавлении капель резко возрастает за счет использования скрытой теплоты фазовых переходов при испарении капель в пристенной области трубы. Для мелкодисперсного потока увеличение теплообмена происходит на всем участке за отрывом двухфазного потока, а для крупных частиц – в основном за точкой присоединения. При проведении сопоставительного анализа были использованы экспериментальные данные по теплообмену в газокapельном потоке за обратным уступом [5] и двухфазному течению с твердыми частицами за плоским обратным уступом [4] и после внезапного расширения трубы [6]. Хорошее согласие с экспериментальными данными говорит об адекватности разработанной модели расчета двухфазного отрывного течения за внезапным расширением трубы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №09-08-00929) и фонда Президента РФ для молодых кандидатов наук (грант МК-504.2010.8).*

### Список литературы

1. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 4711–4721.
2. Manceau R., Hanjalic K. // Phys. Fluids. 2002. V. 14. P. 744–754.
3. Зайчик Л.И., Козелев М.В., Першуков В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 1994. №4. С. 65–75.
4. Fessler J.R., Eaton J.K. // J. Fluid Mech. 1999. V. 314. P. 97–117.
5. Hishida K., Nagayasu T., Maeda M. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38. P. 1773–1785.
6. Founti M., Klipfel A. // Int. J. Exp. Thermal Fluid Sci. 1998. V. 17. P. 27–36.

## NUMERICALLY MODELING THE DISPERSION OF PARTICLES IN A TURBULENT FLOW DOWNSTREAM OF A PIPE SUDDEN EXPANSION

*M.A. Pakhomov*

Gas-droplets turbulent flow and dispersion of particles downstream of a sudden pipe expansion using Euler/Euler model has been investigated for the case of low fraction of the droplet mass ( $M_{L1} = 0-0.1$ ). The effect of a dispersed phase on the dispersion of particles and gas turbulence has been studied. The presence of fine dispersed droplets in the flow drastically attenuates the gas phase turbulence. Low-inertia droplets are well entrained into the circulation flow and present over the whole pipe section. Large particles go through the shear layer, practically not getting into the detached area. Comparison with experimental data on separated two-phase flows behind the plane backward-facing step is done.

*Keywords:* modeling, particles dispersion, heat transfer, droplets-turbulence interaction, pipe sudden expansion.