

ОТРЫВНЫЕ ДВУХФАЗНЫЕ ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.И. Терехов, М.А. Пахомов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Двухфазные газокапельные течения в различных технических устройствах, как правило, анизотропные и могут быть осложнены межфазным теплообменом, испарением капель или отрывом потока. Одно из важных приложений двухфазных отрывных потоков стабилизация горения испаряющихся частиц топлива с помощью создания отрывных областей. При этом можно эффективно управлять структурой отрывного течения, турбулентностью и теплообменом.

Исследование таких течений затруднено тем, что к настоящему времени нет детального представления об аэродинамике и теплообмене даже для однофазного отрыва потока (см. монографии [1–3] и обобщающие обзоры [4,5]). Одной из первых работ по экспериментальному исследованию газодисперсных течений после плоского обратного уступа при наличии межфазного теплообмена была работа [6]. В области исследований отрывных газодисперсных течений без теплообмена выделим работы [7,8]. В области изучения газокапельных отрывных течений при наличии межфазного теплообмена отметим экспериментальные [9] и численные исследования [10–12].

В работе представлен краткий обзор современного состояния исследований по данной тематике в РФ и в мире и результаты численного моделирования газокапельных отрывных течений за обратным расширением трубы, полученные в ИТ СО РАН за последние 10 лет.

Рассмотрена задача о динамике двухфазного газокапельного отрывного турбулентного потока при наличии теплообмена со стенками канала. При решении используются Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) уравнения [9], записанные с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе. Для описания динамики течения и тепломассопереноса в газовой и дисперсной фазах используется эйлеров подход. Объемная концентрация дисперсной фазы мала, частицы достаточно мелкие. Поэтому можно пренебречь эффектами их столкновений друг с другом. Целью данной работы является численное исследование влияния испарения капель различных жидкостей на изменение турбулентности, структуру течения и теплообмен в отрывном двухфазном потоке за внезапным расширением трубы.

Показана применимость использования эйлерова и лагранжева подходов для описания динамики и тепломассопереноса в газокапельных течениях за обратным уступом и после внезапного расширения трубы при наличии испарения дисперсной фазы. Исследовано влияние изменения основных параметров двухфазного потока таких как: концентрация капель, их начальный размер, скорость газокапельного течения и плотность теплового потока на стенке трубы. Добавление испаряющихся капель в турбулентный поток приводит к незначительному сдвигу точки присоединения вниз по течению. Мелкие капли ($d_1 \leq 50$ мкм) хорошо вовлекаются в рециркуляционное течение и присутствуют по всему сечению трубы. Крупные частицы ($d_1 \approx 100$ мкм) проходят через сдвиговый слой и практически не попадают в отрывную область. Добавление испаряющихся капель в турбулентный поток приводит к незначительному сдвигу точки присоединения вниз по течению.

В расчетах получено подавление мелкодисперсными каплями турбулентности газовой фазы. Этот эффект в основном ограничен приосевой зоной трубы из-за испарительных процессов, которые интенсивно протекают в пристенной области. Уровень турбулентности близок к соответствующему значению в однофазном режиме течения. В ядре течения, где испарения практически нет, заметно снижение уровня турбулентности газа (до 15 % по сравнению с однофазным потоком). Показано, что в пристенной зоне испарение капель протекает наиболее интенсивно, и подавления турбулентности в этом случае практически не наблюдается.

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 зоне трубы. Для мелкодисперсного потока увеличение теплообмена происходит на всем участке за отрывом двухфазного потока, а для крупных частиц – в основном за точкой присоединения.

В работе рассмотрен широкий круг проблем и особенностей двухфазных отрывных течений, в том числе влияние теплофизических свойств капель жидкой фазы, дополнительной закрутки потока, числа Рейнольдса и других факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект 18-19-00161).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chang P.K.** Separation of Flow, Oxford: Pergamon Press, 1970.
2. **Alemasov V.E., Glebov G.A., Kozlov A.P.** Thermoanemometric Methods for Studying Separated Flows, Kazan: Kazan Publishing House of Academy of Sciences of the USSR, 1989. 178 с.
3. **Terekhov V.I., Bogatko T.V., D'achenko A.Yu., Smulsky Ya.I., Yarygina N.I.** Heat Transfer in Subsonic Separated Flows, Novosibirsk: NSTU Publishing House 2016.
4. **Simpson R.L.** Aspects of turbulent boundary-layer separation // Progress Aerospace Sci. 1996. Vol. 32. P. 457–521.
5. **Ota T.** A Survey of heat transfer in separated and reattached flows // Appl. Mech. Rev. 2000. Vol. 53. P. 219–235.
6. **Maeda M., Kiyota H., Hishida K.** Heat transfer to gas-solids two-phase flow in separated, reattached and redevelopment regions // Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf. 1982. Munich, Germany. V. Paper TF9. P. 249–254.
7. **Fessler J.R., Eaton J.K.** Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 314. P. 97–117.
8. **Li F., Qi H., You C.F.** Phase Doppler anemometry measurements and analysis of turbulence modulation in dilute gas–solid two-phase shear flows // J. Fluid Mech. 2010. Vol. 663. P. 434–455.
9. **Hishida K., Nagayasu T., Maeda M.** Augmentation of convective heat transfer by an effective utilization of droplet inertia // Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. Vol. 38. P. 1773–1785.
10. **Pakhomov M.A., Terekhov V.I.** Second moment closure modelling of flow, turbulence and heat transfer in droplet-laden mist flow in a vertical pipe with sudden expansion // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. Vol. 66. P. 210–222.
11. **Pakhomov M.A., Terekhov V.I.** The effect of droplets evaporation on turbulence modification and heat transfer enhancement in a two-phase mist flow downstream of a pipe sudden expansion // Flow, Turbulence, Combust. 2017. Vol. 98. P. 341–354.
12. **Pakhomov M.A., Terekhov V.I.** Effect of evaporating droplets on flow structure and heat transfer in an axisymmetrical separated turbulent flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 140. P. 767–776.