

О новых способах энергоразделения газовых потоков

¹Г. М. Азанов, ²А. И. Алексюк, ³А. Н. Осипцов

^{1,2}Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

³НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

osiptsov@imec.msu.ru

Безмашинным энергоразделением газового потока называется такая организация течения, при которой однородный поток преобразуется в два потока с существенно различающимися температурами торможения без совершения работы или подвода тепла из внешних источников. Наиболее известным способом безмашинного газодинамического энергоразделения является использование вихревых трубок Ранка–Хилша [1]. Такие устройства могут обеспечить разность температур торможения выходящих потоков в десятки градусов, однако имеют существенный недостаток, связанный с высокими потерями полного давления. Несмотря на большое число приближенных моделей вихревого эффекта Ранка, до сих пор отсутствует полное понимание физических механизмов безмашинного энергоразделения газовых потоков, что затрудняет оптимизацию работы существующих энергоразделяющих устройств и создание более эффективных устройств, основанных на новых схемах течения. Настоящая работа направлена на исследование нескольких перспективных схем организации течения и общих механизмов газодинамического энергоразделения.

Для иллюстрации основных механизмов энергоразделения запишем уравнение переноса полной энталпии для вязкого теплопроводного газа:

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla_j (\tau^{ij} V_i) + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

Здесь τ^{ij} — тензор вязких напряжений, λ — коэффициент теплопроводности, остальные обозначения общепринятые. Видно, что изменение полной энталпии (а следовательно, и температуры торможения T_0) в жидкой частице связано с действием диссипативных механизмов (вязкости и теплопроводности), а также с нестационарностью течения. В стационарном течении невязкого нетеплопроводного газа полная энталпия $i_0 = c_p T + V^2/2 = c_p T_0$

сохраняется вдоль линии тока (интеграл Бернулли) и энергоразделение невозможно.

В докладе рассмотрены примеры течений, в которых в процессе энергоразделения существенную роль могут играть как эффекты теплопроводности, так и нестационарность потока. В первой части доклада обсуждаются пути повышения эффективности схемы энергоразделения стационарного газового потока, предложенной в [2]. В этой схеме часть газа, втекающего в энергоразделяющее устройство, проходит через сопло Лаваля и разгоняется до сверхзвуковой скорости. Далее, до- и сверхзвуковой потоки газа, имеющие одинаковые исходные параметры торможения и разделенные тонкой цилиндрической перегородкой, движутся в цилиндрическом канале. Вследствие теплообмена между до- и сверхзвуковым потоками осредненные температуры торможения на выходе из устройства в этих потоках могут различаться на несколько процентов. Основное преимущество такой схемы — малые потери полного давления. Эффект энергоразделения в данном случае обусловлен теплообменом между потоками газа, имеющими существенно различные скорости. В случае теплоизолированной пластины, разделяющей течения в до- и сверхзвуковом пограничных слоях, температура восстановления на различных сторонах пластины может заметно различаться. Соответственно, при замене теплоизолированной пластины теплопроводной перегородкой происходит теплообмен между разделенными течениями, что приводит к появлению разности осредненных температур торможения в газе, прошедшем до- и сверхзвуковой пограничные слои. В докладе представлены результаты параметрических численных расчетов течения в до- и сверхзвуковом ламинарных пограничных слоях, разделенных теплоизолированной, а также теплопроводной плоской стенкой. Показано, что для течений чистого газа эффективность энергоразделения может быть существенно повышена (разность средних температур торможения в потоках по обе стороны пластины, отнесенная к исходной температуре торможения может достигать 7%) при использовании смесей газов с малыми числами Прандтля ($\text{Pr} \sim 0.2$). Исследована возможность резкого повышения эффективности энергоразделения за счет примеси жидкых капель в сверхзвуковом пограничном слое. Рассмотрены режимы течения с наличием и отсутствием испарения капель. На основании численных расчетов в рамках модели двухфазного пограничного слоя показано, что для нор-

мальных газов (с числами Прандтля, как у воздуха) присутствие даже очень малых (порядка процентов) массовых концентраций жидкой конденсированной фазы в высокоскоростном пограничном слое может приводить к значительному снижению температуры восстановления на адиабатической стенке и резкой (до 10%) интенсификации процесса энергоразделения в случае теплопроводной стенки [3-4].

Во второй части доклада, на примере задачи поперечного обтекания круглого цилиндра сжимаемым вязким газом в режиме периодического схода вихрей в ближний след, исследуется влияние нестационарности течения на процесс энергоразделения. На основе прямого численного решения двумерных уравнений Навье–Стокса для чисел Маха ≤ 0.6 и чисел Рейнольдса $\leq 10^3$ исследована динамика зон повышенной и пониженной температуры торможения в ближнем следе за цилиндром [5]. Подтвержден и объяснен парадоксальный экспериментальный факт снижения равновесной температуры поверхности адиабатического цилиндра вблизи задней критической точки до температур ниже статической температуры набегающего потока [6]. Проведен детальный анализ роли различных диссипативных механизмов, а также нестационарности течения на распределение осредненной по времени температуры торможения газа в ближнем следе. Сформулированы некоторые идеи о возможности управления процессом энергоразделения в нестационарных газовых потоках.

Работа поддержана грантом РНФ № 14-19-00699.

Литература

1. Eiasma-ard S., Promvonge P. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes // Renewable and sustainable energy reviews. 2008. V. 12. N7. P. 1822-1842.
2. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35. №1. С. 157-159.
3. Азанов Г.М., Осищцов А.Н. Влияние мелких испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // Изв РАН. МЖГ. 2016. №4. С. 67-78.
4. Azanov G.M., Osipov A.N. The efficiency of one method of massless gasdynamic energy stratification in a gas flow // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 1125-1133.

5. Aleksyuk A.I., Osiptsov A.N. Direct numerical simulation of energy separation effect in the near wake behind a circular cylinder // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017 (in press).
6. Eckert E., Weise W., Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angeströmter unbeheizter Körper // Forschung im Ingenieurwesen. 1942. V 13. N6. P. 246-254.

Симметрии фундаментальных решений и их применение в механике сплошной среды

А. В. Аксенов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
aksenov.av@gmail.com*

Симметрии линейного уравнения с частными производными с δ -функцией в правой части называются симметриями фундаментальных решений. Соответствующая им группа непрерывных преобразований переводит фундаментальное решение в фундаментальное. Отметим, что фундаментальные решения определены с точностью до решения однородного уравнения. В работе [1] было показано, что симметрии фундаментальных решений образуют подалгебру Ли симметрий однородного уравнения. В работе также были предложены метод нахождения симметрий фундаментальных решений и алгоритм построения инвариантных фундаментальных решений. В настоящей работе представлены примеры применения симметрий фундаментальных решений в механике сплошной среды.

Показано, что симметрии фундаментальных решений линейного гиперболического уравнения второго порядка с двумя независимыми переменными оставляют инвариантной функцию Римана сопряженного уравнения. Предложен метод построения функции Римана.

Система уравнений одномерной газовой динамики для степенной зависимости давления от плотности в переменных годографа сводится к гиперболическому уравнению Эйлера–Пуассона–Дарбу (ЭПД). Найдены симметрии фундаментальных решений и