

УДК 533.7;533.5

МЕДЛЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ПРИ СИЛЬНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ

© 2011 г.

А.И. Ерофеев, О.Г. Фридлендер

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

o.friedlander@g23.relcom.ru.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Исследовано объемное действие температурных напряжений в газе в режимах течения газа как сплошной среды и в переходном режиме течения. Обнаружен ряд новых явлений: течение газа под действием температурных напряжений в отсутствие других причин конвекции, силовое взаимодействие нагретых/охлажденных аэрозольных частиц в покоящемся газе, отрицательное сопротивление сильно нагретой/медленно движущейся частицы. Экспериментально подтверждено действие температурных напряжений. Теоретически и численно изучено состояние газа около тонких проницаемых мембран, а также движение газа сквозь них. Обнаружены граничные слои Кнудсена нового типа, примыкающие к поверхностям мембран. Определен скачок температуры поперек слоя Кнудсена нового типа, возникающий вследствие теплового потока внутри мембраны.

Ключевые слова: медленные течения газа, уравнение Больцмана, температурные напряжения, проницаемые неизотермические мембраны.

1. Действие температурных напряжений в медленных течениях

Ранние теоретические исследования медленных течений газа в режиме сплошной среды велись, в основном, в рамках линейного по градиентам температуры приближения. Предполагалось, что уравнения Навье–Стокса удовлетворительно описывают течения простого одноатомного газа в этом режиме. Считалось также, что температурные напряжения, существование которых теоретически было предсказано еще Дж.К. Максвеллом, а строгий вывод дан Д. Барнеттом, всегда малы по сравнению с вязкими напряжениями. При нелинейном анализе медленных неизотермических течений газа как сплошной среды оказалось, что требуется пересмотр самих уравнений движения [1].

Теоретически было показано, что в режиме сплошной среды даже в случае простого одноатомного газа, существует класс течений, где температурные напряжения приводят не к малым поправкам, а являются определяющими. Это класс медленных неизотермических течений газа как сплошной среды при сильной теплопередаче (число Рейнольдса порядка или меньше единицы, число Кнудсена много меньше единицы, относительные перепады температуры, вызванные внешними потоками тепла, порядка единицы).

Температурные напряжения всегда имеют второй порядок малости по числу Кнудсена:

$$p_{ij}^T \sim \left(\frac{\mu^2}{\rho T} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_j}, \frac{\mu^2}{\rho T^2} \frac{\partial T}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \sim p \text{Kn}^2.$$

Необходимость учета действия температурных напряжений объясняется тем, что и вязкие напряжения в медленных течениях, когда число Маха мало ($M \ll 1$), а число Рейнольдса по порядку величины равно единице, имеют тот же, второй порядок по числу Кнудсена. Действительно, скорость в таких течениях имеет порядок величины $u \sim \mu / \rho L \sim a \text{Kn}$ (a – скорость звука, L – характерный размер течения). При этом напряжения сдвига (вязкие напряжения) можно оценить так:

$$p_{ij}^u \sim \mu u / L \sim \mu^2 / \rho L^2 \sim p \text{Kn}^2 \sim p_{ij}^T.$$

При теоретическом исследовании таких течений был обнаружен ряд парадоксальных эффектов. Во-первых, было обнаружено, что даже в отсутствие массовых сил и внешних перепадов давления в температурно-неоднородных газах температурные напряжения вызывают движение газа (за исключением случаев полной симметрии границ потоков). Во-вторых, нагретые или охлажденные частицы, температура поверхности которых однородна, отталкиваются друг от друга. В-третьих, при Стоксовом обтекании ($\text{Re} \ll 1$) сильно нагретой ($(T_w - T_\infty) / T_\infty \sim 1$) сферической частицы, температура поверхности которой однородна, на эту частицу действует не сила сопротивления, а ускоряющая движение частицы сила. Кроме того, было показано, что теплопередача в газе не описывает-

ся уравнением Лапласа, и необходимо учитывать конвективный перенос тепла даже в том случае, когда внешние причины движения газа отсутствуют (т.е. отсутствуют вынужденная и гравитационная конвекции). Эти течения вызываются действием на газ температурных напряжений в объеме газа. Их действие приводит к силам, действующим на частицы, порядка $\rho L^2 \text{Kn}^2$. Значимость этих исследований подтверждена регистрацией работ как открытия.

Границы применимости развитой асимптотической теории были определены при численном решении кинетического уравнения для трех типов задач: квазиодномерных течений около пластин, сил взаимодействия нагретых/охлажденных аэрозольных частиц и течений в капилляре с заданным профилем температуры поверхности (в связи с исследованиями по экспериментальному обнаружению действия температурных напряжений). Экспериментальные исследования подтвердили их действие в газах [2, 3]. И экспериментальные, и расчетные кинетические исследования медленных течений требуют (вследствие малости скоростей течений и сопутствующих им перепадов давления) повышенной, по сравнению с обычной, точности измерений и выполнения расчетов.

2. Кинетические скачки около тонких проницаемых мембран

До сих пор считалось, что граничные условия скольжения (и граничные кнудсеновы слои) могут быть следствием процессов переноса в газе вблизи поверхности (т.е. градиентов скорости, температуры, концентраций компонент и нормальной к поверхности составляющей скорости в случае испарения-конденсации). Такое представление опиралось на доказанное утверждение: при выполнении условий взаимности для рассеяния молекул от поверхности и в отсутствие процессов переноса в газе вдали от поверхности, газ должен находиться в равновесии во всем пространстве около твердого тела. При исследовании течений газа вблизи проницаемых тел обнаружена возможность существования кнудсеновых слоев нового типа, слоев при отсутствии градиентов параметров вне проницаемого тела (квазиравновесных кнудсеновых слоев), когда газ на расстоянии нескольких длин свободного пробега молекул от поверхности находится в равновесии (отсюда название слоев). Неравновесность на границе газ/пористая среда создается не неравновесностью падающих из объема газа молекул, а неравновесным процессом, происходящим в пористой среде

(тепловой поток). Этот процесс переноса приводит к нарушению условий взаимности (детального баланса) на границе газ/пористая среда даже при равновесном состоянии газа у поверхности (это явление – реальное воплощение «демона Максвелла», сортирующего молекулы и вносящего неравновесность). Существование нового типа слоя Кнудсена приводит к новому виду скачка температуры у поверхности неизотермических пористых тел, пропорциональному градиенту температуры не в газе, а внутри пористого тела.

Течения сквозь тонкие изотермические перфорированные мембраны значительно отличаются от течений в отдельных каналах, вследствие образования вблизи поверхностей слоев Кнудсена нового типа, сходных со слоями при испарении/конденсации. Существование этих слоев приводит к скачкам давления поперек слоев Кнудсена и к изменению связи между перепадом давления по обе стороны мембраны и расходом газа сквозь нее. Эти же слои Кнудсена приводят к появлению эффекта охлаждения идеального газа при продавливании сквозь тонкую мембрану (не путать с эффектом Джоуля–Томсона для реального газа).

При расчетно-теоретическом изучении течений сквозь тонкие мембраны с помощью кинетического уравнения Больцмана установлено общее граничное условие температурного скачка на поверхности проницаемого неизотермического тела [4]. При исследовании задачи о температурных скачках около бесконечно тонкой мембраны, найдено «почти точное» решение нелинейного уравнения Больцмана [5], которое может служить тестом для численных методов исследования медленных течений в кинетическом режиме, а также при построении обобщенных нелинейных теорий термодинамики необратимых процессов.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты №05-01-00792, 08-01-00556, 11-01-00346).

Список литературы

1. Коган М.Н., Галкин В.С., Фридендер О.Г. // Успехи физических наук. 1976. Т. 119, №1. С. 111–125.
2. Freedlander O.G. // Arch. Mech. 1990. V. 42, No 4-5. P. 475–482.
3. Alexandrov V., Friedlander O., Nikolsky Yu. Rarefied Gas Dynamics // AIP Conf. Proc. 2003. V. 663. P. 250–257.
4. Ерофеев А.И., Коган М.Н., Фридендер О.Г. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. №1. С. 152–166.
5. Ерофеев А.И., Фридендер О.Г. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. №6. С. 156–165.

SLOW GAS FLOWS AT STRONG HEAT TRANSFER*A.I. Erofeev, O.G. Friedlander*

Bulk action of thermal stresses in a gas for continuum and transition flow regimes is studied. A set of new effects were revealed: gas flows due to thermal stresses in the absence of other causes of convection, force interaction of heated/cooled aerosol particles in a gas at rest, negative drag of strongly heated slowly moving particle. The effect of thermal stresses was confirmed experimentally. Gas states in the vicinity of thin permeable membranes and flows through them were studied theoretically and numerically. New types of Knudsen boundary layers adjusted to membrane surfaces were revealed. A temperature jump across Knudsen layer of new type resulting from the heat flux inside membrane was determined.

Keywords: slow gas flows, Boltzmann equation, temperature stresses, permeable non-isothermal membrane.