

фектом прилипания. С увеличением Re дробь $(\tau_{12}/\omega)_w$ убывает по модулю. На линии торможения вихрь скорости равен $\omega_* = -xv_{\infty}/(2\zeta^2)$, а это означает, что поперечный градиент завихренности, параллельный стенке, обладает свойствами: 1) он весьма чувствителен к эффекту скольжения на стенке, инициирующей обратное течение; 2) выражение ω_* не зависит от реологических свойств жидкости; 3) формула для ω_* включает в себя информацию о свойствах течения по обе стороны линии торможения (слева $-v_{\infty}$, справа $-\zeta$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабловский О.Н. Влияние релаксации вязких напряжений на вихревое течение несжимаемой жидкости // Гидромеханика. Киев: Наукова думка, 1991. № 63, - с. 35-38.
2. Шабловский О.Н. Нелинейный теплоперенос при течении вязкоупругой жидкости через пористую поверхность // Реофизика и теплофизика неравновесных систем. Ч. 1. Матер. Международ. шк.-семина. Минск: АНК ИТМО АН ВССР, 1991, - с. 151-153.
3. Шабловский О.Н. Исследование неизоэнтальпических свойств завихренности при движении вязкоупругой жидкости // Инж.- физ. журн. 1991. Т. 60. № 3, - с. 499.
4. Шабловский О.Н. Стационарный сильный разрыв в потоке неоднородной жидкости и условия изменения типа уравнения для завихренности // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./ АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т гидродинамики. 1992. Вып. 105: Акустика неоднородных сред, - с. 249-253.
5. Шабловский О.Н. Динамические и тепловые свойства вихря скорости на сильном разрыве в потоке вязкой релаксирующей жидкости // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр./ РАН. Сиб. отд.-е. Ин-т Гидродинамики. 1995. Вып. 110: Акустика неоднородных сред, - с.177.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ В ТЕОРИИ РЕЛАКСАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА

О.Н.Шабловский

Гомельский политехнический институт им. П.О.Сухого (Гомель)

Задачи нестационарной газовой динамики имеют важные практические приложения. Это обстоятельство стимулировало сильное развитие аналитических и численных методов интегрирования квазилинейных систем уравнений в частных производных гиперболического типа. Представляется естественным стремление распространить и развить методы нестационарной газодинамики в другой области нелинейной физики, а именно: в теории переноса тепловой энергии в локально-неравновесных условиях [1]. Подробный анализ гиперболической модели теплопереноса и возникающих нелинейных эффектов имеется в [2-7]. В данном докладе излагаются новые результаты исследований по этой проблеме.

1. Уравнения релаксационного теплопереноса запишем в форме

$$u_t = -q_x, \quad L_x + q_t = -q/\gamma, \quad L = L(u),$$

$$du/dT = c(T), \quad dL/du = w^2 = \lambda/(c \gamma),$$

где C – удельная объемная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, t – время, x – декартова координата, Y – время релаксации теплового потока q . Эта система по форме записи близка к уравнениям одномерного нестационарного изоэнтальпического течения газа в лагранжевых координатах ξ , t :

$$u_\xi = v_t, \quad u_t = -p_\xi, \quad p = p(v),$$

где u – скорость одномерного движения газа, v – удельный объем, p – давление. В записи обеих систем уравнений независимые переменные в роли нижних индексов означают частное дифференцирование. Аргументам и функциям, определяющим теплоперенос $\{t; x; u; q; L\}$ соответствуют газодинамические параметры $\{t; \xi; v; -u; -p\}$. В связи с внешним сходством уравнений релаксационного теплопереноса с уравнениями газодинамики нужно сказать, что применение к тепловым задачам известных газодинамических решений, рассматриваемых как формальные математические решения соответствующих уравнений, требует творческого переосмысления. Во-первых, рассматриваемые системы уравнений не совпадают полностью: присутствие дополнительных слагаемых в тепловой модели значительно затрудняет реализацию известных в газодинамике алгоритмов, требует их модификации. Во-вторых, нужно дать полученным решениям новую – теплофизическую интерпретацию.

2. Установлены качественные и количественные закономерности взаимосвязи температурного градиента неравномерно нагретой среды, в которой распространяется тепловая волна (ТВ), с градиентом температуры в возмущенной области. Оказалось, в частности, что существуют процессы, где эта связь имеет немонотонный характер. В нелинейной бегущей ТВ изучено воздействие на $\text{grad}T$ коэффициента теплопроводности $\lambda = \lambda(T)$ и времени релаксации $Y = Y(T)$: установлено, что зависимость градиента от Y более чувствительна к зна-

ку $d\lambda/dT$ по сравнению с влиянием dY/dT на связь $\text{grad}T$ с λ .

Представлен класс плоских двумерных ТВ (фронт волны – замкнутая линия на плоскости), для которых обнаружено явление возникновения (сходящаяся волна) и отсутствия (расходящаяся волна) градиентной катастрофы. Для данного типа волн этот эффект не зависит от теплофизических нелинейностей среды.

3. Найдены условия возникновения колебательно-релаксационных процессов в нелинейных средах при наличии объемных источников (стоков) энергии. Затухающие колебания температуры и теплового потока могут происходить не только по времени (случай плоской симметрии), но и по логарифмической радиальной координате (цилиндрическая и сферическая симметрии). При объемном выделении энергии колебания могут происходить только в плоском случае, а при стоке тепла – только для полей с радиальной симметрией. Для всех трех видов симметрии с увеличением модуля источникового члена период колебаний во времени быстро уменьшается.

Вычислены критические значения параметра неоднородного, т.е. зависящего явно от пространственной координаты, источника энергии, в области которых происходят бифуркационные изменения теплофизической системы «среда-объемный источник энергии». Точке бифуркации соответствует сложное состояние равновесия «седло-узел». Для тепловых полей в плоской кольцевой области существует бифуркационное значение параметра нелинейного объемного стока, при котором происходит рождение предельного цикла из петли сепаратрисы.

Построен физически содержательный набор дивергентных форм уравнений релаксационного теплопереноса, выражающих некоторые характерные законы сохранения. Для ударных ТВ охлаждения и нагревания установлены закономерности поведения производства энтропии за фронтом разрыва.

4. Полученные теоретические результаты применены к описанным в литературе реальным тепловым процессам, изучавшимся экспериментально: а) кинетика теплового импульса в олигомере ПМС-400 и глицерине (А.П.Дринь, Н.И.Шут, 1991); б) температурная зависимость теплового импульса, прошедшего через кристалл сапфира (Р.Гутфельд, 1968); анализ формы импульса выполнен при трех температурах $T = 6, 18, 23$ К; в) распространение волн второго звука в жидком гелии (А.Ю.Изнанкин, Л.П.Межов-Деглин, 1983); сравнение проведено при четырех температурах $T = 1,609; 1,677; 1,759; 1,860$ К. Результаты сравнения удовлетворительные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаровский Л.В., Шабловский О.Н. Аналитическое исследование некоторых внутренних задач нестационарной газовой динамики и переноса тепла. Томск: Изд-во ун-та. 1981. – 208 с.
2. Шабловский О.Н. О распространении тепловых волн в параметрических средах // Гидромеханика. Киев: Наукова думка, 1983. № 48, – С. 55-57.
3. Шабловский О.Н. Сильные разрывы температурного поля в нелинейной среде // Инж.- физ. журн. 1984. Т. 46. № 5, – С. 832-836.
4. Шабловский О.Н. Распространение плоской ударной тепловой волны в нелинейной среде // Инж.- физ. журн. 1985. Т. 49. № 3, – С. 436-443.
5. Шабловский О.Н. К исследованию нелинейных задач высокоинтенсивного нестационарного теплопереноса // Инж.- физ. журн. 1987. Т. 52. № 2, – С. 309-316.
6. Шабловский О.Н. О тепловом гистерезисе в нелинейных средах // Инж.- физ. журн. 1990. Т. 59. № 1, – С. 149-155.
7. Шабловский О.Н. Нелинейные волновые задачи релаксационного теплопереноса // Газовая динамика. Томск: НИИ прикл. матем. и механики. Университет. 1991, – С. 91-98.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТИВОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

В.И.Кузнецов, В.В.Макаров, А.Б.Яковлев

Омский государственный технический университет (Омск)

В работах [1, 2] говорится о том, что при вводе со стороны дросселя в приосевую зону противоточной вихревой трубы незакрученного дополнительного потока газа, весь этот поток или его часть выходит через диафрагму и в процессе его движения от горячего конца к диафрагме происходит энергообмен между осевыми и периферийными слоями газа за счет радиальных турбулентных пульсаций. При этом не было экспериментально доказано, что через диафрагму выходит именно тот газ, который вошел в вихревую трубу в качестве дополнительного потока.

Проведенные исследования [3] с визуализацией процессов в вихревой трубе с дополнительным потоком показали, что дополнительный поток, введенный в вихревую трубу без