

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА

Изучено влияние молекулярных (термодинамических) свойств газа на качественные и количественные характеристики газодинамических эффектов в расширяющемся канале (со сверхзвуковым потоком) при импульсно-периодическом подводе энергии. В качестве термического уравнения состояния и других термодинамических свойств газа взяты уравнения для реального газа (с параметрами воздуха) с учетом возбуждения колебаний, диссоциации и однократной ионизации. Показано, что качественно эффекты не зависят от учета молекулярных свойств, но наличие внутренних степеней свободы приводит к потерям в силе тяги порядка 30 % как для импульсного, так и для непрерывного режима подвода энергии.

*Ключевые слова:* сверхзвуковой поток, канал, импульсный подвод энергии, термодинамические свойства воздуха.

### Введение

В работе [1] при исследовании газодинамических эффектов импульсно-периодического подвода энергии использовалась модель идеального газа. Однако рассмотренный в [1] подвод энергии приводит к высокому уровню температур (до десяти тысяч градусов). При таких температурах становятся существенными возбуждение колебательного движения молекул, их диссоциация, электронное возбуждение, а также ионизация. Модель идеального газа оказывается непригодной.

Вместе с тем полученные в [1] газодинамические эффекты энергоподвода настолько интересные, что возникает необходимость изучения их с учетом реальных свойств газа (в данном случае воздуха).

Распространено заблуждение о том, что с точки зрения эффективности стационарный подвод энергии является оптимальным по сравнению с импульсно-периодическим ее подводом. Однако в работе [2] при исследовании сверхзвукового обтекания полусферы ( $M_\infty = 3$ ) с пульсирующим источником энергии перед ней обнаружено существование минимума сопротивления полусферы при изменении частоты следования импульсов

подводимой энергии. На основании этого сделан вывод: режим пульсирующего энергоподвода может быть эффективнее стационарного. Глубина найденного в [2] минимума оказалась небольшой. В экспериментах [3] минимум не обнаружен.

Аналогичный эффект получен в [4] при исследовании обтекания крылового профиля NASA-0012 в трансзвуковом режиме ( $M_\infty = 0,85$ ) с импульсно-периодическим подводом энергии в узкой зоне вблизи поверхности профиля. В одном из вариантов при непрерывном постоянном подводе энергии стационарное решение так и не установилось. Величина коэффициента волнового сопротивления профиля колебалась около среднего значения, которое на 20 % было больше величины коэффициента сопротивления в периодическом решении, полученном для тех же удельного энергоподвода и положения источника энергии.

Первые результаты для канала переменного сечения, представленные в [1], показали, что удельная сила, действующая на стенки канала со стороны сверхзвукового потока, может существенно зависеть от длительности импульса при периодическом подводе энергии. При этом в случае импульсов малой длительности получено на-

много более высокое значение удельной силы по сравнению со стационарным подводом энергии.

В данной работе изучается влияние импульсно-периодического подвода энергии в расширяющемся канале на газодинамику течения с учетом реальных свойств воздуха. Было очевидно, что потери энергии импульсов, вызванные поглощением энергии внутренними степенями свободы, приведут к уменьшению силы тяги. Однако количественные показатели данного ослабления не были очевидными.

Рассматриваемая задача связана с проблемой создания газодинамических силовых установок, в частности лазерных ракетных двигателей (см., например: [5; 6]).

### Постановка задачи

Моделируется нестационарное течение в плоском канале переменного сечения с распределенным подводом энергии. Решаются уравнения Эйлера в «канальном» приближении для газа с учетом реальных свойств и для сравнения с постоянным показателем адиабаты  $\gamma$ . «Канальное» приближение позволяет получить значения интегральных характеристик течения, близкие к оптимальным, поскольку на выходе из канала течение равномерное. Для плоского случая эти уравнения имеют вид [7]

$$\begin{aligned} \partial U / \partial t + \partial F / \partial x &= Q, \\ U &= (\rho u, \rho u, e u), \\ F &= (\rho u, (p + \rho u^2) u, u(p + e) u), \\ Q &= (0, p dy / dx, qy). \end{aligned}$$

Полуширина канала задается уравнением  $y = y(x)$ . Координата  $x$  направлена вдоль канала и отнесена к его полуширине  $d$  на входе; время  $t$  отнесено к  $d / a_0$ , скорость газа  $u$  и скорость звука  $a$  – к  $a_0$ , плотность  $\rho$  – к  $\rho_0$ ; давление  $p$  и полная энергия единицы объема газа  $e$  обезразмерены с помощью величины  $\rho_0 a_0^2$ ;  $q$  – мощность, подводимая к единице объема газа, отнесена к величине  $\rho_0 a_0^3 / d$ ;  $p_0$  и  $a_0$  – размерные давление и скорость звука в потоке на входе в канал, величина  $\rho_0$  определяется из условия  $p_0 = \rho_0 a_0^2$ .

Для модели идеального газа

$$\begin{aligned} p &= (\gamma - 1) \cdot (e - 0.5 \cdot \rho (u^2 + v^2)), \\ a^2 &= T = \gamma p / \rho. \end{aligned}$$

При учете реальных термодинамических свойств воздуха используются аналитические выражения для удельной энтальпии  $h$

и плотности  $\rho$  через давление  $p$  и температуру  $T$  [8]:

$$\rho = \rho(p, T), \quad h = h(p, T).$$

Эти выражения пригодны по температурам от 200 до 20 000 К и по давлениям от 0,001 до 1000 атм.

Скорость звука вычисляется по формуле

$$a^2 = \left( \left( \frac{\partial p}{\partial p} \right)_T - \frac{T}{\rho^2} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_p^2 / \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \right)^{-1}.$$

Сравнение с табличными данными [9–11] показало, что в указанных диапазонах температуры и давления относительные отклонения по энтальпии не превышали 3 %, по плотности – 1,5 %, по скорости звука отклонения составляли около 1 % до температур 10 000 К. Используемые термодинамические свойства [8] учитывают возбуждение колебаний молекул, их диссоциацию и однократную ионизацию.

Подвод энергии осуществляется в расширяющейся части канала в заданном интервале координат  $[x_1, x_2]$ . Величина подводимой мощности  $q$  (средней за период при периодическом ее подводе) определяется из сравнения с мощностью, выделяющейся при полном сгорании водорода в прямоточном воздушно-реактивном двигателе. Это дает интегральное уравнение для нахождения  $q$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{x_1}^{x_2} q y dx = \gamma M_0 Q \Delta t,$$

где  $\Delta t$  – период;  $M_0$  – число Маха потока на входе в канал. Величина  $Q = Hu / a_0^2$  ( $Hu$  – калорийность водорода) зависит от числа Маха  $M_\infty$  полета (так же, как и  $M_0$ ). Эти величины задаются. Для  $q$  в случае периодического подвода энергии используется следующая зависимость от времени:

$$q(x, t) = q_0(x) \sum_n \delta(t - n\Delta t),$$

где  $\delta(t)$  – импульсная функция Дирака.

Произведение  $q_0(x)u$  предполагается постоянным. В результате для  $q_0(x)$  получено выражение

$$q_0(x) = \gamma \cdot M_0 \cdot Q / (x_2 - x_1) / y \cdot \Delta t.$$

При непрерывном подводе энергии величина  $q$  полагается не зависящей от времени.

Для решения задачи на входе в канал задаются параметры невозмущенного потока, на выходе при сверхзвуковых скоростях используется линейная экстраполяция [7]. В качестве начальных условий используется стационарное течение газа при отсутствии подвода энергии.

Для численного решения задачи применяется метод Маккормака с искусственной вязкостью четвертого порядка малости.

В ходе решения задачи вычисляется средняя за период удельная сила  $f$  (отношение силы, действующей на стенки канала, к расходу воздуха).

### Результаты расчетов

Расчеты проведены для параметров, соответствующих условиям перед камерой сгорания прямоточного двигателя для числа Маха полета  $M_\infty = 12$  на высоте 10 км при десятикратном сжатии струи в воздухозаборнике:  $M_0 = 4$ ; давление  $p = 1$ ; температура  $T = 1$  (размерная температура 1 500 К); плотность газа  $\rho = \gamma = 1,2927$  (параметры на входе в канал). Канал имеет общую длину, равную двум. На участке длиной 0,8 его сечение постоянное (полуширина равна единице). Далее канал равномерно расширяется до  $y = 2$ . Параметры источника энергии:  $x_1 = 1$ ;  $x_2 = 1,02$ ;  $Q = 6,234$ ; период (при импульсно-периодическом подводе энергии)  $\Delta t = 0,01$ . Получены удельная сила, действующая на стенки канала, и распределение параметров течения по длине канала для непрерывного и импульсно-периодического подвода энергии с учетом реальных термодинамических свойств воздуха и по модели идеального газа.

В таблице представлены значения удельной силы, полученные при использовании обеих моделей газа:

Модель	Идеальный газ		Реальный газ	
$f$	0,5034	0,3688	0,3647	0,3147

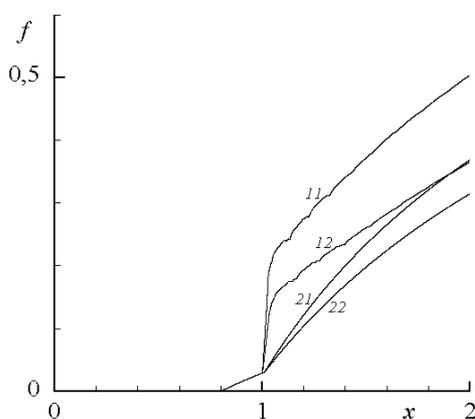


Рис. 1. Формирование удельной силы по длине канала

Для каждой модели в левой колонке приведены значения силы при импульсно-периодическом подводе энергии, в правой – при непрерывном ее подводе. Импульсно-периодический подвод энергии дает существенно более высокие значения удельной силы по сравнению с непрерывным энергоподводом. Однако для реальной модели удельная сила меньше.

На рис. 1 показано, как нарастает значение удельной силы по длине расширяющейся части канала (первая цифра у кривых определяется режимом подвода энергии: 1 соответствует импульсно-периодическому подводу, 2 – непрерывному; вторая цифра связана с моделью газа: 1 – для идеального газа, 2 – для реальных свойств). До зоны подвода энергии происходит адиабатический рост удельной силы, в зоне давления возрастает. Более высокий уровень давления ведет к более высокому темпу роста удельной силы. При этом в импульсно-периодическом режиме подвода энергии из-за периодически возникающих сильных ударных волн уровень давления оказывается выше, чем при непрерывном ее подводе. Скорость увеличения удельной силы резко возрастает. В конечном счете удельная сила при импульсно-периодическом энергоподводе становится значительно выше.

Однако учет реальных термодинамических свойств газа приводит к уменьшению этой силы. Значительная часть энергии закачивается во внутренние степени свободы. На рис. 2 показано изменение температуры по длине канала с использованием при расчетах модели идеального газа (рис. 2, а) и реальных свойств воздуха (рис. 2, б). Кривые 1 соответствуют импульсно-периодическому подводу энергии, кривые 2 – непрерывному. Уровень температуры в случае применения модели реальных термодинамических свойств существенно ниже. Это ожидаемый результат. На возбуждение колебательного движения молекул, диссоциацию, ионизацию тратится значительная энергия. Вместе с тем при непрерывном энергоподводе температура заметно ниже, чем при импульсно-периодическом ее подводе для обеих моделей. Более высокий нагрев потока вызван возникающими ударно-волновыми структурами, индуцированными импульсно-периодическим энерговыделением. Кривые 1 на рис. 2 получены для момента времени, предшествующего подводу

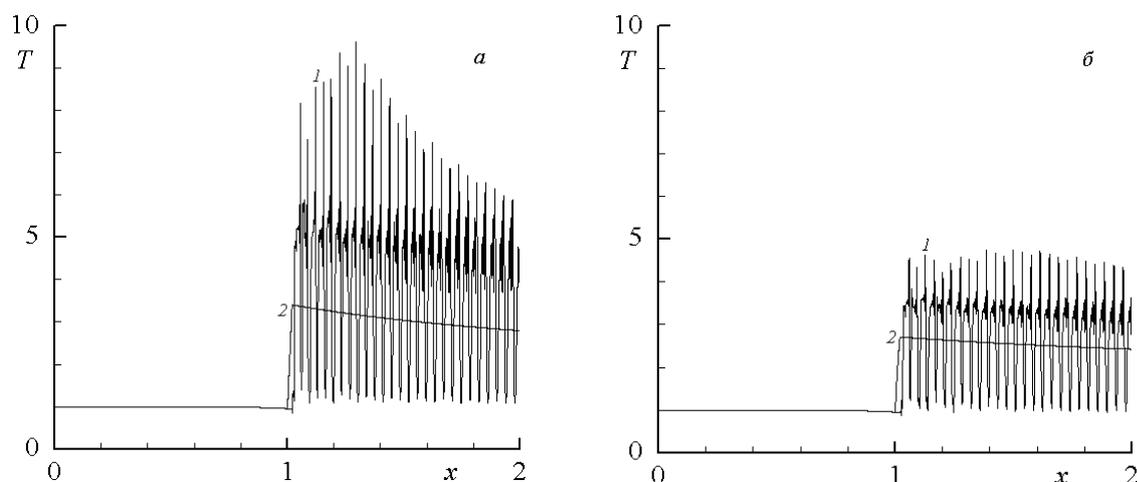


Рис. 2. Распределение температуры по длине канала для идеального газа (а) и воздуха (б)

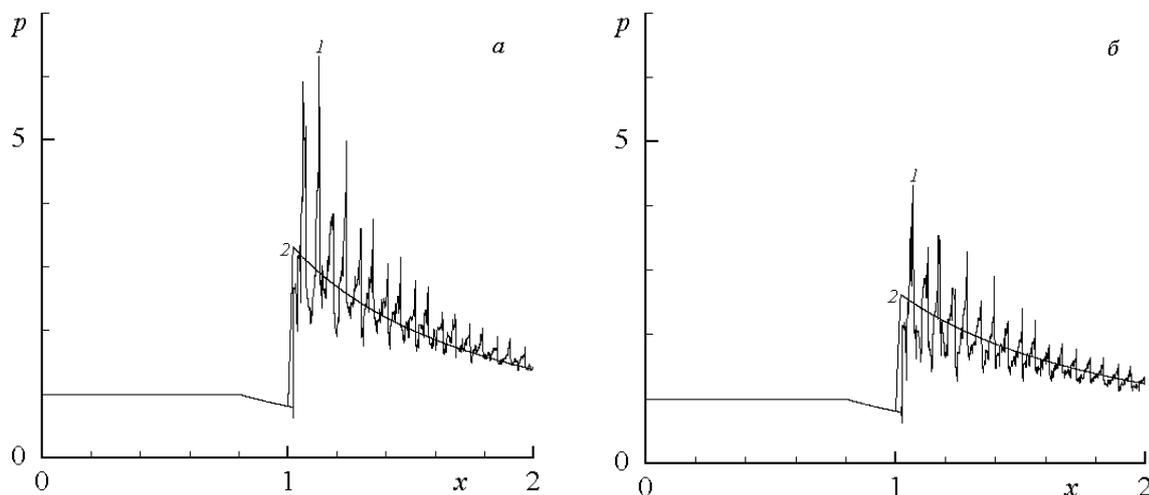


Рис. 3. Распределение давления по длине канала для идеального газа (а) и воздуха (б)

энергии. Ударные волны, возникающие непосредственно после подвода энергии, сильнее, и уровень температур еще выше, тогда как при непрерывном энергоподводе распределение температур постоянное.

На рис. 3 представлены распределения давления по длине канала для импульсно-периодического подвода энергии (кривая 1) и для непрерывного ее подвода (гладкая кривая 2).

В целом уровень давления на стенки канала при импульсно-периодическом подводе энергии оказывается высоким. Это приводит к тому, что средняя удельная сила  $f$ , действующая на стенки канала, выше при импульсно-периодическом подводе энергии,

что демонстрируют данные, представленные в таблице и на рис. 1. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что импульсно-периодический подвод энергии может быть эффективнее непрерывного. При учете реальных свойств воздуха уровень давления снижается, и удельная сила несколько меньше.

### Заключение

Таким образом, учет реальных термодинамических свойств воздуха приводит к более низким значениям удельной силы по сравнению с моделью идеального газа. Однако и в этом случае импульсно-периоди-

ческий подвод энергии может дать более высокую удельную силу по сравнению с непрерывным энергоподводом.

### Список литературы

1. *Замураев В. П., Калинина А. П.* Газодинамические эффекты в расширяющемся канале при подводе энергии импульсами конечной длительности // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 7. С. 8–14.

2. *Гувернюк С. В., Самойлов А. Б.* Об управлении сверхзвуковым обтеканием тел с помощью пульсирующего теплового источника // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, вып. 9. С. 1–8.

3. *Третьяков П. К., Гаранин А. Ф., Грачев Г. Н. и др.* Управление сверхзвуковым обтеканием тел с использованием мощного оптического пульсирующего разряда // Докл. РАН. 1996. Т. 351, № 3. С. 339–340.

4. *Аульченко С. М., Замураев В. П., Калинина А. П.* Нелинейные эффекты взаимодействия импульсного периодического подвода энергии и ударно-волновой структуры при трансзвуковом обтекании крыловых профилей // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 1. С. 6–11.

5. *Мирабо Л., Райзер Ю. П., Суржиков С. Т.* Лазерные волны горения в соплах Лаваля // ТВТ. 1995. Т. 33, № 1. С. 13–23.

6. *Аполлонов В. В., Тищенко В. Н.* Механизм объединения ударных волн в лазер-

ном воздушно-реактивном двигателе // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 12. С. 1143–1146.

7. *Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

8. *Крайко А. Н.* Аналитическое представление термодинамических функций воздуха // Инженерный журнал. 1964. Т. 4, № 3. С. 548–550.

9. *Предводителев А. С., Ступоченко Е. В., Плешанов А. С. и др.* Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 200 до 6 000°K и давлений от 0,00001 до 100 атмосфер). М., 1962. 268 с.

10. *Предводителев А. С., Ступоченко Е. В., Самуйлов Е. В. и др.* Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 6 000 до 12 000°K и давлений от 0,001 до 1 000 атмосфер). М.: Изд-во АН СССР, 1957. 302 с.

11. *Предводителев А. С., Ступоченко Е. В., Плешанов А. С. и др.* Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 12 000 до 20 000°K и давлений от 0,001 до 1 000 атмосфер). М.: Изд-во АН СССР, 1959. 230 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.05.2009*

V. P. Zamuraev, A. P. Kalinina

### GASDYNAMIC EFFECTS OF PERIODIC PULSE ENERGY SUPPLY IN WIDENING CHANNEL WITH CONSIDERATION OF AIR REAL PROPERTIES

The impact of molecular (thermodynamic) gas properties on qualitative and quantitative characteristics of gasdynamic effects in a widening channel (with supersonic flow) at periodic pulse energy supply has been studied. As thermal equation of state and other gas thermodynamic properties equations for real gas have been used (with air parameters) with consideration of excitation of oscillation, dissociation and single ionization. We show that qualitatively the effects do not depend on taking molecular properties into account, but the existence of inner degrees of freedom leads to losses in tractive force of about 30 per cent for both periodic pulse and steady modes of energy supply.

Keywords: supersonic flow, channel, periodic pulse energy supply, air thermodynamic properties