

03

## **Резонансное взаимодействие пульсирующего источника энергии с ударно-волновой структурой при трансзвуковом обтекании крыловых профилей**

© С.М. Аульченко, В.П. Замураев, А.П. Калинина

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет  
E-mail: zamuraev@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2010 г.

Изучалось взаимодействие импульсно-периодического источника энергии с замыкающим скачком уплотнения, возникающим около крыловых профилей на трансзвуковых режимах полета. На основе численного решения двумерных нестационарных уравнений газовой динамики исследована эволюция ударно-волновой структуры течения около симметричного профиля, установлен резонансный механизм взаимодействия, приводящий к значительному (на порядок величины) снижению волнового сопротивления профиля.

В [1] 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 [1] минимума оказалась небольшой. Аналогичный эффект получен в [2] при исследовании обтекания крылового профиля NASA-0012 на трансзвуковом режиме ( $M_\infty = 0.85$ ) с импульсно-периодическим подводом энергии в узкой зоне вблизи поверхности профиля перед невозмущенным положением замыкающего скачка уплотнения. Экстремум по частоте при рассмотренных в [2] значениях определяющих параметров получился также невыразительный, что, возможно, связано с моделью энергоисточника.

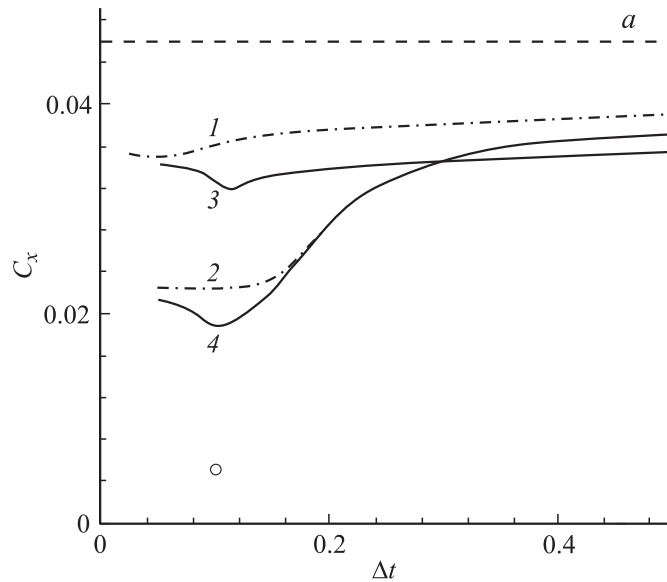
В [2] использовался подвод энергии, пропорциональный объему. Он применим, если состояние газа в зоне энергоподвода изменяется мало. Однако, например, при попытке получить стационарное решение в случае непрерывного энергоподвода эта модель теплового источника оказалась неприемлемой. Более реалистичной является модель с учетом зависимости поглощаемой энергии от плотности газа. Ожидается, что учет зависимости поглощения энергии газом от его плотности приведет к усилению нелинейных эффектов взаимодействия замыкающего скачка уплотнения, источника энерговыделения и поверхности профиля.

В данной работе исследуется зависимость оптимальной частоты подвода энергии от свойств источника энерговыделения, положения его, числа Маха набегающего потока. Особое внимание уделялось определению условий, при которых снижение коэффициента волнового сопротивления профиля было максимальным.

В качестве математической модели течения используется система двумерных нестационарных уравнений газовой динамики для идеального газа с показателем адиабаты  $\gamma$ . Для ее численного решения используется конечно-объемная схема, уменьшающая полную вариацию. В рассматриваемой модели импульсный подвод энергии осуществляется мгновенно, при этом изменения плотности газа и его скорости не происходят. Энергия подводится в тонкой зоне, прилегающей к профилю перед невозмущенным положением замыкающего скачка уплотнения. Рассматривается обтекание симметричного профиля под нулевым углом атаки. Достижение периодического решения устанавливается по среднему значению коэффициента сопротивления профиля  $C_x$ .

Расчеты проводились для профиля NASA-0012 при обтекании его под углом атаки  $\alpha = 0$  потоком с числами Маха  $M_\infty = 0.8$  и  $0.85$  для различных значений периода подвода энергии  $\Delta t$ .

Использовались две модели источника энерговыделения. В одной из них подводилась задаваемая полная мощность (подвод энергии пропорционален объему), в другой — удельная мощность (подвод энергии пропорционален локальной плотности газа). Использование первой модели источника оправдано, если в пределах зоны энергоподвода состояние газа однородное. В противном случае необходимо пользоваться второй моделью источника. Больше того, использование второй модели позволяет избежать неприятной ситуации, когда энергия должна подводиться в вакуум, который может возникнуть из-за разлета газа после предыдущего подвода энергии. При обтекании профиля NASA-0012



**Рис. 1.** Зависимость параметров обтекания профиля с подводом энергии от периода  $\Delta t$ :  $a$  — зависимость коэффициента волнового сопротивления  $C_x$ ,  $b$  — зависимость подводимой мощности  $\Delta N$ . Штриховая линия — обтекание без подвода энергии, штрихпунктирные линии — первая модель источника энергии, сплошные линии — вторая модель; кривые 1 и 3 — зона  $x = 0.609-0.693$ , кривые 2 и 4 — зона  $x = 0.433-0.528$ , точка — зона  $x = 0.3375-0.3468$  при  $\Delta t = 0.1$ .

в случае первой модели подводилась мощность  $\Delta N = 0.02$ , в случае второй — задавалась удельная мощность  $N = 400$ , что при подводе энергии с периодом  $\Delta t = 0.05$  в зоне с координатами  $x = 0.433-0.528$  давало  $\Delta N = 0.02$ , т.е. то же значение полной мощности, что и для первой модели ( $\Delta N = \int \rho N dS$ , где интегрирование проводится по зоне энергоподвода;  $x$  — координата вдоль хорды профиля, отсчитывается от его носка). При этом значения коэффициента сопротивления в результате использования обеих моделей получились близкие (различие 4%). Мало различие в подводимой энергии и в коэффициенте сопротивления также при подводе энергии в зоне  $x = 0.609-0.693$ . На рис. 1 точки кривых 1 и 3 (а также точки кривых 2 и 4) при  $\Delta t = 0.05$  лежат близко. Такой результат оправдывал использование первой модели энергоисточ-

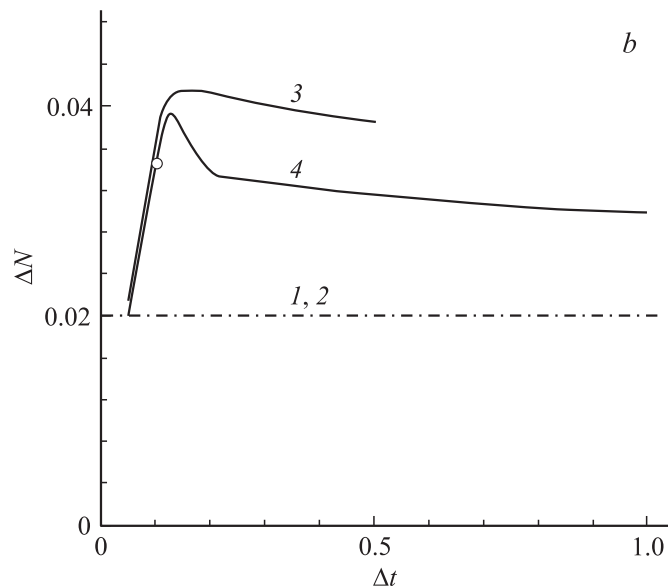


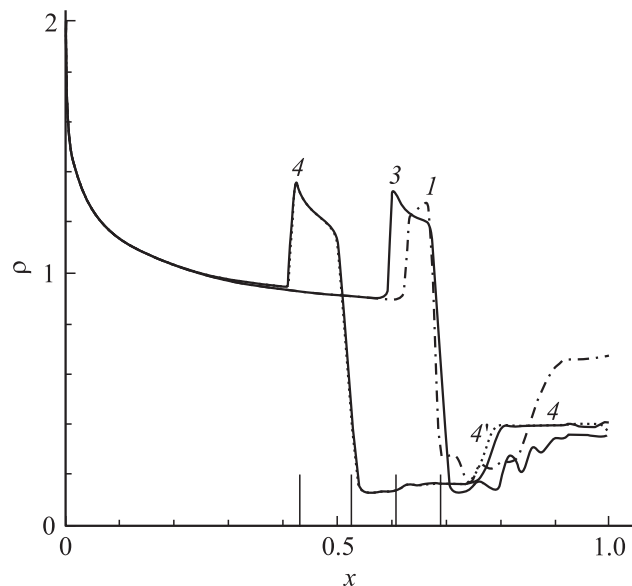
Рис. 1 (продолжение).

ника. Однако дальнейшие исследования потребовали перехода к другой (второй) модели энергоисточника. Ее использование может дать более существенное снижение волнового сопротивления: не в два раза, как в [2], а на порядок (для сравнения на рис. 1, *a* приведено значение  $C_x$  без энергоподвода).

Сравнение кривых 1 и 2 с кривыми 3 и 4 на рис. 1, *a* показывает, что оптимальная частота для первой модели энергоисточника в два с небольшим раза больше, чем для второй модели, при прочих равных условиях. Это связано с тем, что при использовании второй модели поглощаемая мощность на более низких частотах (ниже  $\omega = 20$ ) больше, чем при использовании первой модели, и кривая зависимости  $C_x$  от  $\Delta t$  смещается книзу. При этом зависимость поглощаемой мощности  $\Delta N$  от периода  $\Delta t$  в случае второй модели имеет максимум, который примерно в два раза выше мощности по первой модели, и он соответствует оптимальному периоду (рис. 1, *b*). При этом зависимость эта неоднозначная. Кривая 3 на рис. 1, *b* лежит выше кривой 4, т. е. для положения

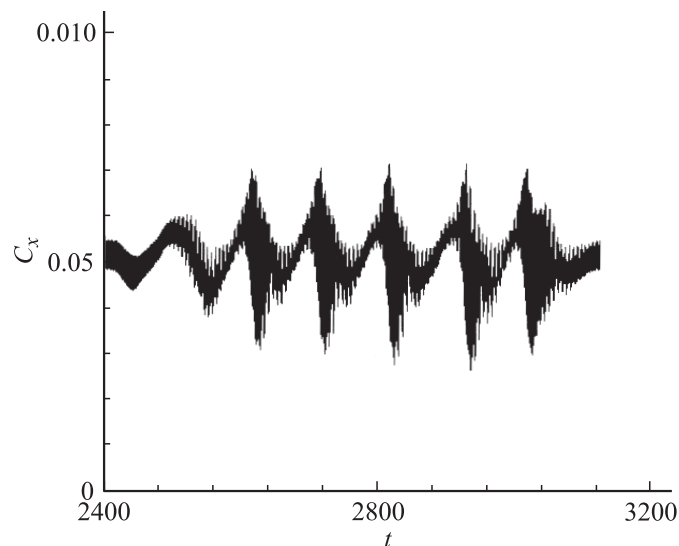
зоны энергоподвода ниже по течению (кривая 3) поглощается энергии больше, чем при положении зоны выше по течению (кривая 4). Казалось бы, это противоречит тому, что в невозмущенном подводе энергии потоке плотность газа убывает вниз по течению вплоть до замыкающего скачка уплотнения. Однако в варианте, которому соответствует кривая 3 (более далекое от носка профиля расположение зоны энергоподвода), устанавливающийся в результате подвода энергии скачок уплотнения расположен ниже по течению, чем в варианте, которому соответствует кривая 4, он более сильный, и за ним плотность газа выше. Это объясняет более высокие значения поглощаемой энергии в первом из вариантов. Тем не менее, уменьшение коэффициента волнового сопротивления во втором случае больше. Поглощаемая энергия больше там, где плотность газа больше, а снижение волнового сопротивления связано с изменениями ударно-волновой структуры течения, которое определяется не только величиной подводимой мощности, но и положением источника энергии (а также частотой).

Некоторое представление об ударно-волновой структуре течения дает рис. 2, на котором показано распределение плотности газа по поверхности профиля. Во всех вариантах расчета подвод энергии осуществлялся перед невозмущенным положением замыкающего скачка уплотнения. В результате импульсно-периодического подвода энергии замыкающий скачок смещается вверх по потоку. При использовании первой модели источника энерговыделения смещенный скачок уплотнения пересекает соответствующую зону (кривая 1 на рис. 2). При использовании второй модели скачок устанавливается перед зоной энергоподвода (кривые 3 и 4). Это смещение скачка связано с более высоким в целом уровнем плотности газа в зоне энергоподвода, что видно при сравнении кривых 1 и 3 на рис. 2. Имеет место взаимное влияние высокого уровня плотности газа в зоне, соответственно большого поглощения им энергии и значительного смещения замыкающего скачка уплотнения вверх по потоку, где плотность газа выше. Как следствие, при использовании второй модели получено более значительное снижение волнового сопротивления профиля. Расположение зоны энергоподвода вверх по потоку, где плотность газа выше (кривая 4), приводит к еще большему смещению замыкающего скачка уплотнения. Однако скачок становится слабее, и за ним, т. е. в зоне подвода энергии, плотность газа несколько меньше, чем в случае варианта, которому соответствует кривая 3. Поэтому еще большее снижение волнового сопротивления достигается при несколько меньших значениях подводимой энергии.



**Рис. 2.** Распределение плотности газа по контуру профиля. Штрихпунктирная линия — первая модель источника энергии, сплошные линии — вторая модель; кривые 1 и 3 — зона  $x = 0.609-0.693$ , кривые 4, 4' — зона  $x = 0.433-0.528$ . (Нумерация кривых на рис. 2 та же, что и на рис. 1). Вертикальные линии показывают положение зон подвода энергии.

В результате подвода энергии от соответствующей зоны во все стороны распространяется ударная волна. Ее взаимодействие с замыкающим скачком уплотнения приводит к смещению последнего. Как было установлено в [3], „взрывной“ механизм является определяющим в смещении замыкающего скачка уплотнения. В области между профилем и новым положением замыкающего скачка наблюдается череда волн сжатия, которые распространяются вниз по потоку и одновременно от профиля. Одним своим „крылом“ они упираются в профиль, повышая давление в кормовой его части, что также снижает сопротивление. Когда частота подвода энергии низкая, эти волны сжатия практически не взаимодействуют между собой и не усиливают друг друга. При этом на профиль падает в лучшем случае одна волна сжатия. Снижение волнового сопротивления происходит только за счет некоторого смеще-



**Рис. 3.** Изменение коэффициента волнового сопротивления  $C_x$  в зависимости от времени  $t$ .

ния замыкающего скачка уплотнения. В потоке при этом наблюдается пространственная волновая структура.

При увеличении частоты подвода энергии возможно взаимодействие указанных волн сжатия, их взаимное усиление. На профиль падает несколько волн сжатия, что существенно зависит от положения зоны энергоподвода. Происходит более значительное снижение волнового сопротивления профиля. При использовании второй модели энергоисточника наблюдается формирование пространственно-временных колебаний характеристик поля течения в области за замыкающим скачком уплотнения (сам скачок при этом не меняет своего положения). Частота этих колебаний не равна частоте подвода энергии. Это низкочастотные колебания. При оптимальном периоде энергоподвода имеют место резонансные явления. Так при подводе энергии в зоне  $x = 0.433-0.528$  с периодом  $\Delta t = 0.1$  развиваются колебания в потоке с периодом, равным  $30\Delta t$ . Амплитуда этих колебаний в значениях коэффициента волнового сопротивления составляет около 4%. Колебания в плотности газа у профиля можно видеть на рис. 2, кривая 4' (пунктирная линия для

момента времени  $10\Delta t$ , когда отклонение в плотности наибольшее). При подводе энергии в зоне  $x = 0.3375-0.3468$  с тем же периодом наблюдается целый спектр низких частот, и амплитуда их весьма значительна (рис. 3). Наличие резонансного взаимодействия пространственно-временных колебаний в поле течения с ударно-волновой структурой обеспечивает снижение волнового сопротивления профиля в девять раз (рис. 1, *a*). При этом поглощаемая газом энергия мало отличается от предыдущих вариантов (рис. 1, *b*). Для сравнения по первой модели значение  $C_x$  в 3.6 раза выше.

При дальнейшем увеличении частоты подвода энергии колебательное движение в поле течения ослабляется. Формируется квазистационарный режим обтекания профиля. Его волновое сопротивление несколько увеличивается, но оно остается меньше, чем при отсутствии подвода энергии в поток.

С уменьшением числа Маха полета волновое сопротивление крыловых профилей становится меньше. Однако и в этом случае резонансные эффекты, вызываемые подводом энергии, приводят к существенному снижению  $C_x$ : при  $M_\infty = 0.8$  и  $\Delta t = 0.1$  в 1.6 раза.

## Список литературы

- [1] *Гувернюк С.В., Самойлов А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 9. С. 1–8.
- [2] *Аульченко С.М., Замураев В.П., Калинина А.П.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 6–11.
- [3] *Замураев В.П.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 5. С. 146–149.