

УДК 533.6.011

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПОДВОДЕ ЭНЕРГИИ ВБЛИЗИ СИММЕТРИЧНОГО ПРОФИЛЯ, ОБТЕКАЕМОГО ТРАНСЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

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

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mails: aultch@itam.nsc.ru, zamuraev@itam.nsc.ru

На основе численного решения двумерных нестационарных уравнений газовой динамики изучено изменение структуры трансзвукового обтекания и уменьшение волнового сопротивления симметричного профиля в зависимости от периода подвода энергии, а также от локализации и формы зоны ее подвода. Установлено, что подвод энергии к газу перед замыкающим скачком уплотнения в непосредственной близости к контуру в вытянутых вдоль него зонах приводит к значительному уменьшению волнового сопротивления профиля. Выяснена природа такого уменьшения сопротивления. Установлено существование предельной частоты подвода энергии.

Ключевые слова: трансзвуковое течение, волновое сопротивление, подвод энергии, уравнения Эйлера.

Введение. В данной работе изучается возможность управления аэродинамическими характеристиками крыловых профилей с помощью внешнего локального импульсно-периодического подвода энергии на трансзвуковых режимах полета. В [1–5] показано, что при подводе энергии в компактных зонах (близких к квадратной форме или слабовытянутых) коэффициент волнового сопротивления профиля практически не зависит от формы и расположения зон подвода энергии за сечением максимальной толщины профиля. (Аналогичный вывод следует из [6] при непрерывном подводе энергии в сверхзвуковой области потока в зоне, вытянутой вдоль ударной волны.) Фактически этот результат является следствием линейного уменьшения коэффициента волнового сопротивления в зависимости от подводимой энергии.

Необходимо отметить, что в расчетах авторов работы [6] не учитывается ударная волна, связанная с подводом энергии, что не соответствует известным теоретическим и экспериментальным данным. Попытка повторить эти расчеты не дала полученного в [6] снижения волнового сопротивления (до 25 %). Принципиальный вывод о предпочтительности подвода энергии в зонах, вытянутых вдоль скачка, по сравнению с зонами, вытянутыми вдоль профиля, противоречит полученным в [7] результатам.

В отличие от [1–6] в работе [7] установлены нелинейные эффекты, возникающие при подводе энергии в импульсно-периодическом режиме в достаточно узких зонах, расположенных вдоль профиля. При таком подводе энергии происходит значительное изменение структуры течения и распределения сил давления на профиль. Ранее столь существенное изменение структуры течения при относительно небольших затратах энергии было обнаружено лишь для сверхзвуковых течений (см., например, [8–12]). Данная работа является продолжением исследований ударно-волновой структуры течения при трансзвуковом обтекании симметричного профиля [4, 5, 7].

Постановка задачи. В качестве математической модели течения используется система двумерных нестационарных уравнений газовой динамики (уравнения Эйлера) в консервативной форме для газа с постоянным показателем адиабаты γ . Для ее численного решения в промежутках между моментами подвода энергии используется конечно-объемная схема, уменьшающая полную вариацию (TVD-реконструкция). Потоки на границах ячеек вычисляются по методу работы [13]. Интегрирование по времени проводится методом Рунге — Кутты третьего порядка. Расчетная сетка в физической области геометрически адаптирована к контуру профиля и сгущена в его окрестности, в канонической области она прямоугольная; размеры расчетной сетки 352×320 . В рассматриваемой модели импульсный подвод энергии осуществляется мгновенно, при этом плотность газа и его скорость не меняются. Плотность энергии газа e в зонах ее подвода возрастает на величину $\Delta e = \Delta E / \Delta S$ (ΔE — полная энергия, подводимая в одной зоне (на единицу длины в направлении, перпендикулярном плоскости профиля); ΔS — площадь зоны). Энергия подводится симметрично относительно профиля (все линейные размеры отнесены к длине хорды профиля l ; компоненты скорости газа u, v и скорость звука a — к a_∞ , плотность ρ — к ρ_0 ; давление p и полная энергия единицы объема газа e обезразмерены величиной $\rho_0 a_\infty^2$; подводимая энергия ΔE обезразмерена параметром $\rho_0 a_\infty^2 l^2$; время t и период подвода энергии Δt отнесены к величине l/a_∞ ; ρ_0 определяется из условия $p_\infty = \rho_0 a_\infty^2$; p_∞, a_∞ — размерные давление и скорость звука в набегающем потоке).

Начальное распределение параметров соответствует стационарному обтеканию профиля без подвода энергии. С начала подвода энергии до получения периодического решения задача решалась как нестационарная. Момент достижения периодического решения определялся по результатам сравнения средних значений коэффициента сопротивления профиля.

Эффективность внешнего подвода энергии можно определить, сравнивая уменьшение волнового сопротивления с увеличением тяги летательного аппарата при подводе соответствующей энергии в его двигателе. КПД двигателя равен $\eta = Ru_\infty / W$ (R — сила тяги; u_∞ — скорость полета; W — подводимая мощность) [14]. На крейсерском режиме полета сила тяги равна силе сопротивления. Несложно получить оценку для подводимой вблизи профиля энергии

$$\Delta E \leq \gamma \Delta C_x M_\infty^3 \Delta t / (4\eta),$$

где ΔC_x — уменьшение коэффициента волнового сопротивления; M_∞ — число Маха набегающего потока. Для заданной подводимой энергии из этой формулы можно получить оценку КПД двигателя, при котором внешний подвод энергии становится выгодным.

Результаты расчетов. Результаты получены для крылового профиля НАСА-0012 в случае обтекания его идеальным газом ($\gamma = 1,4$) при $M_\infty = 0,85$ и нулевом угле атаки. Варьировались период подвода энергии ($\Delta t = 0,005 \div 0,5$), положение зон подвода энергии и их размер при значении средней по периоду мощности подводимой энергии в одну зону $\Delta E / \Delta t = 0,02$.

В табл. 1 приведены значения коэффициента волнового сопротивления C_x в зависимости от периода подвода энергии. Подвод энергии осуществлялся в непосредственной близости к профилю (x_1, x_2 — координаты левой и правой границ зон подвода энергии, профиль расположен в интервале значений продольной координаты $3 \leq x \leq 4$). Вариант 1 соответствует случаю отсутствия подвода энергии.

Непосредственно после подвода энергии начинается распад произвольного разрыва. Возникает ударная волна, распространяющаяся во всех направлениях от профиля. Происходит разлет газа из зоны подвода энергии. При низких частотах (больших значениях периода) структура течения успевает частично восстановиться перед следующим подводом энергии. В результате замыкающий скачок уплотнения хотя и смещается вверх по

Таблица 1

Вариант расчета	x_1	x_2	$\Delta S \cdot 10^4$	Δt	$C_x \cdot 10^2$	$\Delta C_x \cdot 10^2$	$\Delta C_x / C_x, \%$
1	—	—	—	—	4,588	—	—
2	3,609	3,693	0,839	0,5	3,916	0,672	14,6
3	3,609	3,693	0,839	0,05	3,498	1,090	23,8
4	3,609	3,693	0,839	0,025	3,526	1,062	23,1
5	3,609	3,693	0,839	0,005	$\approx 3,57$	$\approx 1,02$	22,2
6	3,523	3,693	0,581	0,10	3,249	1,339	29,2
7	3,523	3,693	0,581	0,05	3,060	1,528	33,3

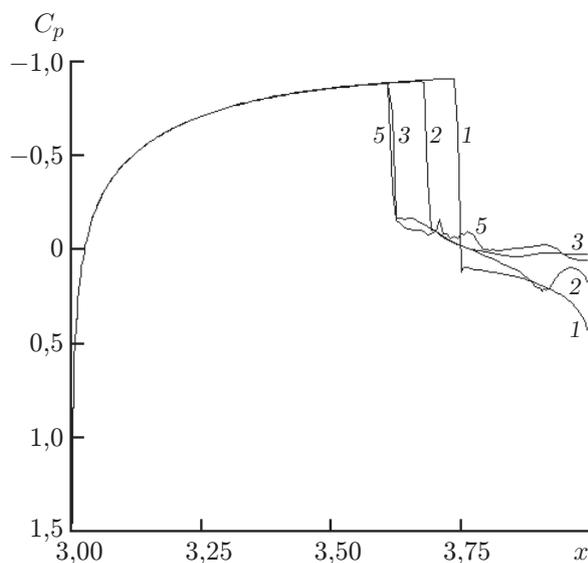


Рис. 1. Распределение коэффициента давления C_p вдоль хорды профиля при различных значениях периода подвода энергии (номера кривых соответствуют вариантам расчета в табл. 1)

поток, но не пересекает зону подвода энергии. В варианте 2 ($\Delta t = 0,5$) он находится в задней части этой зоны (рис. 1). Скачок уплотнения еще довольно сильный, и потери давления торможения значительны. Относительное уменьшение волнового сопротивления в этом случае составляет приблизительно 15 %. При увеличении частоты подвода энергии на порядок (вариант 3) структура течения не успевает восстановиться за период, и замыкающий скачок уплотнения, смещаясь вверх по потоку, пересекает зону подвода энергии и останавливается у переднего края внутри зоны (положение замыкающего скачка, как и в других вариантах с периодическим подводом энергии, не меняется в пределах периода). Ниже по течению от зоны подвода энергии в кормовой части профиля формируется след низкой плотности, скорость газа в котором мала ($M \approx 0,1$). За профилем возникает крупный вихрь. Среди вариантов, представленных в табл. 1, для которых площадь зоны подвода энергии $\Delta S = 0,839 \cdot 10^{-4}$, в варианте 3 уменьшение коэффициента волнового сопротивления достигает наибольшего значения 23,8 %. При последующем увеличении частоты подвода энергии положение замыкающего скачка в периодическом решении практически не меняется, а давление в кормовой части профиля понижается. Как следствие коэффициент волнового сопротивления немного увеличивается. При $\Delta t = 0,005$ периодическое решение, по-видимому, не устанавливается: наблюдается неустойчивость контактного разрыва, возникающего при взаимодействии замыкающего скачка и следа низкой плотности. В кормовой части профиля формируются вихри.

В вариантах 6, 7 табл. 1 протяженность зоны подвода энергии вдоль профиля увеличена в два раза, а в поперечном направлении уменьшена (более чем в два раза), так

Таблица 2

Вариант расчета	x_1	x_2	$\Delta y \cdot 10^3$	$\Delta S \cdot 10^4$	$C_x \cdot 10^2$	$\Delta C_x \cdot 10^2$	$\Delta C_x / C_x, \%$	$\eta, \%$
1	—	—	—	—	4,588	—	—	—
2	3,609	3,693	0	0,839	3,498	1,090	23,8	11,7
3	3,567	3,656	0	0,865	3,2432	1,345	29,3	14,5
4	3,523	3,609	0	0,812	2,920	1,668	36,4	17,9
5	3,477	3,567	0	0,830	2,589	1,999	43,6	21,5
6	3,433	3,523	0	0,819	2,250	2,338	51,0	25,1
7	3,352	3,442	0	0,806	$\approx 1,80$	$\approx 2,79$	60,8	30,0
8	3,271	3,367	0	0,845	$\approx 2,85$	$\approx 1,74$	37,9	18,7
9	3,433	3,477	0	0,799	2,224	2,364	51,5	25,4
10	3,523	3,693	0	0,581	3,060	1,554	33,7	16,7
11	3,433	3,442	0	0,854	4,116	0,472	10,3	5,1
12	3,609	3,693	0,97	0,839	3,569	1,019	22,2	11,0
13	3,609	3,693	1,94	0,839	3,663	0,925	20,2	9,9

что плотность подводимой энергии несколько выше. В этом случае зависимость между частотой и уменьшением волнового сопротивления сохраняется. Полученные результаты свидетельствуют о наличии предельной частоты подвода энергии: при бóльших значениях частоты положение замыкающего скачка уплотнения не меняется, и уменьшения волнового сопротивления при увеличении этой частоты не наблюдается. Для рассмотренных вариантов подвода энергии в зонах, вытянутых вдоль профиля, полученное в расчетах значение предельной частоты равно 20 (соответствующий период подвода энергии равен 0,05).

В табл. 2 приведены значения коэффициента волнового сопротивления и его уменьшение при $\Delta t = 0,05$ в зависимости от положения зон подвода энергии (Δy — минимальное расстояние между зоной и профилем). В варианте 1 значение коэффициента волнового сопротивления соответствует случаю отсутствия подвода энергии. В последней графе приведены значения КПД двигателя, при которых внешний подвод рассматриваемого значения энергии выгоден. В вариантах 2–11 зоны подвода энергии располагаются в непосредственной близости к профилю. Из табл. 2 следует, что перемещение области энергоподвода вдоль контура вверх по потоку (варианты 2–7) вплоть до миделя ($x \approx 3,303$) приводит к значительному уменьшению коэффициента волнового сопротивления (до 60 % в варианте 7), а при ее перемещении к передней части профиля, за мидель (вариант 8), эффект энергоподвода уменьшается. На рис. 2 для этих вариантов приведены распределения коэффициента давления C_p , плотности газа ρ и числа Маха M соответственно. Существенное уменьшение волнового сопротивления наблюдается при перемещении замыкающего скачка уплотнения вверх по потоку. В вариантах 2–7 он локализуется вблизи передней части зоны подвода энергии. Несмотря на некоторое уменьшение давления в кормовой части профиля, повышение давления на его подветренной стороне в результате смещения замыкающего скачка приводит к снижению волнового сопротивления. В варианте 8 сверхзвуковая зона практически разрушена (см. рис. 2,б) и давление на значительной части профиля выше, чем при отсутствии подвода энергии.

На небольшом расстоянии от замыкающего скачка формируется след низкой плотности (см. рис. 2,б). Скорость потока в нем мала, плотность газа почти постоянная и практически одинаковая во всех рассматриваемых вариантах (она определяется мощностью подводимой энергии). Область постоянной плотности уменьшается по мере перемещения зоны подвода энергии вверх по потоку, а в кормовой части профиля возникают вихри. Вследствие того что скорости потока небольшие (около 0,1), интенсивность вих-

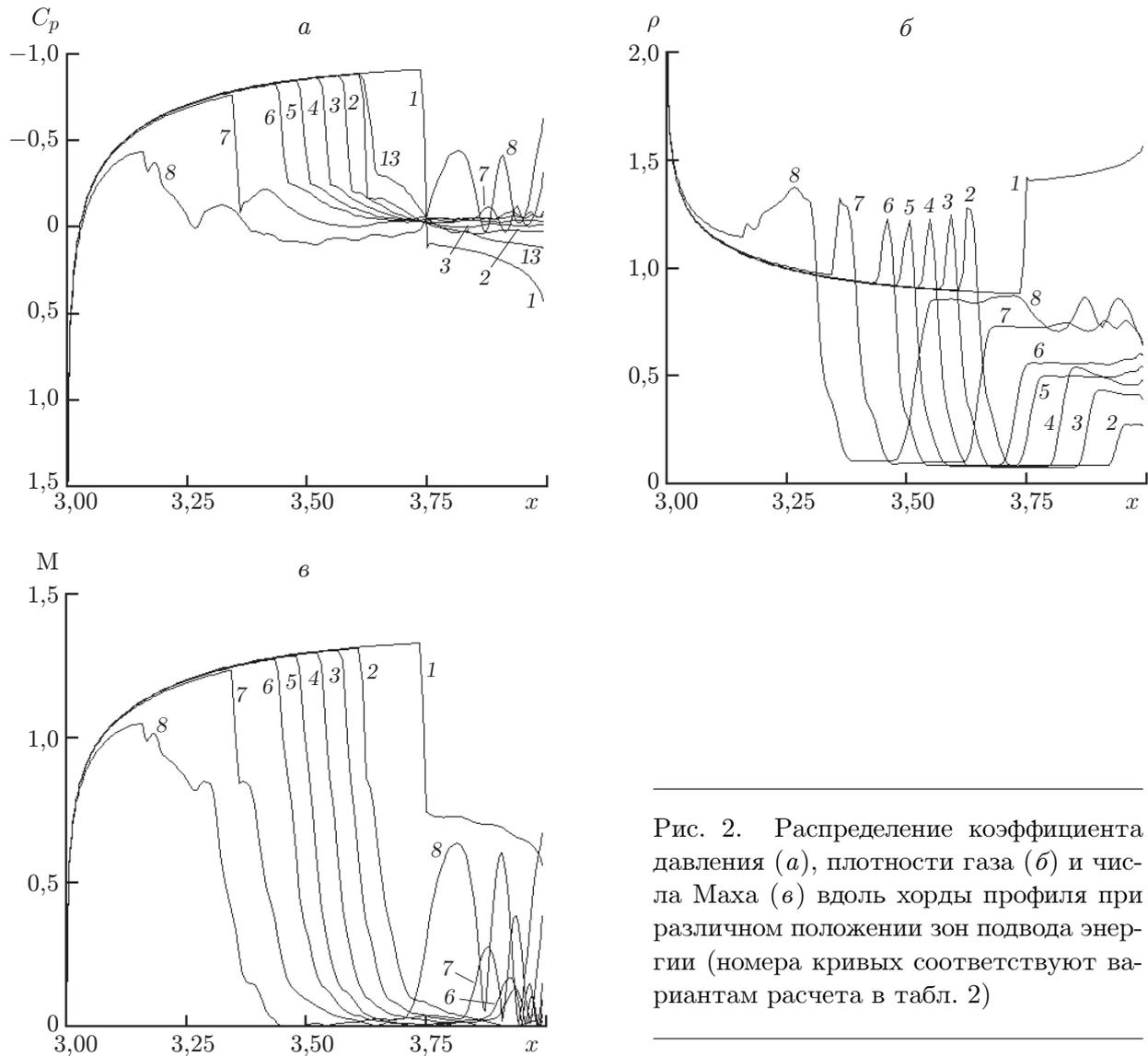


Рис. 2. Распределение коэффициента давления (а), плотности газа (б) и числа Маха (в) вдоль хорды профиля при различном положении зон подвода энергии (номера кривых соответствуют вариантам расчета в табл. 2)

рей незначительная. Однако именно их наличие приводит к тому, что в вариантах 7, 8 не устанавливается периодическое решение. Вихри являются причиной более слабого уменьшения волнового сопротивления в варианте 8. Над областью вихрей поток вновь разгоняется до сверхзвуковых скоростей (поэтому давление на кормовую часть профиля меньше). На рис. 3 приведено распределение чисел Маха и плотности для варианта 8. Над следом видны области с $M > 1,1$. Наблюдается также почти полное разрушение сверхзвуковой зоны над профилем. Область низкой плотности (след) ограничена контактным разрывом, который является неустойчивым и колеблющимся (рис. 3).

Сравнение значений C_x , полученных для вариантов 6 и 9, показывает, что уменьшение длины (по оси x) зон подвода энергии в два раза при практически неизменной площади не оказывает влияния на волновое сопротивление. В вариантах 2 и 10 протяженность зон подвода энергии также различается в два раза, при этом их площадь в варианте 10 в 1,44 раза меньше, чем в варианте 2, а значение $\Delta C_x / C_x$, наоборот, в 1,42 раза больше, что также может быть связано со смещением зоны в варианте 10 вверх по потоку.

Дальнейшее уменьшение длины зоны энергоподвода приводит к снижению его эффективности, что следует из сравнения значений C_x в вариантах 6, 9 и 11. В варианте 11

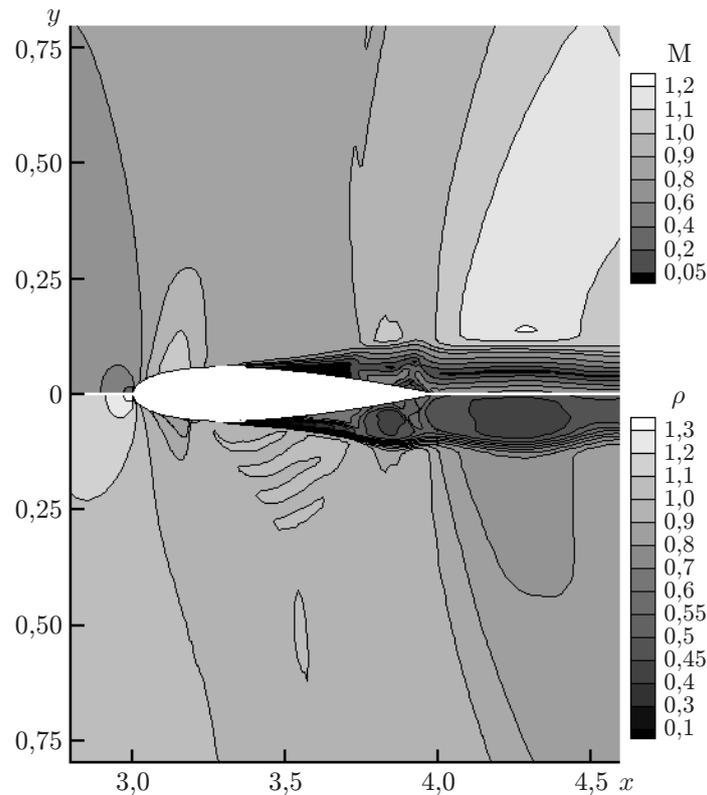


Рис. 3. Изолинии числа Маха (*вверху*) и плотности газа (*внизу*) при подводе энергии в области миделя

Таблица 3

$t/\Delta t$	$C_x \cdot 10^2$	$t/\Delta t$	$C_x \cdot 10^2$
0,1	1,177	0,6	2,379
0,2	2,137	0,7	2,388
0,3	2,275	0,8	2,392
0,4	2,335	0,9	2,396
0,5	2,364	1,0	2,398

протяженность зон подвода энергии на порядок меньше, чем в варианте 6 (различие площадей составляет примерно 4 %), при этом значение $\Delta C_x/C_x$ в пять раз меньше, чем в варианте 6.

В табл. 2 приведены также результаты расчета для случаев, когда зоны подвода энергии смещены на некоторое расстояние Δy от профиля. Результаты сравнения значений C_x в вариантах 2, 12 и 13 показывают, что выгоднее подводить энергию в непосредственной близости к профилю: по мере удаления от него коэффициент сопротивления уменьшается. Такое поведение C_x обусловлено ослаблением эффекта отражения от профиля возмущений, вносимых при подводе энергии, по мере удаления зон подвода от профиля. Сравнение кривых 2 и 13 на рис. 2, а показывает, что в последнем случае замыкающий скачок значительно слабее.

Значения C_x , приведенные в табл. 2, получены в результате осреднения по интервалу времени, равному 0,5. О динамике изменения коэффициента волнового сопротивления в пределах одного периода можно судить по значениям C_x , приведенным в табл. 3 для варианта 9 из табл. 2. Эти значения C_x получены в результате осреднения по промежутку

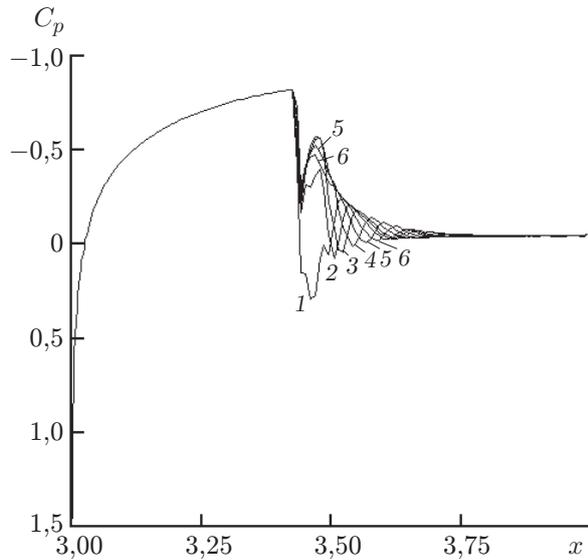


Рис. 4. Распределение коэффициента давления вдоль хорды профиля в различные моменты времени в течение одного периода:

1 — $t/\Delta t = 0,1$; 2 — $t/\Delta t = 0,2$; 3 — $t/\Delta t = 0,3$; 4 — $t/\Delta t = 0,5$; 5 — $t/\Delta t = 0,7$; 6 — $t/\Delta t = 0,9$

времени, равному $0,1\Delta t$. Осредненное по всему периоду значение $C_x = 0,02224$. Распределение коэффициента волнового сопротивления по большей части периода достаточно равномерное (отклонение от среднего по периоду не превышает 5 %).

На рис. 2 показано пространственное распределение параметров течения по профилю в момент времени перед подводом энергии. Распределение коэффициента давления по профилю в различные моменты времени для исходных данных, приведенных в табл. 3, представлено на рис. 4. При подводе энергии давление в соответствующих зонах резко возрастает, формируются и распространяются во всех направлениях от профиля ударные волны (на кривой 1 виден только фронт волны, распространяющейся вниз по потоку), за которыми развиваются волны разрежения. Затем давление в зонах подвода энергии падает из-за разлета газа (кривые 2–4). В дальнейшем интенсивность скачка уплотнения, распространяющегося вниз по потоку, уменьшается и он сносится потоком (кривые 5, 6). В зоне подвода энергии давление увеличивается и формируется распределение перед очередным подводом энергии. На рис. 4 видно, что положение скачка уплотнения, замыкающего сверхзвуковую область, в течение периода практически не меняется. За скачком существуют области практически постоянного давления, в которых скорости газа малы.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали перспективность использования внешнего периодического подвода энергии с целью управления как локальными, так и интегральными характеристиками крыловых профилей на трансзвуковых режимах обтекания. Вследствие нелинейного характера взаимодействия возмущений, вносимых в поток при подводе энергии, с замыкающим скачком и поверхностью профиля наблюдается значительное уменьшение волнового сопротивления профиля (более чем в два раза). В этом случае подвод энергии является выгодным, если КПД двигателя не превышает 30 %. Установлено существование предельной частоты подвода энергии: последующее увеличение этой частоты не приводит к уменьшению волнового сопротивления. Периодический характер формирующегося течения позволяет использовать его на крейсерских режимах полета. Появляется возможность проектирования трансзвуковых профилей с максимальным крейсерским числом Маха при выполнении геометрических и газодинамических ограничений и сохранении заданной подъемной силы в условиях подвода энергии.

Авторы выражают благодарность П. Ю. Георгиевскому за полезное обсуждение данной проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Aulchenko S. M., Zamuraev V. P., Latypov A. F.** On possibility to control a transonic streamlining of the airfoil by means of a periodic pulse local energy supply // Proc. of the 5th Intern. workshop on magneto-plazma-aerodynamics in aerospace applications, Moscow, 7–10 Apr. 2003. M.: Inst. of high temperatures of Russ. acad. of sci., 2003. P. 323–327.
2. **Аульченко С. М., Замураев В. П.** Влияние периодического импульсного локального подвода энергии на структуру трансзвукового обтекания крыловых профилей // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 197–204.
3. **Аульченко С. М., Замураев В. П., Калинина А. П.** Управление трансзвуковым обтеканием крыловых профилей посредством периодического импульсного локального подвода энергии // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76, № 6. С. 54–57.
4. **Аульченко С. М., Замураев В. П., Калинина А. П., Латыпов А. Ф.** Управление трансзвуковым обтеканием крыловых профилей посредством локального импульсного подвода энергии // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 5. С. 62–67.
5. **Замураев В. П., Калинина А. П.** Влияние локализации импульсного подвода энергии на волновое сопротивление профиля, обтекаемого трансзвуковым потоком // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 5. С. 60–67.
6. **Yuriev A. S., Korzh S. K., Pirogov S. Yu., et al.** Transonic streamlining of profile at energy addition in local supersonic zone // Proc. of the 3rd Workshop on magneto-plazma-aerodynamics in aerospace applications, Moscow, 24–26 Apr. 2001. M.: Inst. of high temperatures of Russ. acad. of sci., 2001. P. 201–207.
7. **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.
8. **Артемьев В. И., Бергельсон В. И., Немчинов И. В. и др.** Глобальная перестройка газодинамических течений с помощью тонких лазерных лучей // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55, № 6. С. 1184–1187.
9. **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.
10. **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.
11. **Georgievsky P. Yu., Levin V. A.** Unsteady effects for a supersonic flow past a pulsing energy source of high power // Proc. of the Intern. conf. on the methods of aerophys. res., Novosibirsk, 29 June – 3 July 1998. Novosibirsk: Inst. theor. and appl. mech., 1998. Pt 2. P. 58–64.
12. **Левин В. А., Терентьева Л. В.** Влияние локальной области энерговыделения на пространственное обтекание конуса // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1999. № 3. С. 106–113.
13. **Van Leer B.** Flux-vector splitting for the Euler equations // Lect. Notes Phys. 1982. V. 170. P. 507–512.
14. **Торенбик Э.** Проектирование дозвуковых самолетов. М.: Машиностроение, 1983.

*Поступила в редакцию 21/VI 2005 г.,
в окончательном варианте — 2/VIII 2005 г.*