

УДК: 629.735.33.015.017.2

Использование явления резонанса для увеличения эффективности работы импульсных эжекторов

А.В. Воеводин, А.С. Петров, Г.Г. Судаков

*Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
Жуковский, Московская обл.*

E-mail: soudakov@mail.ru

Приводятся результаты расчетных и экспериментальных исследований характеристик импульсного эжектора, предназначенного для работы в системах управления обтеканием летательных аппаратов. В конструкцию эжектора входит резонатор Гельмгольца, настроенный на определенную резонансную частоту. Полученные расчетные и экспериментальные результаты подтверждают существование резонансных режимов работы эжектора, на которых его эффективность существенно повышается. Результаты расчетных исследований внутренней аэродинамики резонаторного эжектора позволяют объяснить его высокую экономичность по расходу высоконапорного газа, а также преимущества и недостатки по другим параметрам по сравнению со стационарным режимом работы. По величине расхода высоконапорного газа определены границы эффективной работы резонаторного эжектора, а также перспективы его применения в системах управления обтеканием летательного аппарата.

Ключевые слова: импульсный эжектор, резонанс.

Введение

Управление обтеканием летательного аппарата с помощью активных методов является одним из современных инновационных направлений аэрокосмической науки и техники. Для активного управления обтеканием летательного аппарата разработано множество различных устройств. В настоящее время к наиболее перспективным из них можно отнести различные модификации устройств, воздействующих на течение сформированной специальным образом струей газа [1]. Главным недостатком традиционных струйных методов управления обтеканием является не очень высокая их экономичность по расходу высоконапорного газа, отбираемого от двигательной установки. В связи с этим повышение экономичности струйных систем управления является в настоящее время весьма актуальной задачей.

Одно из направлений, позволяющих повысить эффективность струйных методов управления, основывается на использовании в их конструкциях различного рода эжекторных систем. Такие системы позволяют экономить высоконапорный газ путем подмешивания к нему низконапорного газа, обеспечивая вместе с тем необходимый расход на выходе устройства. При этом отбор низконапорного газа может осуществляться из области течения, где отсос пограничного слоя позволяет существенно уменьшить интенсивность отрыва потока от поверхности крыла на больших углах атаки. Таким образом,

использование эжекторов в струйных системах управления позволяет одновременно решить три разные задачи: повысить экономичность системы по расходу высоконапорного газа, организовать выдув струи в нужной области течения и осуществить отсос пограничного слоя там, где это целесообразно. В настоящее время это направление интенсивно развивается [2–4].

Все струйные системы управления для своей работы требуют отбора высоконапорного газа от двигателя или наличия отдельного компрессора, что приводит к потере тяги. В соответствии с эксплуатационными требованиями, потери тяги двигательной установки летательного аппарата не должны превышать 5–7 % [1]. В связи с этим возникает задача минимизации количества отбираемого от двигателя высоконапорного газа при обеспечении необходимого выходного импульса струи.

Следует различать два существенно разных режима работы эжектора: дозвуковой и сверхзвуковой. Дозвуковой режим характеризуется низкими давлениями высоконапорного газа и большими коэффициентами эжекции $K > 1$. Сверхзвуковой режим, напротив, отличается большими давлениями высоконапорного газа, но малыми коэффициентами эжекции $K < 1$.

Методы увеличения экономичности эжекторов по расходу высоконапорного газа и увеличения коэффициента эжекции для двух указанных режимов также существенно разные. Для сверхзвукового режима это использование различного рода дополнительных конструктивных элементов: перфорированных сопел [5], шевронов и табов (вихрегенераторов) [6], наклонных малогабаритных сопел [7]. Применение подобных устройств позволяет интенсифицировать процесс смешения высоконапорного и низконапорного потоков и повысить коэффициент эжекции.

Для дозвукового режима одним из перспективных методов увеличения эффективности работы эжектора является использование импульсного режима подвода высоконапорного газа. Как будет показано в представленной статье, наибольшая эффективность импульсного режима достигается именно в дозвуковом диапазоне работы, а при выходе на сверхзвуковой режим его эффективность существенно падает. Интерес к импульсному режиму работы эжекторов начал проявляться достаточно давно [8–11]. Расчетные исследования характеристик классических конструкций эжекторов при импульсном режиме работы, при котором высоконапорный газ подается в виде коротких импульсов расхода с определенной амплитудой, частотой и скважностью, показали их повышенную экономичность по расходу высоконапорного газа и высокий коэффициент эжекции [9]. Дальнейшее развитие этого направления привело к разработке конструкции резонаторного импульсного эжектора, описанного авторами ранее [12].

В настоящей работе приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований характеристик разработанного авторами эжектора, содержащего в своей конструкции резонатор Гельмгольца. Исследования проведены на импульсных и стационарных режимах работы эжектора. Полученные данные позволяют установить особенности течения во внутренних каналах эжектора и объяснить причину увеличения эффективности работы эжектора в резонаторном режиме использования.

Резонаторные импульсные эжекторы вследствие своей повышенной экономичности по расходу высоконапорного газа, рассматриваются авторами как перспективные струйные устройства управления обтеканием летательного аппарата в широком диапазоне скоростей.

1. Экспериментальные и расчетные исследования характеристик резонаторного эжектора

В настоящей работе с целью дальнейшего увеличения эффективности работы эжектора в импульсном режиме выбрано направление с использованием эффекта резонанса.

В данном случае под резонансом будем подразумевать совпадение собственных частот колебаний газодинамического тракта эжектора с частотой подачи импульсов расхода высоконапорного газа.

В качестве резонатора для импульсного эжектора был выбран резонатор Гельмгольца [13], резонансная частота которого для звуковых колебаний вычисляется по его геометрическим параметрам. В классическом варианте резонатор Гельмгольца представляет собой полую сферу, соединенную с трубкой длины L и площадью сечения S . Его резонансная частота определяется формулой

$$F_G = \frac{a_\infty}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}},$$

где a_∞ — скорость звука, V — объем сферы. Следует отметить, что эта формула для колебаний давления с большой амплитудой является приближенной.

Для проверки работоспособности описанной компоновки была предложена конструкция, объединяющая резонатор Гельмгольца и эжектор (рис. 1а). Конструкция состоит из сферы диаметром $D = 0,1$ м и высоконапорного сопла (трубки без сужения) длиной $L = 0,1$ м с внутренним радиусом $r_1 = 7,5$ мм (рис. 1б). Расчеты по приведенной выше формуле дают для резонансной частоты такой конструкции оценку $F_G = 99,46$ Гц. С диаметрально противоположной от сопла стороны сферы резонатора находится канал подвода высоконапорного газа расходом $Q(t)$. Внутренний диаметр канала составляет 15 мм. Резонатор объединен с камерой смешения радиусом $r_2 = 20$ мм и длиной $l = 0,32$ м. Цифрами на рис. 1б показаны характерные точки вывода параметров течения в расчетных исследованиях: 1 — центр сферы резонатора, 2 — центр высоконапорного сопла, 3 — центр сопла низконапорного газа, 4 — центр выходного сечения камеры смешения.

В расчетных исследованиях расход высоконапорного газа задавался в виде прямоугольных импульсов с амплитудой $Q_{\max}$, длительностью импульса T_1 и периодом T . Для таких импульсов средняя по времени (интегральная) величина расхода высоконапорного газа Q связана с амплитудным значением расхода $Q_{\max}$ очевидным соотношением: $Q = Q_{\max}/S_c$, где $S_c = T/T_1$ — скважность импульсов.

В расчетах использовалась структурированная многоблочная сетка с числом элементов ≈ 200000 . Для корректного разрешения течения в пограничном слое сетка имела сгущение к стенкам эжектора. Так как рассматривался только осесимметричный эжектор, сетки строились для сектора с углом раствора $\delta = 2^\circ$. Расчеты проводились с использованием метода конечного объема второго порядка точности для решения уравнений Рейнольдса (RANS). На боковых поверхностях сектора ставилось граничное условие симметрии.

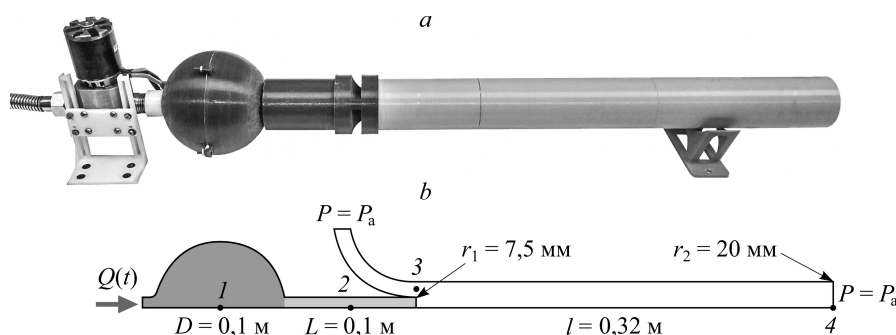


Рис. 1. Осесимметричный эжектор с резонатором Гельмгольца и пневмопрерывателем (а) и его схема в разрезе (б).

На входном канале высоконапорного газа задавалось его полное давление, на входе в тракт эжектируемого (низконапорного) газа задавалось полное давление, равное атмосферному, а на выходе из диффузора — статическое, также равное атмосферному. Параметры внутреннего течения в расчетных исследованиях определялись в характерных точках 1–4 (рис. 1б).

Для проведения экспериментальных исследований была создана математическая модель эжектора, с помощью которой на 3D-принтере изготовлена физическая модель, устройство и внутренние размеры которой полностью повторяли конструкцию, использованную для расчетных исследований (рис. 1а).

Экспериментальные исследования характеристик эжектора проводились на специальном стенде, включающем в себя компрессор с ресивером, регулятор давления, датчик расхода высоконапорного газа и регистрирующую аппаратуру. Стенд позволяет исследовать основные характеристики эжектора в непрерывном и импульсном режимах работы. При этом задавалось избыточное давление p_0 высоконапорного газа на входе в резонатор и контролировался его расход с помощью расходомера. Стенд был укомплектован аппаратурой измерения скорости выдува и эжекции, включающей в себя комплект трубок Пито полного и донного давлений, работающих в паре с датчиками давления. Сигнал датчиков давления в виде мгновенных и средних значений напряжения регистрировался и записывался в память осциллографа и далее пересчитывался в значения давления. Скорости вычислялись по значениям полного давления на выходе из камеры смещения и по статическому давлению в канале низконапорного газа. Сигнал датчика давления, соответствующий среднему по времени значению, измерялся с точностью до 1 мВ. По тарировочной формуле датчика давления это соответствует погрешности в определении скорости $\pm 0,5$ м/с. Испытания проводились многократно с целью уменьшения погрешности эксперимента.

Для формирования импульсной подачи высоконапорного газа непосредственно в эжектор был спроектирован и изготовлен пневмопрерыватель, позволяющий формировать импульсы высокого давления. Он оснащен системой управления, позволяющей плавно менять обороты двигателя и частоту подаваемых на вход эжектора импульсов давления. Скважность импульсов данной конструкции прерывателя не зависит от числа оборотов двигателя и равна $S_c = 3$.

Испытания изготовленного пневмопрерывателя показали, что он может формировать импульсы давления, близкие к синусоидальным, в диапазоне частот $F = 10 \div 130$ Гц. Следует отметить, что форма импульса расхода, создаваемого пневмопрерывателем, отличается от прямоугольной формы, которая использовалась в расчетах.

Основное внимание в процессе экспериментальных исследований уделялось определению средних по времени значений скоростей эжекции в кольцевом низконапорном сопле эжектора и, соответственно, расходу и коэффициенту эжекции низконапорного (эжектируемого) газа. Исследования проводились при фиксированном давлении на входе в пневмопрерыватель для различных частот импульсов давления высоконапорного газа, подаваемого в резонатор. Расход высоконапорного газа определялся непосредственно по датчику расхода газа. Расход эжектируемого газа определялся по средней скорости течения в низконапорном сопле.

На рис. 2 приведены абсолютные значения средней скорости низконапорного газа на входе в канал V_{10} (скорость эжекции) при различных давлениях высоконапорного газа в зависимости от частоты подачи импульсов. Можно отметить, что при всех исследованных значениях давления высоконапорного газа отчетливо прослеживаются максимумы

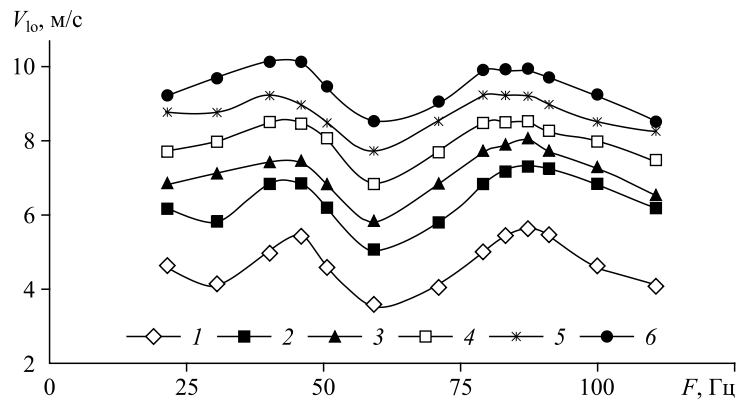


Рис. 2. Осредненные скорости эжекции при различных частотах и давлениях высоконапорного газа.

Данные эксперимента при $P_0 = 1,25$ (1), 1,5 (2), 1,75 (3), 2 (4), 2,25 (5), 2,5 (6) атм.

скорости эжекции на частотах 86 Гц и 43 Гц. Подобное поведение зависимостей характерно для резонансных явлений.

По величинам скорости эжекции и расхода высоконапорного газа были получены зависимости коэффициента эжекции от частоты. На рис. 3 приведены полученные экспериментально зависимости в сравнении с результатами расчетных исследований для $S_c = 3$ и стационарного режима ($F = 0$).

Следует отметить совпадение расчетных и экспериментально определенных резонансных частот, соответствующих максимумам коэффициентов эжекции, и фактическое их равенство при стационарном режиме работы. Наблюдающиеся различия следует отнести к тому, что в экспериментальных исследованиях форма импульсов отличается от прямоугольной, а в расчетных исследованиях не учитывались потери полного давления в пневмопрерывателе.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований показывают, что на основной резонансной частоте 86 Гц коэффициент эжекции выше, чем при стационарном режиме, приблизительно в 3÷4 раза.

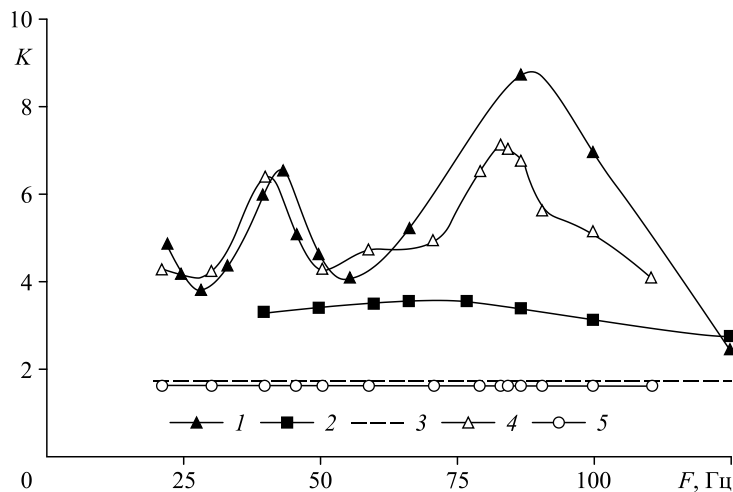


Рис. 3. Сравнение коэффициентов эжекции, полученных в расчетах и экспериментах.

Расчет: 1 — $Q = 0,0009$ кг/с, 2 — $Q = 0,012$ кг/с, 3 — $Q = 0,0009$ кг/с, $F = 0$;
эксперимент: 4 — $Q = 0,001$ кг/с, 5 — $Q = 0,001$ кг/с, $F = 0$.

Таким образом, представленные данные позволяют утверждать, что существуют резонансные режимы работы эжектора, при которых наблюдается максимум коэффициента эжекции. Следует отметить, что независимо от наличия или отсутствия резонанса предложенный эжектор на импульсном режиме будет иметь преимущество по коэффициенту эжекции по сравнению со стационарным режимом работы. Этот вывод подтверждается данными рис. 4, где представлено сравнение расходов эжектируемого газа $Q_{ю}$ на резонансных частотах 43 и 86 Гц, при отсутствии резонанса на частоте 60 Гц и при стационарном режиме работы. Видно, что даже на нерезонансной частоте $F = 60$ Гц импульсный режим почти в два раза превосходит стационарный по расходам эжектируемого газа. На резонансных режимах на частотах $F = 43$ и 86 Гц расход низконапорного газа увеличивается еще на 15–20 %.

В ходе экспериментальных исследований, которые проводились при постоянном давлении на входе пневмопрерывателя, было установлено, что для реализации всех преимуществ импульсного режима работы эжектора, необходимо иметь источник с более высоким давлением по сравнению со стационарным режимом. Дело в том, что прерыватель давления, необходимый для реализации импульсного режима, работает как дроссель, понижающий среднее давление и расход высоконапорного газа на входе в эжектор. Степень понижения давления и расхода зависит от величины скважности, на которую настроен прерыватель давления. Например, при скважности прерывателя давления, равной трем, используемой во всех проведенных экспериментах, расход высоконапорного газа уменьшается также примерно в три раза. Максимальный амплитудный расход в импульсе для сохранения интегрального расхода требуется пропорционально увеличить, что можно сделать только с помощью повышения давления высоконапорного газа.

Таким образом, если перестроить график на рис. 4 в переменных расход эжектируемого газа – давление высоконапорного газа на входе в пневмопрерыватель, то картина существенно меняется (рис. 5). Видно, что расход эжектируемого газа $Q_{ю}$ при одном и том же давлении на входе в среднем выше для стационарного режима работы эжектора, чем для импульсного режима Q_0 на резонансной частоте 86 Гц. На нерезонансной частоте $F = 60$ Гц преимущество стационарного режима еще заметнее. Недостачу эжектируемого расхода приходится компенсировать повышением давления высоконапорного газа. Например, при рабочем избыточном давлении $P_0 = 1,5$ атм у эжектора на стационарном

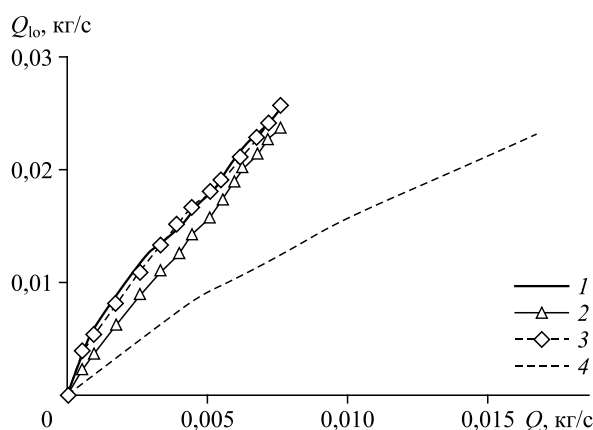


Рис. 4. Зависимость расхода эжектируемого газа от расхода высоконапорного газа.

Данные эксперимента для $F = 86$ (1), 60 (2), 43 (3), 0 (4) Гц.

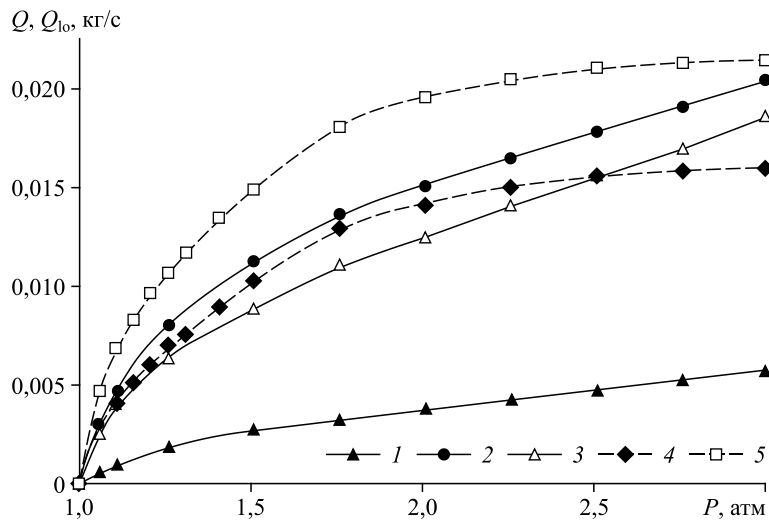


Рис. 5. Сравнение расходов эжектируемого и высоконапорного газов на импульсных и стационарном режимах

в зависимости от давления на входе в пневмопрерыватель.

Экспериментальные данные: 1 — Q при $F = 86$ Гц; 2 — Q_{10} при $F = 86$ Гц; 3 — Q_{10} при $F = 60$ Гц; 4 — Q , $F = 0$; 5 — Q_{10} , $F = 0$.

режиме работы расход эжектируемого газа составляет 0,015 кг/с при расходе высоконапорного 0,0103 кг/с. Для создания такого же расхода эжектируемого газа на резонансном импульсном режиме требуется повысить рабочее избыточное давление примерно до 2 атм, а на нерезонансном — до 2,4 атм. При этом расход высоконапорного газа будет составлять 0,00386 кг/с для резонансного режима работы при $P_0 = 2$ атм и 0,0047 кг/с для нерезонансного при $P_0 = 2,4$ атм, вместо 0,0103 кг/с для стационарного при $P_0 = 1,5$ атм. Таким образом, импульсный резонансный режим по расходу высоконапорного газа оказывается почти в 2,7 раза экономнее стационарного режима, но требует для реализации своих преимуществ источника более высокого давления. Нерезонансный режим также имеет преимущество по экономичности перед стационарным примерно в 2,2 раза.

В случае использования резонаторных эжекторов для управления обтеканием крыла наиболее существенными являются интегральные характеристики эжектора при разных расходах высоконапорного газа. К таким характеристикам можно отнести расход эжектируемого газа, а также скорость и импульс течения на выходе из камеры смешения. На рис. 6 приведен средний по времени расход эжектируемого газа Q_{10} при работе эжектора в резонансном и стационарном режимах в зависимости от приведенного расхода высоконапорного газа. Под приведенным расходом далее будем подразумевать отношение величины абсолютного расхода к величине критического расхода высоконапорного газа для данного

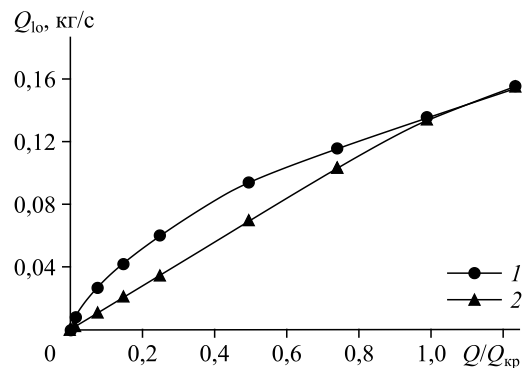


Рис. 6. Средний по времени расход эжектируемого газа.

Данные расчетов при $F = 86$ Гц, $S_c = 3$ (1) и $F = 0$ (2).

эжектора $Q_{кр} = 0,081$ кг/с, при котором в выходном сечении высоконапорного сопла при стационарном течении достигается скорость звука. Величина критического расхода рассчитывалась по изэнтропическим соотношениям [14]. Из рисунка видно, что при расходе высоконапорного газа ниже критической величины резонаторный режим имеет преимущество по сравнению со стационарным. Особенно велико оно при малых и средних относительных расходах. Например, в диапазоне расходов $(0,25 \div 0,5) \cdot Q_{кр}$ величины расходов эжектируемого газа выше на 55–35 %.

В этом же рассматриваемом диапазоне относительных расходов импульсный режим имеет заметное преимущество (47÷22 %) по суммарному расходу газа на выходе из камеры смешения Q_4 (рис. 7а). Следует отметить, что расход эжектируемого газа и суммарный расход на выходе из камеры смешения для импульсного и стационарного режимов работы сравниваются при достижении критической величины расхода высоконапорного газа.

При использовании эжекторных систем для обдува поверхности крыла, наибольшее значение имеют скорость V_4 и секундное количество движения (поток импульса) струи на выходе из камеры смешения I_4 (рис. 7б, 7с). В выбранном характерном диапазоне расходов $(0,25 \div 0,5) \cdot Q_{кр}$ преимущество импульсного режима перед стационарным по скоростям составляет 50–25 %, а по секундному количеству движения — 120–54 %. Это преимущество не теряется даже на закритических режимах. Например, при $Q = 1,22 \cdot Q_{кр}$ оно составляет ~ 5 % как для скорости, так и для количества движения.

Таким образом, резонансный импульсный режим работы эжектора на докритических режимах всегда имеет преимущество перед стационарным режимом работы по всем основным параметрам, необходимым для управления обтеканием путем обдува поверхностей крыла.

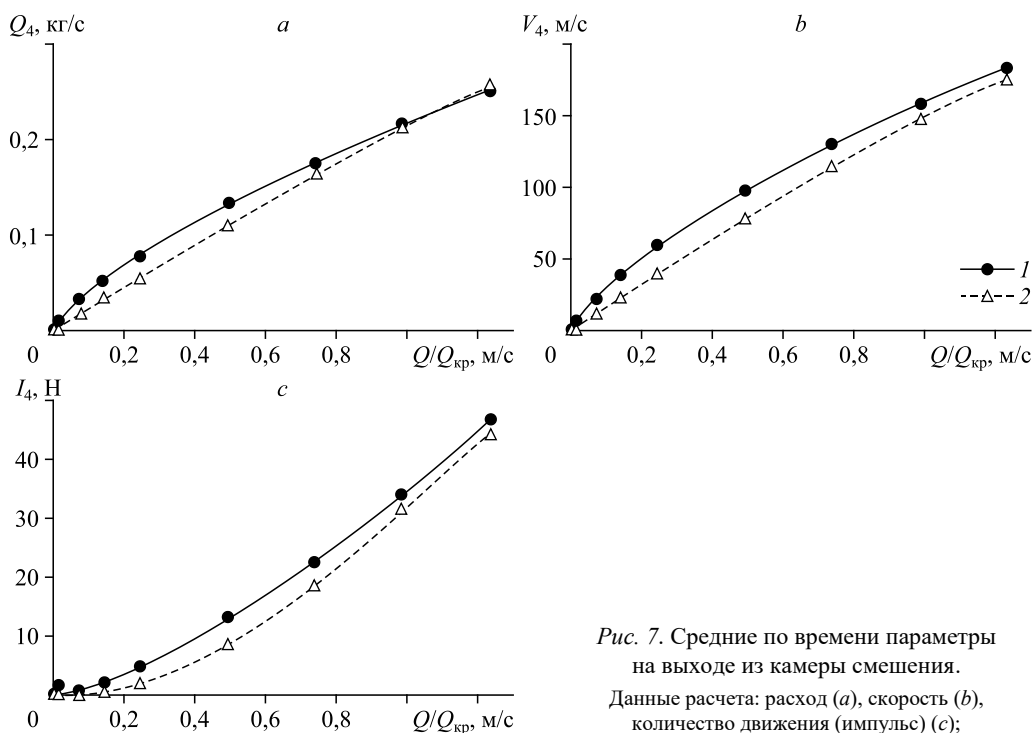


Рис. 7. Средние по времени параметры на выходе из камеры смешения.
 Данные расчета: расход (а), скорость (б), количество движения (импульс) (с);
 1 — $F = 86$ Гц, $S_c = 3$; 2 — $F = 0$.

2. Особенности течения во внутренних каналах эжектора на резонансных режимах работы

Поведение коэффициента эжекции на характерных для данного эжектора частотах становится понятным при рассмотрении особенностей течения во внутренних каналах эжектора. С этой целью с помощью численного метода, описанного в разделе 1, были получены зависимости от времени основных газодинамических величин в характерных точках течения. Так, вычислялось статическое давление в центре сферы резонатора (точка 1), скорости течения в высоконапорном (точка 2) и низконапорном (точка 3) соплах, на выходе из камеры смешения (точка 4). Расположение характерных точек показано на рис. 1*b*. Вывод результатов проводился в течение одного периода нестационарного течения, при котором характеристики течения от периода к периоду не менялись. Шаг по времени в расчетах составлял $0,001 \cdot T$ (T — период входного импульса).

На рис. 8 показано изменение по времени статического давления P_1 в центре сферы резонатора при характерных для данного эжектора частотах подачи импульсов расхода. Интегральный расход высоконапорного газа в этой серии расчетов составлял $0,0009$ кг/с. Текущее время отнесено к величине периода колебаний при соответствующей частоте ($t = 0$ соответствует началу входного импульса). Скважность импульсов равна $S_c = 3$, т.е. длительность импульса расхода на рисунке составляет $1/3$ периода. Остальные $2/3$ периода высоконапорный газ в эжектор не поступает.

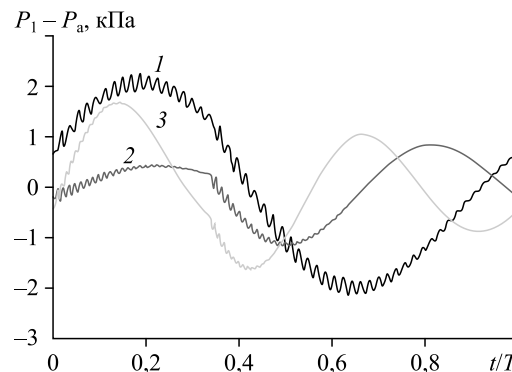
Расчеты показали следующее. При подаче высоконапорного газа с частотой 86 Гц (основной резонансной частотой) в центре резонатора устанавливаются практически гармонические колебания давления. Амплитуда колебаний давления при данной частоте максимальна. Резкие фронты входного прямоугольного импульса приводят к возбуждению быстро затухающих высокочастотных колебаний с малой амплитудой и частотой примерно 4700 Гц, что соответствует собственной частоте центрально-симметрических звуковых колебаний в сфере [15].

При подаче импульсов расхода с частотой 55 Гц начало каждого следующего импульса расхода приходится на фазу уменьшения давления в резонаторе. Таким образом, поступающие в резонатор с этой частотой импульсы расхода (или давления) находятся в противофазе с собственными колебаниями давления в резонаторе и гасят друг друга.

Из сферы резонатора газ подается в высоконапорное сопло, являющееся неотъемлемой частью резонатора Гельмгольца. В процессе расчетов определялись зависимости скорости течения V от времени в точках 2, 3, 4 на оси сопла при характерных частотах. Результаты расчетов в течение одного безразмерного периода представлены на рис. 9 для частоты $F = 86$ Гц, а на рис. 10 — для частоты $F = 55$ Гц. Видно, что при обеих частотах подаваемых импульсов расхода течение в сопле носит периодический характер с амплитудой, зависящей от частоты. В точке 2 максимальная амплитуда колебаний скорости на частоте 86 Гц (рис. 9) существенно больше, чем на частоте 55 Гц (рис. 10). На частоте 86 Гц амплитуда колебаний скорости достигает 30 м/с как в прямом, так и в обратном направлении.

Рис. 8. Зависимость статического давления от времени в центре сферы резонатора (точка 1).

$F = 86$ (1), 55 (2), 43 (3) Гц.



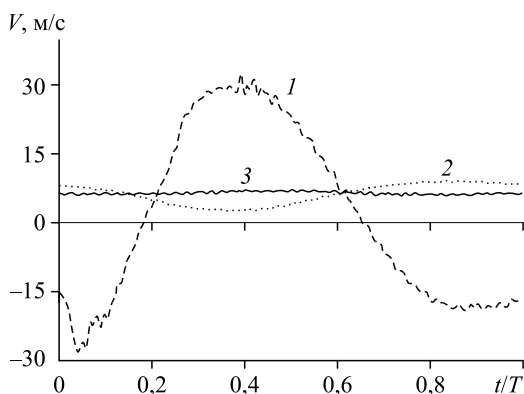


Рис. 9. Зависимость от времени скорости течения в различных сечениях эжектора при частоте $F = 86$ Гц (резонанс).

1 — точка 2, 2 — точка 3, 3 — точка 4.

Если сравнивать амплитудное значение скорости в импульсном режиме на резонансной частоте с его стационарным значением при том же расходе высоконапорного газа, то оно оказывается выше более чем в 6 раз.

Перейдем далее к анализу скоростей низконапорного газа V в точке 3.

По аналогии с поведением скоростей

в высоконапорном сопле можно было бы ожидать периодической смены направления скорости эжекции низконапорного газа. Но этого не происходит. Более того, когда высоконапорный газ не поступает в сферу резонатора и течение в высоконапорном сопле направлено в обратную сторону, скорости эжекции остаются положительными. Амплитуда и средний по времени уровень скорости эжекции максимальны на основной резонансной частоте 86 Гц. На частоте 55 Гц значения скорости становятся меньше. Однако расчеты показывают, что даже на этом режиме скорость эжекции заметно превышает уровень скоростей при стационарном режиме.

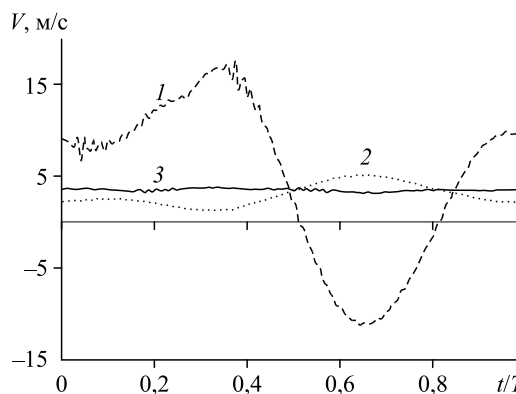
Далее высоконапорный и эжектируемый газы попадают в камеру смешения. Скорости истечения газа на срезе камеры смешения при выходе в атмосферу V приведены на рис. 9, 10 и демонстрируют существенное возрастание этой величины на резонансной частоте. Расчеты показывают, что величина средней скорости на выходе из камеры смешения на импульсных режимах на основной резонансной частоте в 3 раза выше, чем при стационарном режиме.

Следует отметить, что если в высоконапорном и низконапорном соплах колебания скорости в течение периода достигали значительных величин, то на выходе из камеры смешения амплитуда изменения скорости существенно уменьшается, и течение становится ближе к стационарному.

При использовании импульсного эжектора в системе управления обтеканием большое значение имеет величина потока импульса струи газа на выходе из эжектора. Расчеты показывают, что средняя величина потока импульса струи на основной резонансной частоте более чем в 10 раз превосходит свое значение для стационарного режима работы. Следует также напомнить, что струя на выходе из камеры смешения имеет значительный массовый расход (равный сумме расходов высоконапорного и эжектируемого газов) за счет высокого коэффициента эжекции на резонансном режиме работы. Все это делает резонаторные эжекторы весьма эффективным средством управления течением как для организации отсоса пограничного слоя, так и для обдува обтекаемых поверхностей в чувствительных зонах обтекания летательного аппарата.

Рис. 10. Зависимость от времени скорости течения в различных сечениях эжектора при частоте $F = 55$ Гц.

1 — точка 2, 2 — точка 3, 3 — точка 4.



Заключение

Классический эжектор при стационарном режиме работы имеет преимущество перед традиционными средствами струйного управления. Одно из основных преимуществ — это заметное уменьшение потребления высоконапорного газа за счет подсоса низконапорного газа. Одновременный отсос и обдув поверхности может иметь дополнительный положительный эффект. В работе [16] рассматривался пример такого положительного взаимовлияния отсоса и обдува на характеристики механизированного профиля на больших углах атаки.

Коэффициенты эжекции импульсных режимов работы эжекторов всегда выше коэффициентов эжекции стационарного режима работы. Импульсные эжекторы, свойства которых исследовались в настоящей работе, позволяют на резонансных режимах еще более снизить расход высоконапорного газа. Наибольшее преимущество резонаторный эжектор перед классическим имеет в диапазоне расходов высоконапорного газа $(0,25 \div 0,5) \cdot Q_{кр}$, где $Q_{кр}$ — критический расход, при котором скорость на выходе из высоконапорного сопла эжектора становится звуковой. В этом диапазоне расходов величины коэффициентов эжекции выше на 35–55 % по сравнению со стационарным режимом. По суммарному расходу газа на выходе из камеры смешения превышение составляет 22–47 %, по скоростям потока — на 25–50 %, по импульсу струи — на 54–120 %.

Преимущество импульсного режима над стационарным по коэффициенту эжекции уменьшается при достижении критического значения расхода высоконапорного газа, но повышенное значение секундного количества движения (импульса) выхлопной струи и ее скорости сохраняется и при сверхкритических значениях расхода. Например, при $Q = 1,22 \cdot Q_{кр}$ для выхлопной струи превышение составляет ~ 5 % как для величины скорости, так и для количества движения.

Несмотря на многие преимущества перед стационарным режимом работы эжектора, импульсные режимы, в том числе и резонансный, имеют свои недостатки. В первую очередь это усложнение конструкции эжектора, которая должна содержать прерыватель давления и резонатор, увеличивающий вес и габариты устройства. К недостаткам импульсного режима работы можно отнести и необходимость иметь источник высоконапорного газа более высокого давления.

Список обозначений

a_∞ — скорость звука,	$Q_{кр}$ — критический расход в выходном сечении высоконапорного сопла, при котором в стационарном течении достигается скорость звука,
V — объем сферы резонатора Гельмгольца,	T_1 — длительность импульса,
L — длина трубки резонатора Гельмгольца,	T — период импульса,
S — площадь трубки резонатора Гельмгольца,	$S_c = T/T_1$ — скважность импульсов,
F — задаваемая частота,	$V_{ю}$ — средняя скорость эжекции низконапорного газа на входе в канал,
F_G — резонансная частота резонатора Гельмгольца,	Q_4 — суммарный расход газа на выходе из камеры смешения,
Q — средняя по времени величина расхода высоконапорного газа,	I_4 — секундное количество движения (поток импульса) струи на выходе из камеры смешения.
$Q_{ю}$ — средняя по времени величина расхода низконапорного газа,	
Q_{max} — амплитуда прямоугольных импульсов расхода высоконапорного газа,	
$K = Q_{ю}/Q$ — коэффициент эжекции,	
P_0 — избыточное давление высоконапорного газа,	

Список литературы

1. Петров А.В. Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла. М.: Физматлит, 2011. 404 с.
2. Voevodin A.V., Gaifullin A.M., Korniyakov A.A., Petrov A.S., Soudakov G.G. Computational and experimental investigations of ejector type actuator characteristics while its using for flow control // Lobachevskii J. Mathematics. 2019. Vol. 40, No. 6. P. 828–833.

3. Воеводин А.В., Корняков А.А., Петров А.С., Петров Д.А., Судаков Г.Г. Экспериментальные и расчетные исследования характеристик импульсных тепловых актуаторов // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 107–120.
4. Воеводин А.В., Корняков А.А., Петров А.С., Петров Д.А., Судаков Г.Г. Применение струйного насоса для улучшения взлётно-посадочных характеристик крыла // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 11–20.
5. Аркадов Ю.К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М.: Физматлит, 2001. 336 с.
6. Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М. Применение насадок шевронов и табов для улучшения расходных характеристик газовых эжекторов // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 2. С. 201–208.
7. Соболев А.В. Интенсификация смешения малоразмерными струями в эжекторах с центральным соплом // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 3. С. 277–281.
8. Алексивили Н.И. К вопросу о расчете пульсирующего газового эжектора // АН Грузинской ССР. Труды института машиноведения. 1963. Т. 1. С. 73–82.
9. Джонсон Т., Янг Р. Математическая модель для определения эжектируемого потока в импульсном эжекторе с экспериментальной проверкой // Труды ASME (Paper Amer. Soc. Mech. Eng.). 1968. NWA/Fe-33.
10. Самойлова Н.В., Шумилкина Е.А. Пульсирующий эжектор. ВИМИ. Серия МШ. 1986. № 10.
11. Обухов А.В. Математическое исследование импульсного эжектора на основе уравнений Навье–Стокса // Нефть, газ и бизнес. 2015. № 2. С. 51–55.
12. Воеводин А.В., Варганов Д.И., Корняков А.А., Петров А.С., Судаков Г.Г. Импульсный резонаторный эжектор // ВИМИ. Серия МШ. 1986. № 10.
13. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Колебания и волны. Лекции. (Университетский курс общей физики). М.: Физический факультет МГУ, 2001. 144 с.
14. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика, М.: Наука, 1969. 824 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
16. Воеводин А.В., Корняков А.А., Петров Д.А., Петров А.С., Судаков Г.Г. Улучшение несущих свойств крыла на взлётно-посадочных режимах с помощью системы управления пограничным слоем с использованием актуаторов эжекторного типа // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 15. С. 71–79.

*Статья поступила в редакцию 25 марта 2021 г.,
после доработки — 29 ноября 2021 г.,
принята к публикации 14 декабря 2021 г.*