НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Влияние взаимодействия масс газа на тяговую эффективность пульсирующих двигателей

01, январь 2013

DOI: 10.7463/0113.0522954

Ханталин Д. С.

УДК 629.782

Россия, ОАО «НПО «Сатурн»
Россия, РГАТА им. П.А. Соловьёва
hantalin_ktn@mail.ru

Введение

Разработка высокочастотных пульсирующих двигателей и анализ возможных областей их применения является новым направлением в развитии авиадвигателестроения. Двигатели с пульсирующим рабочим процессом, в сравнении с двигателями стационарного истечения, имеют тенденцию к качественному увеличению тягового импульса за счет эффектов присоединения масс газа в колебательном рабочем процессе. Экспериментальными и расчетными исследованиями показана возможность значительного улучшения тяговых характеристик пульсирующих двигателей за счет волнового присоединения дополнительной массы газа в колебательном рабочем процессе (ОАО «НПО «Сатурн» [1], НТЦ имени А. Люльки [2], Институт механики МГУ [3], Центр Гленна НАСА, Rolls Royce, General Electric, Pratt&Whitney).

В известном расчетно-теоретическом исследовании одномерного разлета продуктов детонации [4] показывается возможность увеличения импульса в атмосфере в три раза по сравнению с вакуумом за счет волнового присоединения дополнительной внешней массы воздуха. В определенные моменты времени в колебательном процессе газ движется обратно к источнику и затем может стать присоединенной массой для следующего цикла, увеличивающей импульс.

В качестве усилителя тяги реактивного двигателя может использоваться пульсирующий сферический газодинамический резонатор, являющийся объектом настоящих расчетных исследований.

В этом типе резонатора (рис. 1) газ через кольцевую щель подается в сферическую полость, в которой создаются высокочастотные колебания с образованием сложных ударно-волновых структур.

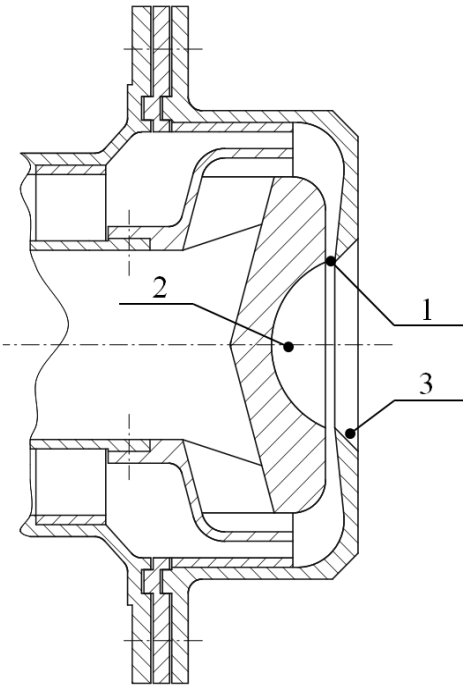

Рис. 1. Геометрия сферического резонатора
1 – критическое сечение; 2 –сферическая полость; 3 – выходное сопло

По экспериментальным данным (НТЦ имени А. Люльки) прирост тяги в резонаторе при определенном сочетании параметров газовой струи, по сравнению с тягой идеального сопла с полным расширением, может достигать 70 %. Кроме того, по результатам экспериментов на определенных режимах работы резонатора была выявлена прямо пропорциональная зависимость увеличения тяги от температуры воздуха при постоянном давлении и неизменной геометрии проточной части. Данный факт, вероятно, связан с тем, что с ростом температуры повышается упругость взаимодействующих цикловых масс газа (они меньше деформируются), и поэтому уменьшаются потери на удар. При испытаниях подобного резонатора в СНТК имени Н.Д. Кузнецова неоднократно зафиксированы случаи резкого скачкообразного повышения тяги, почти в два раза [5]. При этом следует учесть, что газовая струя, вытекающая из кольцевого сопла со звуковой скоростью, разворачивается на 90 º (рис. 2), т. е. испытывает достаточно большое гидравлическое сопротивление, которое может вызвать снижение тяги до 70 % в сравнении с идеальным соплом Лаваля (по результатам экспериментальных исследований при неоптимальном сочетании параметров газовой струи – резонатор “незапущен”).

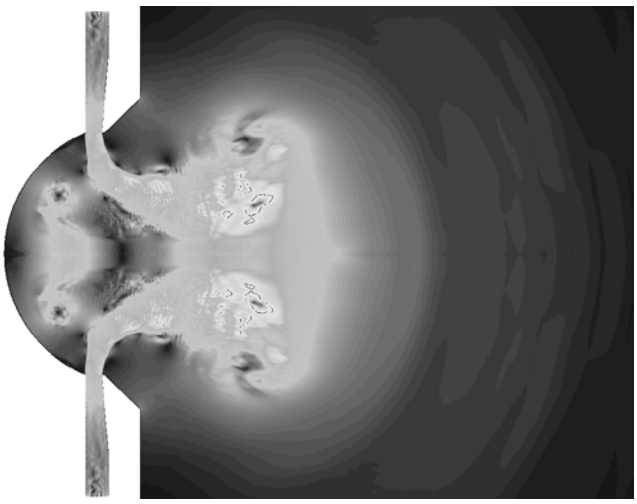

Рис. 2. Истечение газа из кольцевого сопла

В настоящее время не существует общепризнанного объяснения механизма увеличения тяги пульсирующих двигателей. Наиболее вероятным считается прирост тяги за счет присоединения масс газа в колебательном рабочем процессе.

Проведенные предварительные расчетные исследования резонатора являются продолжением работ [6] с целью дальнейшего изучения физики явлений, происходящих в нем, и оценки влияния механико-геометрических параметров на эффективность взаимодействия масс.

Задачи исследования

В численном исследовании решались следующие основные задачи:

– создание физико-математической модели резонатора;

– исследование особенностей течения в резонаторе, согласование характера течения с теорией неустановившегося истечения;

– определение влияния внешних и собственных цикловых масс газа на тяговые характеристики резонатора;

– согласование результатов расчетов с экспериментальными данными;

– исследование влияния механико-геометрических соотношений на тяговую эффективность резонатора; интенсификация процесса присоединения масс;

– определение влияния упругости масс газа на примере решения модельной задачи истечения из канала постоянного сечения.

Физико-математическая модель резонатора

Численное моделирование резонатора, с высотой критического сечения кольцевого сопла $h_{кр}$ = 0,0045 м, проводилось в вычислительном комплексе газовой динамики ANSYS

CFX. Строилась трехмерная осесимметричная модель и блочно-структурированная гексаэдрическая расчетная сетка. Ранее были проведены предварительные исследования влияния сеточной дискретизации на тягу резонатора и выбрана наиболее оптимальная сеточная структура с точки зрения достижения максимальной тяговой эффективности при умеренных затратах вычислительных (мощностных, временных) ресурсов. Геометрия расчетной области (сектор модели с углом 4 º) и сетка в сечении резонатора представлены на рис. 3.

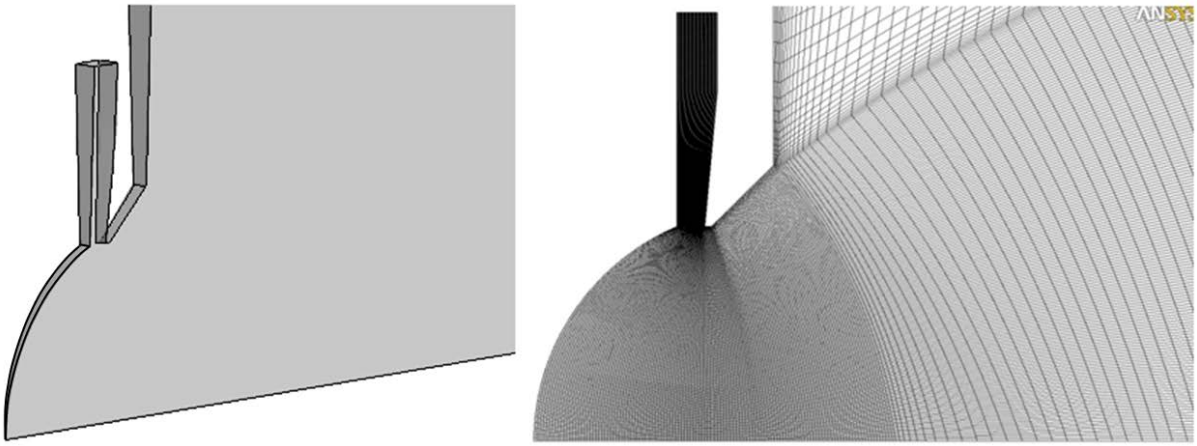

Рис. 3. Геометрия и расчетная сетка модели резонатора

Исследовалось течение совершенного газа – воздуха. Термодинамические свойства газа в пространстве за резонатором соответствовали нормальным атмосферным условиям.

Математическая модель, описывающая течение в резонаторе, построена на трехмерных по пространственным координатам нестационарных уравнениях Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, то есть с учетом трения и теплообмена. Уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, замыкались k-ε моделью турбулентности. При численном моделировании используется неявная конечно-разностная схема второго порядка точности по пространству и времени. Для повышения устойчивости и уменьшения ошибки линеаризации на каждом временном шаге применялись три внутренних итерации методом Ньютона. Расчетный шаг по времени составлял $1 \cdot 10^{-7}$ с.

Обратимся к постановке граничных условий. На твердых поверхностях ставится условие равенства нулю скорости потока, так как изучается вязкое течение – условие прилипания к стенке.

На открытой границе расчетной области (окружающая среда – допускается истечение и затекание газа) задаются параметры воздуха – статическое давление и температура. По поверхностям, ограничивающим модель в окружном направлении, ставится условие периодичности “узел к узлу”. На входе в кольцевое сопло задаются

полное давление, полная температура активного газа и степень турбулизации потока. Полное давление на входе варьировалось в диапазоне $P^*_{вх}$ = 0,20265…0,30975 МПа, а полная температура фиксировалась величиной $T^*_{вх}$ = 690 К.

Схема приложения граничных условий приведена на рис. 4.

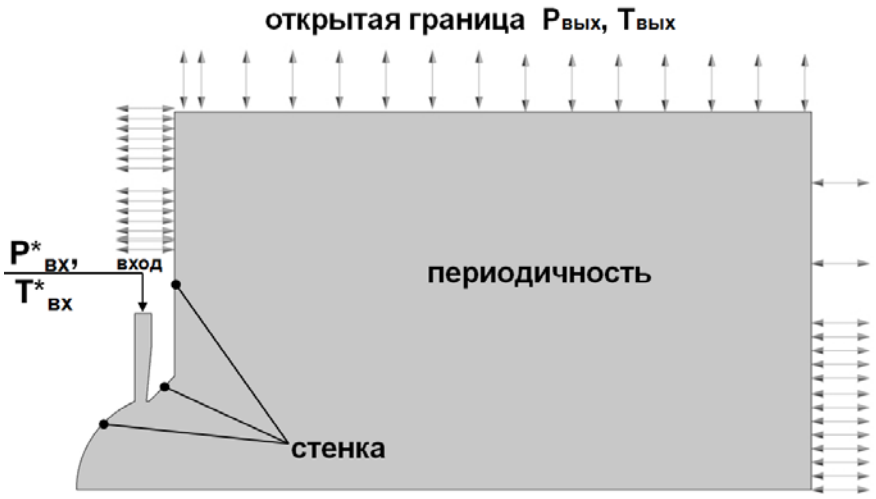

Рис. 4. Схема приложения граничных условий к расчетной модели резонатора

Основные допущения, принятые при расчетах:

– исследовался сектор модели резонатора;

– стенки трубы – гладкие, адиабатные;

– вблизи стенки пограничный слой не моделировался;

– нестационарные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, замыкались моделью турбулентной вязкости;

– не учитывалось влияние температуры на коэффициент адиабаты k, теплоемкость при постоянном давлении C_P и теплопроводность газа λ.

Согласование с теорией неустановившегося истечения

Особенностью нестационарного течения в резонаторе является возникновение высокочастотных пульсаций давления и температуры из-за соударения радиальных сверхзвуковых струй (эффект Гартмана-Шпренгера). При неустановившемся истечении активного газа из критического сечения сопла скорость в струе периодически сверхзвуковая. Распределение числа Маха в сечении модели резонатора представлено на рис. 5.

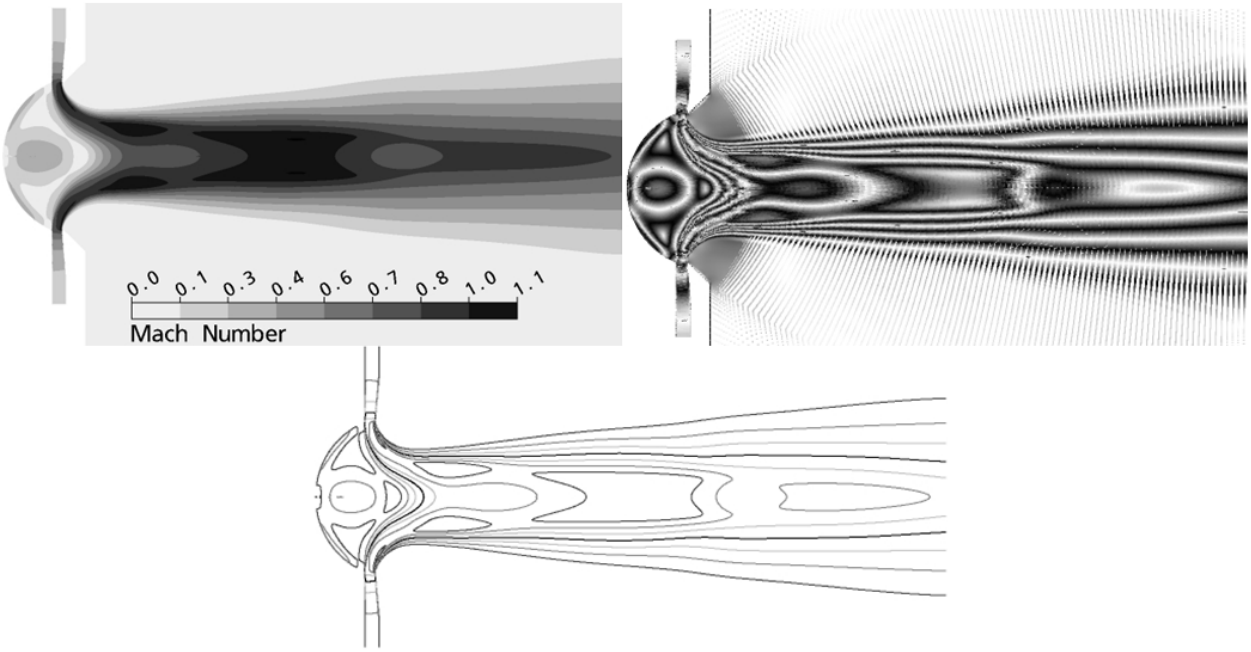

Рис. 5. Распределение числа Маха в сечении модели резонатора

Из рис. 5 видно, что вследствие сферичности полости и смыкания сверхзвуковых радиальных струй, в резонаторе вынуждается пульсирующее течение с образованием сложных ударно-волновых структур.

Из теории одностороннего истечения газа известно [7], что максимальная скорость неустановившегося истечения для воздуха в 2,2 раза больше скорости установившегося истечения. Это объясняется тем, что при неустановившемся истечении одна (передняя) часть газа может иметь энергию значительно большую, а другая (задняя) – значительно меньшую, чем средняя энергия газа, тогда как в случае установившегося потока энергия всех частиц одинакова. В связи с тем, что в неустановившихся потоках происходит непрерывное перераспределение энергии по массе движущегося газа, скорость головной части массы может намного превышать скорость хвостовой. При этом последующая масса газа догоняет предыдущую, взаимодействует с ее низкоскоростной хвостовой частью, т. е. присоединяет дополнительную массу с увеличением импульса (рис. 6).

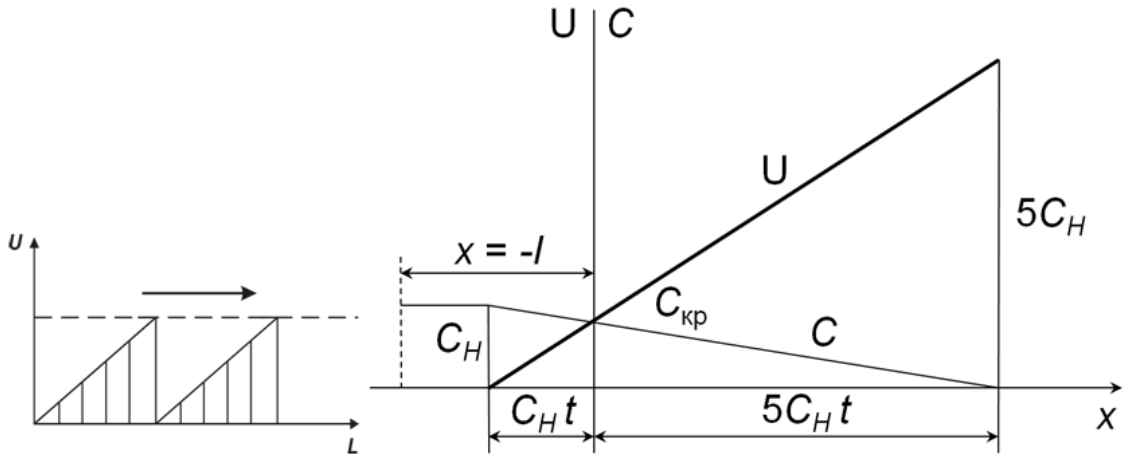

Рис. 6. Неустановившееся истечение газа
t – время; x – сечение; U – скорость истечения газа; c – скорость звука, C_H – скорость звука в исходном состоянии газа

В резонаторе течение также неустановившееся, следовательно, в основном потоке могут протекать теоретически вышеописанные физические процессы.

Для подтверждения применения теории одностороннего истечения для единичного цикла к колебательному рабочему процессу в резонаторе было проведено исследование распределения числа Маха в основном потоке (рис. 7).

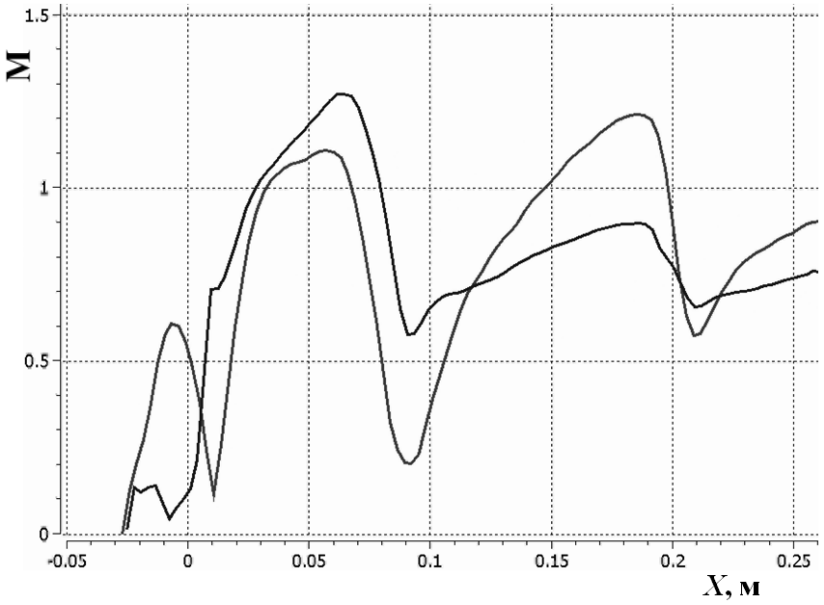

Рис. 7. Распределение числа Маха в основном потоке

Из рис. 7 видно, что распределение числа Маха близко к теоретически описанному выше процессу неустановившегося истечения. Следовательно, в колебательном рабочем процессе в резонаторе может осуществляться взаимодействие циклически истекающих масс, их присоединение.

Присоединение внешних и собственных цикловых масс газа

Важной задачей является определение того, какое именно присоединение (внешних холодных или собственных горячих цикловых масс) оказывает наибольшее влияние на тягу резонатора. Предполагается, что преобразование дополнительного импульса от присоединения массы, которое отражается на величине тяги резонатора, в большей степени будет проявляться в непосредственной близости от сферической стенки. При отдалении области присоединения массы от сферической стенки, вследствие диссипации энергии в ударных волнах и вихреобразованиях, преобразование импульса в тягу будет менее интенсивным.

На рис. 8 представлено распределение статической температуры в сечении резонатора.

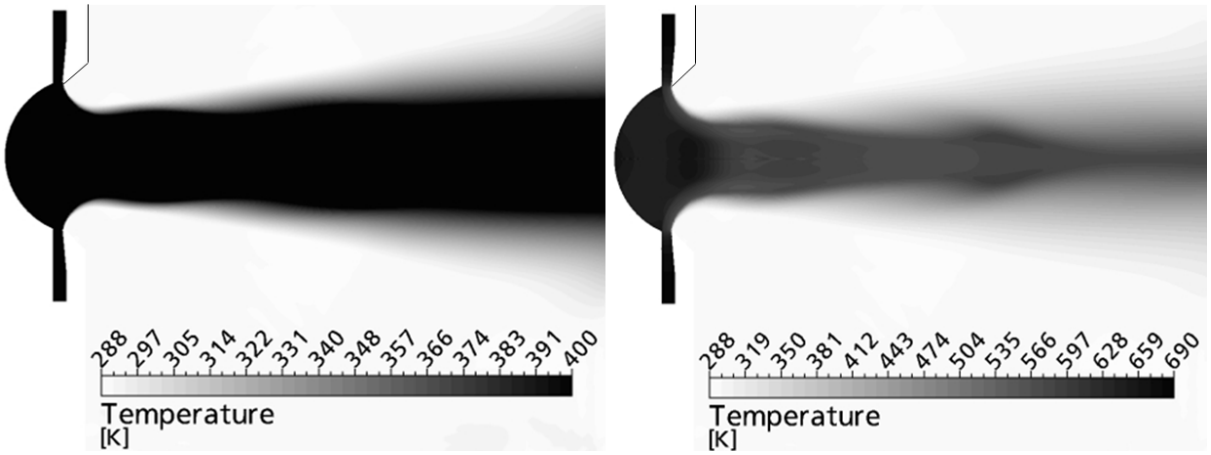

Рис. 8. Распределение статической температуры

Из рис. 8 видно, что температура в основном потоке (собственные цикловые массы), близкая к температуре на входе в кольцевое сопло, сохраняется вблизи сферической стенки. При отдалении от стенки на температуру основного потока существенное влияние оказывает холодный внешний газ, который эжектируется в области разряжения за ударными волнами и присоединяется к основному потоку.

Для оценки степени присоединения массы в пространстве за сферической стенкой проведен расчет коэффициента эжекции в двух рядах сечений, расположенных по потоку. Поверхности каждого из рядов сечений имеют равные площадь и максимальный радиус, причем высота сечений второго ряда больше сечений первого ряда (рис. 9).

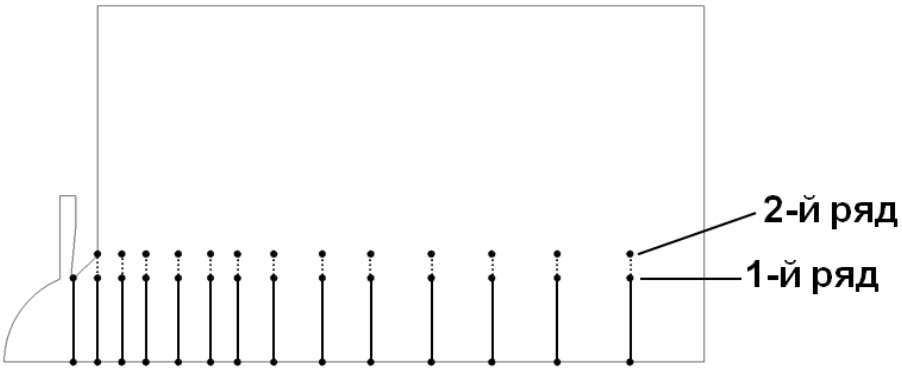

Рис. 9. Расположение контрольных сечений в модели резонатора

В данных сечениях за промежуток установившихся пульсаций тяги на сферической стенке определялся средний расход газа и коэффициент эжекции n (1) при величине полного давления на входе в резонатор $P^*_{вх}$ = 0,20265; 0,2735775 МПа:

$$n = \frac{m_i}{m_{кр}}. \qquad (1)$$

Здесь m_i – средний расход газа через сечение за промежуток установившихся пульсаций тяги; $m_{кр}$ – средний расход газа через критическое сечение кольцевого сопла за промежуток установившихся пульсаций тяги.

Следует отметить, что расчет среднего расхода в сечениях выполнялся без учета притока массы, связанного с возвратным течением.

Коэффициент эжекции в сечениях представлен на рис. 10.

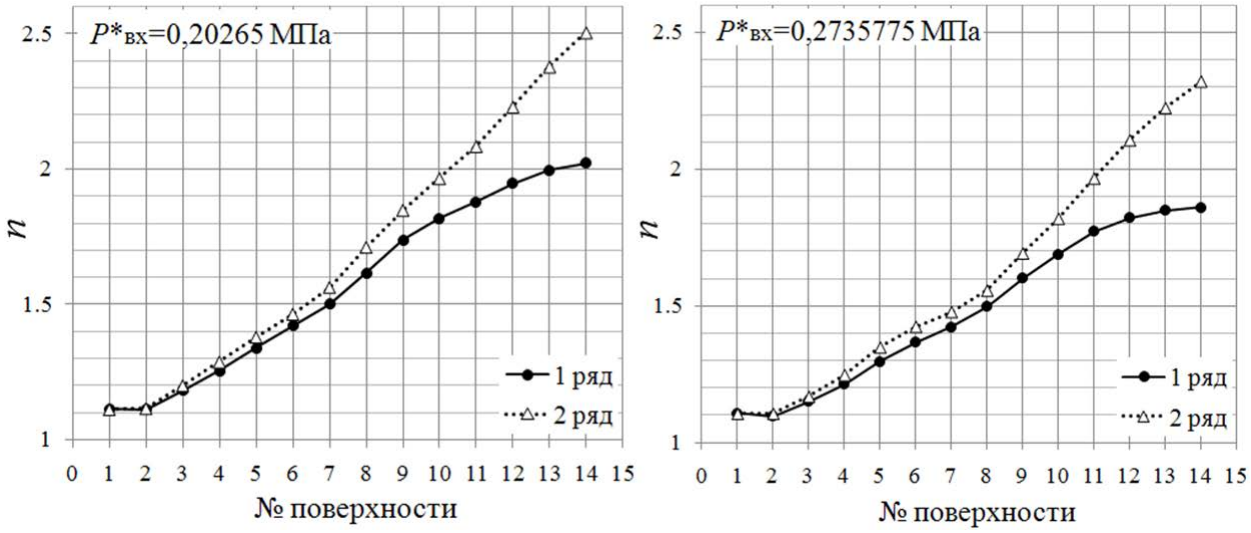

Рис. 10. Коэффициент эжекции в сечениях модели резонатора

Из рис. 10 видно, что при отдалении сечений от сферической стенки резонатора величина среднего расхода увеличивается (при неизменном значении расхода газа через

критическое сечение кольцевого сопла), что противоречит закону сохранения массы. При этом возрастает и коэффициент эжекции n. Данное противоречие разрешается при условии того, что происходит присоединение массы. Отметим, что в случае стационарного истечения расход газа при определении его в сечениях фиксированной высоты должен снижаться при отдалении сечений от сопла, вследствие распространения газа в окружающую среду. В нестационарном процессе истечения в резонаторе величина расхода, напротив, при отдалении от выходного сопла увеличивается, что можно объяснить присоединением дополнительной массы.

В сечениях второго ряда, начиная с десятого сечения, коэффициент эжекции n больше, чем в сечениях первого ряда. Данный факт может быть объяснен интенсификацией процесса присоединения внешней холодной массы воздуха, эжектируемой в основной поток.

Для величины полного давления на входе в кольцевое сопло $P^*_{вх}$ = 0,2735775 МПа коэффициент эжекции n ниже, чем при $P^*_{вх}$ = 0,20265 МПа. Это может объясняться увеличением частоты пульсации в колебательном процессе при повышении давления на входе в резонатор, в связи с чем меньшая доля внешней массы проникает в разряжения между периодически отходящими от сферической полости ударными волнами (рис. 11).

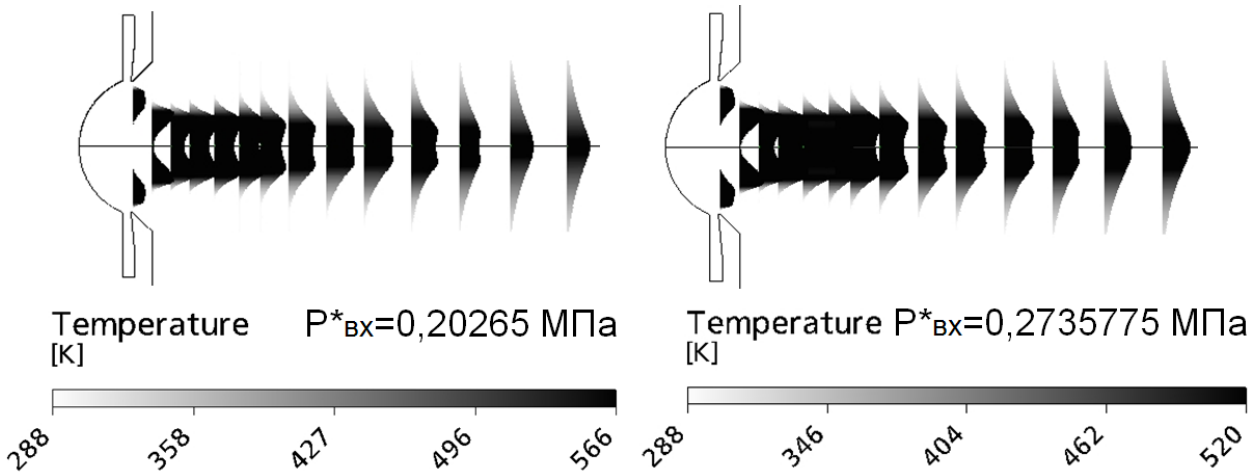

Рис. 11. Температурные векторы нормальные сечениям

На рис. 11 в сечениях резонатора представлены нормальные векторы температуры в момент установившихся пульсаций тяги. Минимальное значение на шкале соответствует температуре при адиабатическом расширении газа. Из рис. 11 видно, что наибольшую долю в сечениях, близких к сферической стенке, имеют высокотемпературные цикловые массы активной (неприсоединенной) газовой струи.

Из вышесказанного следует, что однозначное установление степени влияния процесса присоединения внешних или собственных масс на повышение тяги резонатора является сложной задачей, требующей комплексных детальных исследований.

Результаты расчетов. Согласование с экспериментальными данными.

Проведены предварительные численные исследования сферического газодинамического резонатора.

Эффективность резонатора за период установившегося колебательного процесса оценивалась:

– величиной осредненной по времени тяги при колебаниях газа

$$R(t) = \frac{1}{t}\int_{t1}^{t2}(F - F_0)\,dt, \qquad (2)$$

где F – сила, действующая на стенки со стороны потока, в направлении оси симметрии, F_0 – сила от противодавления, действующая на стенки со стороны покоящегося газа с давлением в 0,101325 МПа, в направлении оси симметрии;

– величиной осредненной по времени удельной тяги при колебаниях газа

$$R_{уд}(t) = \frac{1}{t}\int_{t1}^{t2}\left(\frac{R}{m}\right)dt, \qquad (3)$$

где m – расход воздуха через кольцевое сопло.

Тяговые характеристики резонатора сравнивались с тягой идеального сопла Лаваля, рассчитанной по известным формулам. Результаты расчета представлены на рис. 12.

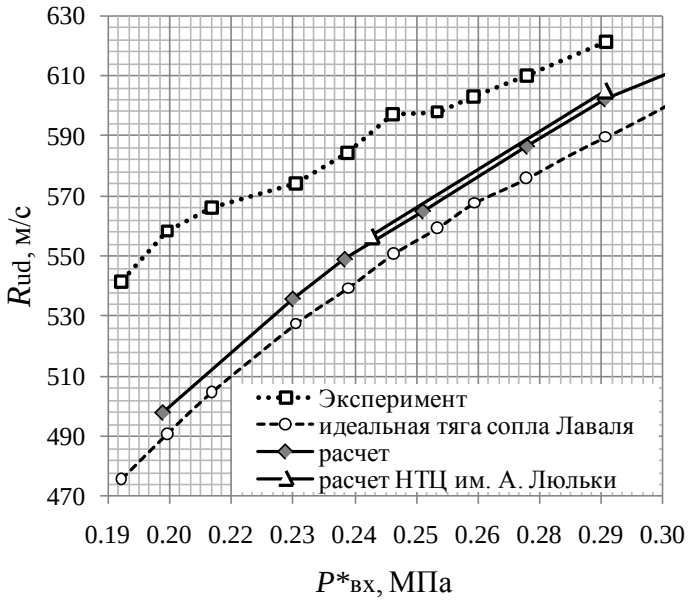

Рис. 12. Результаты предварительных расчетов

Из рис. 12 видно, что удельная расчетная тяга превышает тягу идеального сопла Лаваля (максимальное различие 3 %) несмотря на то, что поток, разворачиваясь на 90 º, испытывает большие гидравлические потери по тяге (до 70 % при неоптимальных параметрах газовой струи). Это позволяет сделать вывод о присоединении массы в пульсирующем течении газа, увеличивающей импульс. Также видно, что результаты расчетов в НТЦ имени А. Люльки, проведенные с помощью иного программного комплекса, сходны с текущими результатами предварительных исследований.

В связи с тем, что в исследуемом типе резонатора наблюдается высокий уровень гидравлических потерь при развороте потока газа на 90 º, целесообразно рассмотреть резонаторы с прямолинейным течением [8].

На рис. 13 и рис. 14 приведены результаты расчетов резонатора в координатах расход воздуха – полное давление, тяга – полное давление.

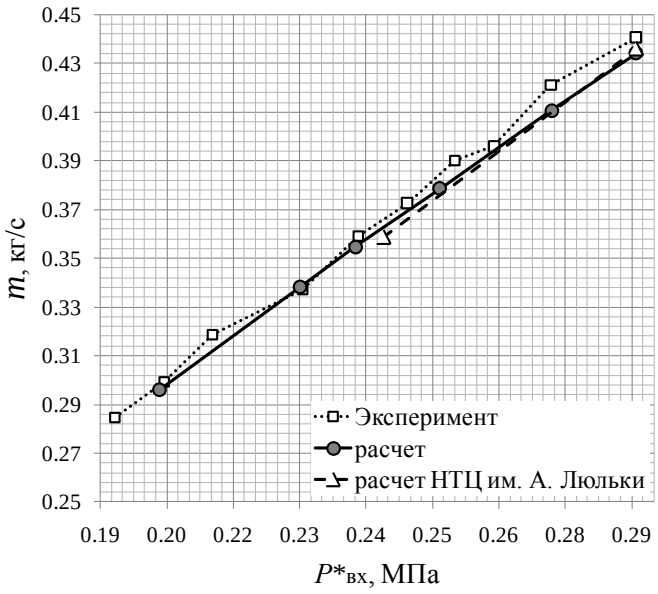

Рис. 13. Зависимость расхода от полного давления на входе в кольцевое сопло

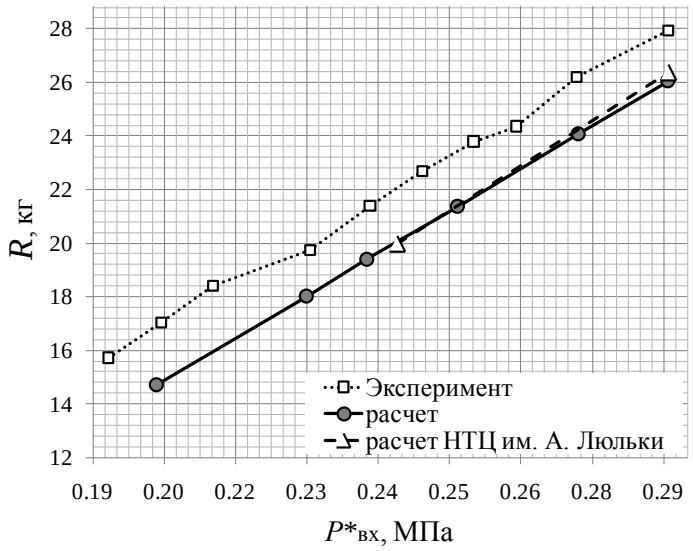

Рис. 14. Зависимость тяги от полного давления на входе в кольцевое сопло

Из графиков (рис. 13 и рис. 14) видно, что при эквивалентных с экспериментом давлениях на входе в кольцевое сопло (высота критического сечения $h_{кр}$ = 0,0045 м) расчетные величины расхода воздуха близки к экспериментальным, а значения тяги ниже экспериментальных приблизительно на 10 %. Следовательно, в расчетном колебательном рабочем процессе преобразование кинетической энергии струи в тягу в результате взаимодействия масс газа менее интенсивное, чем в реальных условиях.

Результаты предварительных исследований также показали, что имеется различие (до 11 %) в уровне удельной тяги между экспериментальными и расчетными данными (без учета доверительного интервала эксперимента), особенно в диапазоне полного давления на входе в кольцевое сопло $P^*_{вх}$ = 0,20265…0,2533125 МПа.

Следует отметить, что время получения каждой точки эксперимента составляло до нескольких секунд, тогда как время проведения расчетов (в связи с большими затратами машинных ресурсов) составляло сотые доли секунды.

Проблема несоответствия результатов экспериментальным данным для исследуемой геометрии резонатора требует совершенствования физико-математической модели, поиска других численных схем для расчета быстропротекающих процессов при достаточном времени расчета.

Интенсификация процесса присоединения масс

С целью повышения тяговой эффективности проведены исследования влияния механико-геометрических соотношений резонатора. Для этого к выходному соплу резонатора пристыковывались насадки. Исследовалось влияние на тяговые

характеристики геометрической формы насадка (цилиндр; конус), длины насадка L и угла конусности α. Исходная геометрия насадков приведена на рис. 15.

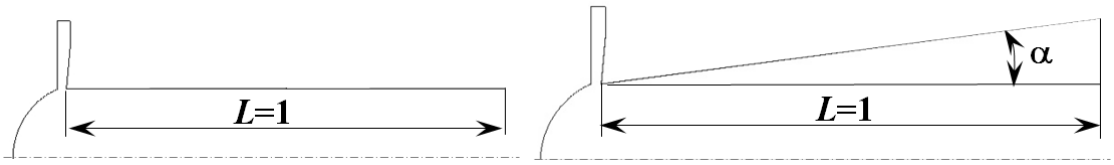

Рис. 15. Конфигурация насадков
L = 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,5 – безразмерная длина насадка; α = 7,5; 12,5; 16,5 º – угол конусности насадка

Результаты расчета резонатора с насадками приведены на рис. 16.

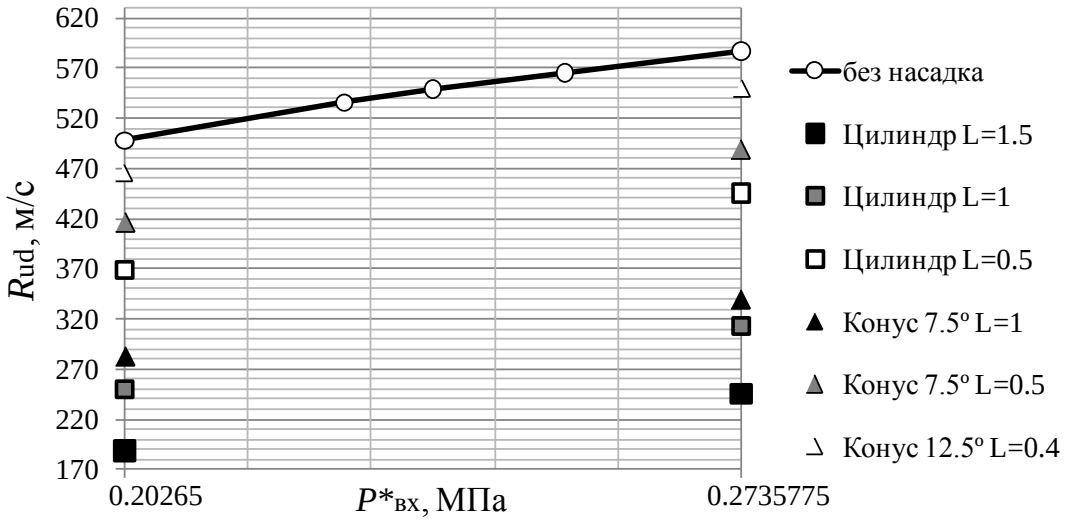

Рис. 16. Результаты расчета резонатора с насадками

Из рис. 16 видно, что тяговая эффективность резонатора с любой конфигурацией насадка меньше, чем у резонатора без насадка. Установлено, что при использовании насадка снижается интенсивность (амплитуда) колебательного процесса (вплоть до полного затухания пульсаций) и, как следствие, интенсивность присоединения масс, влияющая на удельную тягу.

Анализ проведенных расчетов резонатора с насадками показал, что:

– короткие насадки более эффективны, чем длинные, вследствие большей интенсивности взаимодействия собственных масс и увеличения влияния на колебательный процесс внешней массы газа, а конические эффективнее, чем цилиндрические.

– для резонатора с насадками имеется порог по величине удельной тяги (конфигурация: конический насадок, L = 0,4; α =12,5 º), когда дальнейшее укорочение насадка и увеличение угла конусности не влияет на тяговую эффективность.

С целью возможного усиления влияния процесса присоединения масс на тяговую эффективность в модель резонатора была введена стенка, расположенная на различном расстоянии от сферической полости. При испытаниях резонатора в НТЦ имени А. Люльки было установлено увеличение тяговой эффективности при монтаже твердого тела (стенки) на некотором расстоянии от сферической полости. Схема вариантов расположения стенки приведена на рис. 17.

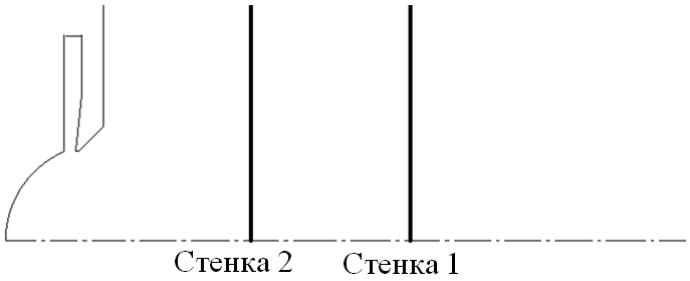

Рис. 17. Схема расположения стенки в модели резонатора

Тяговая эффективность оценивалась величиной относительной удельной тяги, определяемой по формуле.

$$R_{уд_отн} = \frac{R_{уд}(t)}{R_{ид}}, \qquad (4)$$

Здесь $R_{ид}$ – идеальная тяга сопла Лаваля.

Результаты расчета резонатора со стенкой представлены на рис. 18.

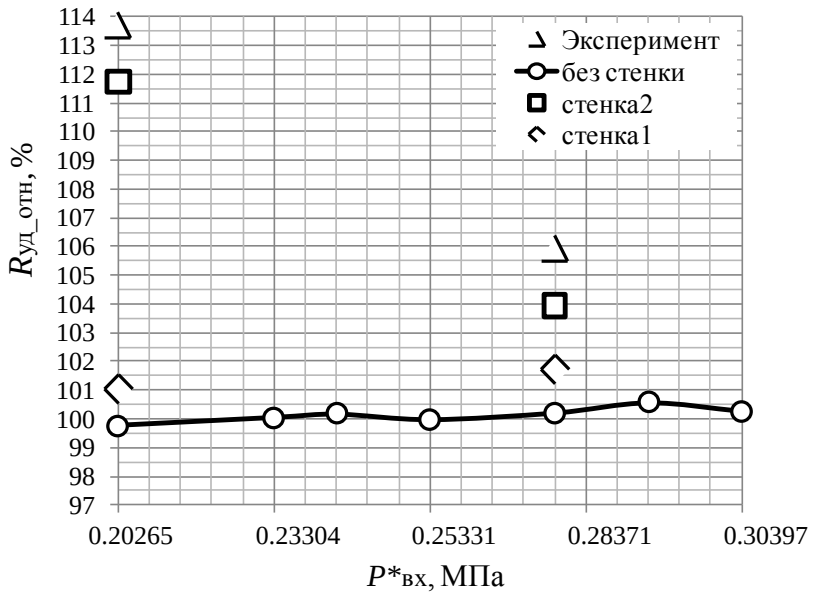

Рис. 18. Результаты расчета резонатора с искусственной стенкой

Из рис. 18 видно, что при смещении стенки к сферической полости значения относительной тяги приближаются к экспериментальным и существенно превышают уровень идеальной тяги сопла Лаваля. Следовательно, постановка стенки в непосредственной близости к сферической полости интенсифицирует колебательный процесс присоединения масс. Причем, расчетный уровень тяги резонатора со стенкой (вариант «Стенка 2») практически равен экспериментальному уровню тяги резонатора без стенки.

Визуализация колебательного процесса резонатора со стенкой в виде зависимости пульсаций усилия на сферической стенке от числа итераций расчета приведена на рис. 19.

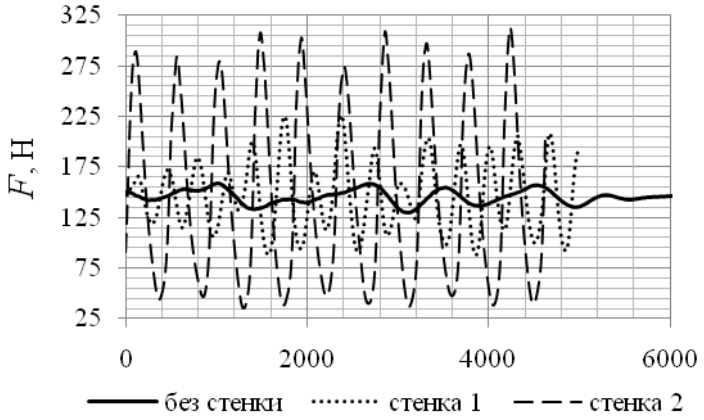

Рис. 19 Колебательный процесс в резонаторе с искусственной стенкой

Из рис. 19 видно, что при смещении стенки ближе к сферической полости (вариант «Стенка 2») возрастает амплитуда колебаний усилия F на сферической стенке в сравнении

с резонатором, рассчитанным без стенки и с вариантом резонатора «Стенка 1», что показывает интенсификацию колебательного процесса присоединения масс.

Связь температуры циклового газа с потерями на удар

При испытаниях резонатора в НТЦ имени А. Люльки была установлена прямо пропорциональная зависимость тяги от температуры на входе в кольцевое сопло, т. е. с увеличением температуры тяга существенно возрастала. Однозначного объяснения данного эффекта в настоящее время не существует. Можно предполагать, что рост тяги при увеличении температуры связан с возрастанием упругости газа, за счет чего при взаимодействии (контакте) масс снижаются потери на удар (они меньше деформируются), при этом повышается тяговая эффективность.

Для определения влияния упругости газа была решена модельная задача единичного истечения (распад произвольного разрыва) из трубы прямоугольной формы, в которой имеется прослойка вакуума различной осевой протяженности. Схема постановки задачи приведена на рис. 20.

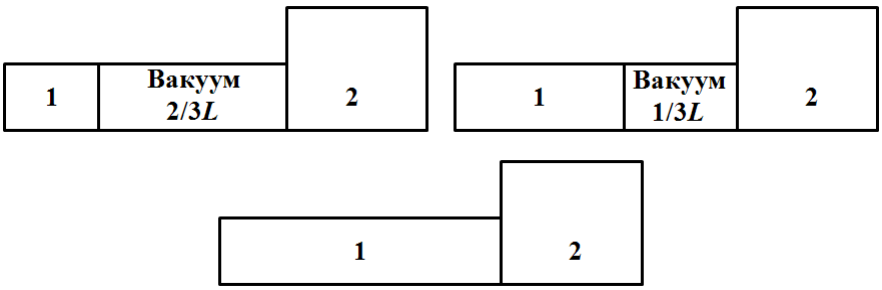

Рис. 20. Схема распределения масс в трубе
1 – область активного горячего газа; 2 – протяженная область холодного внешнего газа

Полное давление активного газа $P^*_{акт}$ = 1,01325 МПа. Давление внешнего газа $P_{вн}$ = 0,101325 МПа. Полное давление в области вакуума $P^*_{вак} = 1{,}01325 \cdot 10^{-3}$ МПа. Исследовалось влияние низкой и высокой температуры газа: $T^*_{акт} = T_{вн} = T^*_{вак}$ = 288; 2305 К.

Эффективность рабочего процесса оценивалась по формуле

$$\delta = \frac{I_{уд}}{I_{уд_квазз}} \cdot 100. \qquad (5)$$

В (5) интегральный удельный импульс определялся из формулы

$$I_{уд} = \int_{t1}^{t2} \frac{\Delta F(t)}{M} dt. \qquad (6)$$

Здесь $\Delta F(t)=F_T - F_0$ – разность силы F_T, действующей на торцевую стенку со стороны газа в трубе, и силы противодавления F_0, действующей на торцевую стенку со стороны атмосферы за время затухания процесса; M – масса активного газа.

Квазистационарный удельный импульс определялся по формуле [9]

$$I_{УД_КВАЗ} = 0{,}283 \cdot \sqrt{T_Z \cdot \left(\frac{1}{\pi_Z}\right)^{1{,}75}} \left(\pi_Z^{0{,}25} - 1\right) \cdot \left(1{,}5 \cdot \pi_Z^{0{,}5} + 12 \cdot \pi_Z^{0{,}25} + 8\right). \quad (7)$$

Здесь π_z – отношение давлений в активном и внешнем газах; T_z – полная температура активного газа.

Результаты расчета представлены на рис. 21.

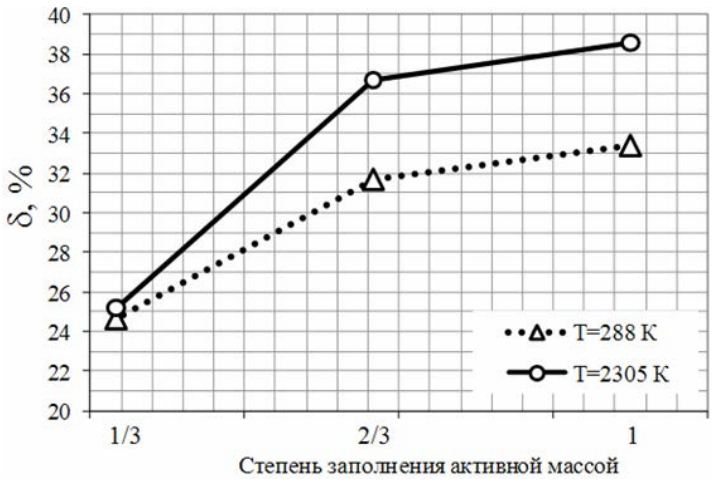

Рис. 21. Результаты расчета модельной задачи

Из рис. 21 видно, что для одинаковых начальных условий с ростом температуры увеличивается эффективность процесса. При полном заполнении трубы активным газом (отсутствует зона вакуума) потери процесса наименьшие. При моделировании зоны вакуума, частицы активного газа пятикратно ускоряясь, ударяются о внешний газ с генерацией ударных потерь. Поэтому при наибольшей протяженности зоны вакуума, соответствующей наименьшему заполнению трубы активным газом, потери на удар максимальны.

Выводы

Из проведенных предварительных исследований резонатора можно сделать следующие выводы:

– пульсирующий характер течения в резонаторе согласуется с теорией неустановившегося истечения, в котором возможно взаимодействие и присоединение циклические истекающих масс газа;

– повышение тяговой эффективности резонатора происходит вследствие присоединения масс (собственных цикловых и внешних);

– учитывая разворот звукового потока газа в резонаторе на 90 º и, соответственно, высокий уровень гидравлических потерь, полученные значения удельной тяги, превышающие тягу идеального сопла Лаваля, позволяют сделать вывод о присоединении массы в пульсирующем течении газа, повышающем тяговую эффективность;

– для соответствия экспериментальным данным требуется дальнейшее совершенствование физико-математической модели и поиск иных численных схем, моделирующих быстропротекающие процессы;

– применение насадка уменьшает тяговую эффективность, в сравнении с резонатором без насадка, вследствие снижения интенсивности колебательного рабочего процесса и присоединения массы;

– постановка искусственной стенки в область течения резонатора повышает интенсивность колебательного процесса и позволяет увеличить относительную удельную тягу резонатора до уровня, близкого к экспериментальным данным;

– решением модельной задачи распада произвольного разрыва в трубе с прослойкой вакуума установлено влияние температуры на ударные потери в единичном цикле. Можно предполагать, что с увеличением температуры газа растет его упругость, и взаимодействующие массы меньше деформируются. При этом снижаются потери на удар, и повышается тяговая эффективность рабочего процесса.

Заключение

Проведенные расчетные исследования течения в газодинамическом резонаторе пульсирующего двигателя показали возможность управления тяговыми характеристиками резонатора за счет процесса присоединения масс. Однозначное установление степени влияния процесса присоединения внешних или собственных цикловых масс на повышение тяги резонатора является сложной научно-технической задачей, требующей дополнительных детальных исследований.

Список литературы

1. Богданов В.И. Взаимодействие масс в рабочем процессе пульсирующих реактивных двигателей как средство повышения их тяговой эффективности // Инженерно-физический журнал. 2006. Т.79, № 3. С. 85-90.

2. Нечаев Ю.Н., Тарасов А.И. Перспективы применения в авиации пульсирующих детонационных двигателей с двухступенчатым сгоранием топлива и высокочастотным резонатором // Труды ЦИАМ им. П. И. Баранова. 2006. № 1300 : Проблемы создания двигателей детонационного горения. С. 7-27.

3. Левин В.А., Смехов Г.Д., Тарасов А.И. Расчетно-экспериментальное исследование модели пульсирующего детонационного двигателя. М., 1998. (Препринт / Ин-т механики МГУ. № 42-98).

4. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.

5. Некоторые аспекты стендовой отработки пульсирующего детонационного двигателя, работающего на керосинно-воздушном топливе / В.А. Елизаров, Т.Н. Кузнецова, В.Н. Лавров, В.В. Рогалев, Ю.И. Цыбизов // Сборник научных докладов III международного совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М.: ИМАШ РАН, 2002. С. 338-345.

6. Богданов В.И., Ханталин Д.С. Эффекты взаимодействия масс при нестационарном истечении газа из трубы // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2010. № 1 (16). С. 89-96.

7. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. В 2 т. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 832 с.

8. Баев В.К., Москвичев Д.Ю., Потапкин А.В. Управление тяговыми характеристиками прямоточной камеры сгорания пульсирующего горения с помощью акустических резонаторов // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 3-6.

9. Кудрин О.И. Пульсирующее реактивное сопло с присоединением дополнительной массы // Труды МАИ. 1958. Т. 97. С. 49-150.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Influence of interaction of gas masses on efficiency of intermittent-cycle engines

01, January 2013

DOI: 10.7463/0113.0522954

Khantalin D.S.

Russia, NPO Saturn JSC

Russia, Rybinsk State Aviation Technical University, PA Soloviev

hantalin_ktn@mail.ru

The article presents results of numerical investigation of mass interaction influence on propulsion performance characteristics of a spherical resonator of an intermittent-cycle engine. Analysis of the resonator's flow features compared to the theory of unsteady outflow was conducted. Main attention was paid to research of influence of joining cyclic and external masses on traction performance. A problem of improving the numerical method for fast processes was formulated while comparing calculation data with experimental results. Impact on propulsion performance characteristics of mechanical and geometrical relations, intensification of the process of joining masses and elasticity of high-temperature gas was also investigated. On the basis of the obtained results the need for more integrated studies of non-stationary effects of the oscillatory pulsing process was indicated.

Publications with keywords: resonator, the mass attached, pulse engine, interaction of the masses, oscillatory process, quasi-steady

Publications with words: resonator, the mass attached, pulse engine, interaction of the masses, oscillatory process, quasi-steady

References

1. Bogdanov V.I. Vzaimodeistvie mass v rabochem protsesse pul'siruiushchikh reaktivnykh dvigatelei kak sredstvo povysheniia ikh tiagovoi effektivnosti [Interaction of Masses in the Operating Process of Pulse Jet Engines as a Means of Increasing Their Thrust Efficiency]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2006, vol. 79, no. 3, pp. 85-90. (Trans. version: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2006, vol. 79, no. 3, pp. 85-90.).

2. Nechaev Iu.N., Tarasov A.I. Perspektivy primeneniia v aviatsii pul'siruiushchikh detonatsionnykh dvigatelei s dvukhstupenchatym sgoraniem topliva i vysokochastotnym rezonatorom [Perspectives of application in the aviation of pulsing detonation engines with two-stage combustion of a fuel and high-frequency resonator]. *Trudy TsIAM im. P.I. Baranova* [Baranov Central Institute of Aviation Motors], 2006, no. 1300: Problemy

sozdaniia dvigatelei detonatsionnogo goreniia [Problems of creation of the engines of the detonation combustion], pp. 7-27.

3. Levin V.A., Smekhov G.D., Tarasov A.I. *Raschetno-eksperimental'noe issledovanie modeli pul'siruiushchego detonatsionnogo dvigatelia* [Computational and experimental research of model of pulse detonation engine]. Moscow, Institute of Mechanics of MSU, 1998. Non published .

4. Baum F.A., Orlenko L.P., Staniukovich K.P. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow, Nauka, 1975. 704 p.

5. Elizarov V.A., Kuznetsova T.N., Lavrov V.N., Rogalev V.V., Tsybizov Iu.I. Nekotorye aspekty stendovoi otrabotki pul'siruiushchego detonatsionnogo dvigatelia, rabotaiushchego na kerosinno-vozdushnom toplive [Some aspects of the test bench testing of pulse detonation engine, running on kerosene-air fuel]. *Sbornik nauchnykh dokladov 3 mezhdunarodnogo soveshchaniia po problemam energoakkumulirovaniia i ekologii v mashinostroenii, energetike i na transporte* [Collection of scientific papers of the 3rd International Meeting on energy storage and the environment in engineering, energy and transport.]. Moscow, IMASh RAN Publ., 2002, pp. 338-345.

6. Bogdanov V.I., Khantalin D.S. Effekty vzaimodeistviia mass pri nestatsionarnom istechenii gaza iz truby [Mass interaction effects under unsteady gas outflow out of the pipe]. *Vestnik RGATA im. P.A. Solov'eva* [Herald of the Solov'ev RSATA], 2010, no. 1 (16), pp. 89-96.

7. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Solov'ev B.C., Staniukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. *Fizika vzryva. V 2 t. T. 1* [Physics of explosion. In 2 vols. Vol.1]. Moscow, FIZMATLIT, 2004. 832 p.

8. Baev V.K., Moskvichev D.Iu., Potapkin A.V. Upravlenie tiagovymi kharakteristikami priamotochnoi kamery sgoraniia pul'siruiushchego goreniia s pomoshch'iu akusticheskikh rezonatorov [Control of thrust characteristics of a scramjet combustor with vibrational combustion using acoustic resonators]. *Fizika goreniia i vzryva*, 2000, vol. 36, no. 5, pp. 3-6. (Trans. version: *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 5, pp. 553-556.).

9. Kudrin O.I. Pul'siruiushchee reaktivnoe soplo s prisoedineniem dopolnitel'noi massy [Pulsating jet nozzle with the accession of additional mass]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 1958, vol. 97, pp. 49-150.