

Численное исследование формирования тягового усилия в двухконтурном эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе и способ его форсирования за счет перераспределения тепловыделения по длине газохода

К.В. МИГАЛИН,
канд. техн. наук,
Д.А. ЧАРНЦЕВ,
канд. техн. наук
(ООО НПФ «Ротор»,
Тольятти)
migalinK7@gmail.com

На основе численного расчета показан механизм формирования тягового усилия в эжекторном двухконтурном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе. Показано, как воздействием на процесс горения за счет изменения тепловыделения по длине газохода можно существенно улучшить удельные показатели пульсирующего двигателя. Дано объяснение наблюдаемому физическому явлению на основе эффекта присоединенных воздушных масс.

Эжекторный двухконтурный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, зона горения, зона тепловыделения, сдвиг зоны тепловыделения, присоединенные воздушные массы, реактивная тяга

Актуальность вопроса формирования реактивной тяги пульсирующим двигателем объясняется не только сложностью физической картины этого явления, но и объективными трудностями ее прямого измерения. Понимание физики процесса осложнено в первую очередь пульсирующим протеканием рабочего процесса в двигателе и, соответственно, реактивной тягой пульсирующего характера, передаваемой на конструкцию моторного стенда и силоизмерительные устройства. Ранее исследователи при работе над двигателем «Аргус – Шмидт», пытаясь решить эту проблему за сравнительно короткий временной промежуток, разработали и испытали около десяти моторных стендов, с помощью которых была сделана попытка получить достоверное осредненное значение реактивной тяги [1, 2]. В итоге было получено значение тяги двигателя «Аргус – Шмидт-014» – около 3000 Н. Этот двигатель устанавливался на самолет-снаряд «Фау-1». При весе летательного аппарата 2200 кг этот двигатель был способен разгонять его до скорости 800 км/ч. Тяговооруженность «Фау-1» при этом составляла около 1,4 Н/кг. Это значение почти вдвое меньше зафиксированных на современных реактивных летательных аппаратах. Необходимо учитывать и тот факт, что с ростом скорости полета тяга двигателя «Аргус – Шмидт» существенно снижается и на скорости 650–800 км/ч уменьшается более чем на 30–40 %. При небольшом дальнейшем увеличении скорости (более 800 км/ч) тяга снижается еще больше, так как двигатель переходит в режим прямого двигателя.

Что явилось причиной низкого значения тяговооруженности – заниженные значения реактивной тяги, полученные в экспериментах, или не учитываемые в процессе обработки экспериментов такие явления, как удар, толчок и рывок, – не установлено. Существует точка зрения, что в создании силы тяги пульсирующего двигателя участвуют не только импульсы от скорости воздушных потоков и импульса давления, но и эффект от действия воздушных масс, присоединенных к реактивной струе [3]. Впоследствии было установлено, что увеличение импульса возникает и в случае безэжекторного присоединения массы [4–7]. Отмечается, что эффект увеличения тяги от действия присоединенных масс усиливается с увеличением отношения длины двигателя к диаметру L/D , и тяга может увеличиваться до 40 %.

Рассматриваемый в данной работе двигатель в несколько раз короче традиционных пульсирующих двигателей ($L/D = 6$) и снабжен диффузором в хвостовой части. Была сделана попытка рассчитать все составляющие тяги и понять процесс ее формирования как от действия импульса реактивных струй, так и от действия сил давления на отдельные детали эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, а также исследовать влияние других факторов на тягу двигателя, в частности распределение тепловыделения по длине газохода.

На рис. 1 схематично показан эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель и зоны формирования тяги двух типов. Первый тип – это зоны выброса реактивных струй, второй – элементы конструкции, на которые осуществляется давление газов в процессе рабочего цикла. Выброс струи из резонаторной трубы создает положительную тягу, а выброс из первого смесителя и щели между смесителями – отрицательную. Вследствие давления на стенки двигателя формируется как положительная тяга на передней стенке камеры сгорания и диффузоре, так и отрицательная тяга на задней стенке и козырьке.

На рис. 1 знаком «+» отмечены места создания положительной тяги и знаком «-» отрицательной.

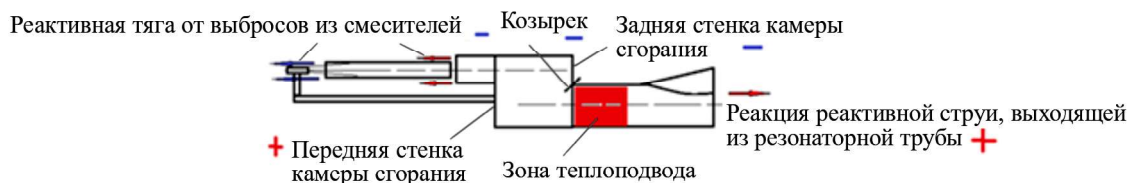


Рис. 1

Решение поставленной задачи строится на принятии такого допущения, как замена процесса горения циклическим теплоподводом, производимым в зону горения двигателя с частотой 100 Гц (рис. 1, зона теплоподвода). Величина теплоподвода подбирается опытным путем до достижения пиковых значений температуры в камере сгорания уровня 2500 К. Для описания газодинамических процессов используется гипотеза об идеальном сжимаемом однокомпонентном теплопроводном газе. В этом случае движение газа описывается системой уравнений движения Эйлера:

- уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0; \quad (1)$$

- уравнением баланса импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) + \nabla p - \rho \mathbf{f} = 0; \quad (2)$$

- уравнением баланса полной энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) + \nabla \cdot (p \mathbf{V}) - \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (3)$$

- уравнениями состояния и связи внутренней и полной энергии

$$p = p(\rho, e); \quad E = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}}{2} + e; \quad e = cT, \quad (4)$$

где ρ – плотность; $\mathbf{V}$ – вектор скорости; p – давление; E , e – удельная полная и удельная внутренняя энергия; c – теплоемкость газа.

В качестве численного метода решения использовался метод крупных частиц Давыдова. Конечно-разностная схема явная, первого порядка точности. Дискретизация расчетной области производилась однородной ортогональной кубической сеткой. Размер элементов сетки подбирался из условия достаточности разрешения структуры вихревых и ударно-волновых образований в проточном тракте двигателя. Длина ребер кубической ячейки – 7 мм. Решение проводилось с временным шагом $7 \cdot 10^{-7}$ с, удовлетворяющим условию устойчивости конечно-разностной схемы и достаточным для описания нестационарных эффектов в проточном тракте двигателя. Задача решалась в трехмерной постановке.

Расчетная область также включает две внешние по отношению к двигателю области – на входе воздушного потока в двигатель и на выходе из него. Размер этих областей выбирается таким образом, чтобы обеспечить корректное моделирование эффектов обтекания двигателя набегающим потоком воз-

духа и избежать явлений отражения волновых образований от границ расчетной области и последующего влияния на процессы, происходящие внутри двигателя.

Приведем результаты численного расчета рабочего процесса при условии организации синусоидального теплоподвода. Длительность теплоподвода была в 1/4 периода пульсации. Несмотря на синусоидальный закон подвода тепла по времени и использование в расчетах геометрии двигателя, прошедшего акустическую настройку, график пульсация давления в камере сгорания характерный – в виде двух горбов (рис. 2). Возможно, это обусловлено особенностью газохода – большим проходным сечением резонаторной трубы и диффузора или несовпадением частоты подвода теплоты с резонансной частотой газохода.

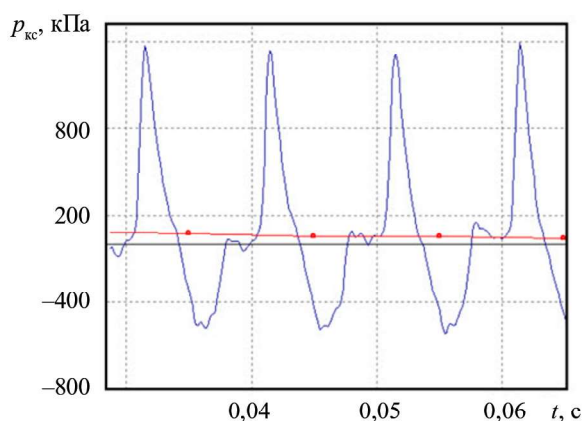


Рис. 2

Согласно визуализации структуры течения с помощью расчетной модели возможно отслеживать присутствие возвратного течения воздуха, поступающего из атмосферы в диффузор резонаторной трубы. Это значит, что эффект присоединенных масс присутствует и в процессе расчета учитывается.

На рис. 3 представлены результаты расчета реактивной тяги, формируемой различными элементами двигателя на протяжении одного рабочего цикла, происходящего с частотой 100 Гц. Скорость обдува – 100 м/с.

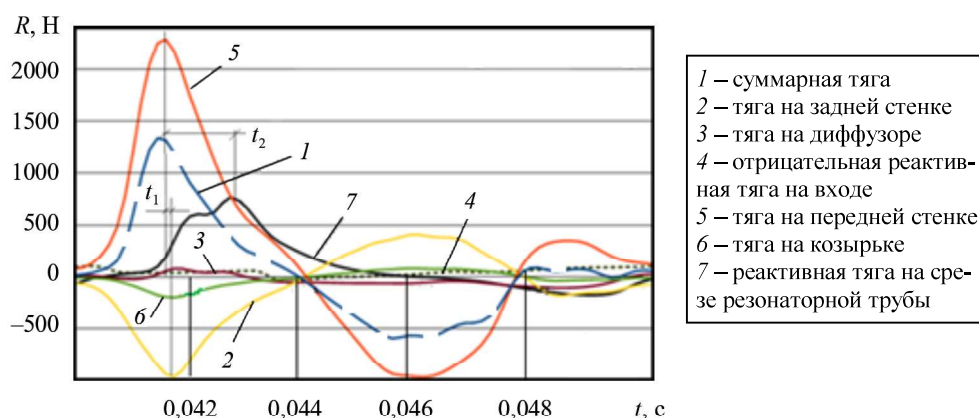


Рис. 3

Как видим (см. рис. 3), наибольшая амплитуда пульсаций тяги создается силами давления, прилагаемыми к передней стенке камеры сгорания двигателя. Значение реактивной тяги от газовой струи, выбрасываемой через резонаторную трубу, по амплитуде примерно в три раза меньше, что подтверждает предположение о том, что данный двигатель создает реактивную тягу в большей степени за счет импульса давления, а не от импульса выбрасываемой струи. Однако при последующем осреднении влияние реактивной тяги от импульса давления и импульса скорости почти одинаковое. В итоге различие значений импульса давления и импульса скорости выбрасываемой струи не превышает 30 %. Большое значение

отрицательной тяги создает задняя стенка камеры сгорания. Влияние выбрасываемых струи из впускных смесителей на реактивную тягу оказывается минимальным, в связи с чем влияние козырька и диффузора также кажется малозначительным, но на практике оказывается существенным. Дело в том что в реальном двигателе, где происходит процесс горения, эти элементы оказывают на него непосредственное влияние. Так, посредством козырька формируются два встречно закрученных вихря, усиливающих процесс горения [1, 2]. Согласно расчетам влияние диффузора на реактивную тягу по расчетам отрицательное, но, по результатам огневых испытаний, он достаточно эффективен. Это связано с забросом в него воздуха на такте всасывания, что увеличивает догорание топлива в резонаторной трубе и приводит к росту давления на стенках диффузора.

Благодаря расчету выявлено наличие временного сдвига между максимумом тяги от давления на переднюю стенку и тягой от реакции, выбрасываемой из диффузора струи t_2 . Одновременно с ростом скорости обдува происходит изменение формы реакции суммарной тяги. Если на скорости 100 м/с наблюдается сравнительно ровный график (см. рис. 3), то с увеличением скорости до 200 м/с (рис. 4, а) и 300 м/с (рис. 4, б) возникает кривая с тремя горбами. Такой вид сигнала реактивной тяги с наложенной высокочастотной составляющей в огневых экспериментах зафиксировать сложно из-за инерционности измерительной системы и других особенностей измерения пульсирующих тяговых усилий [2].

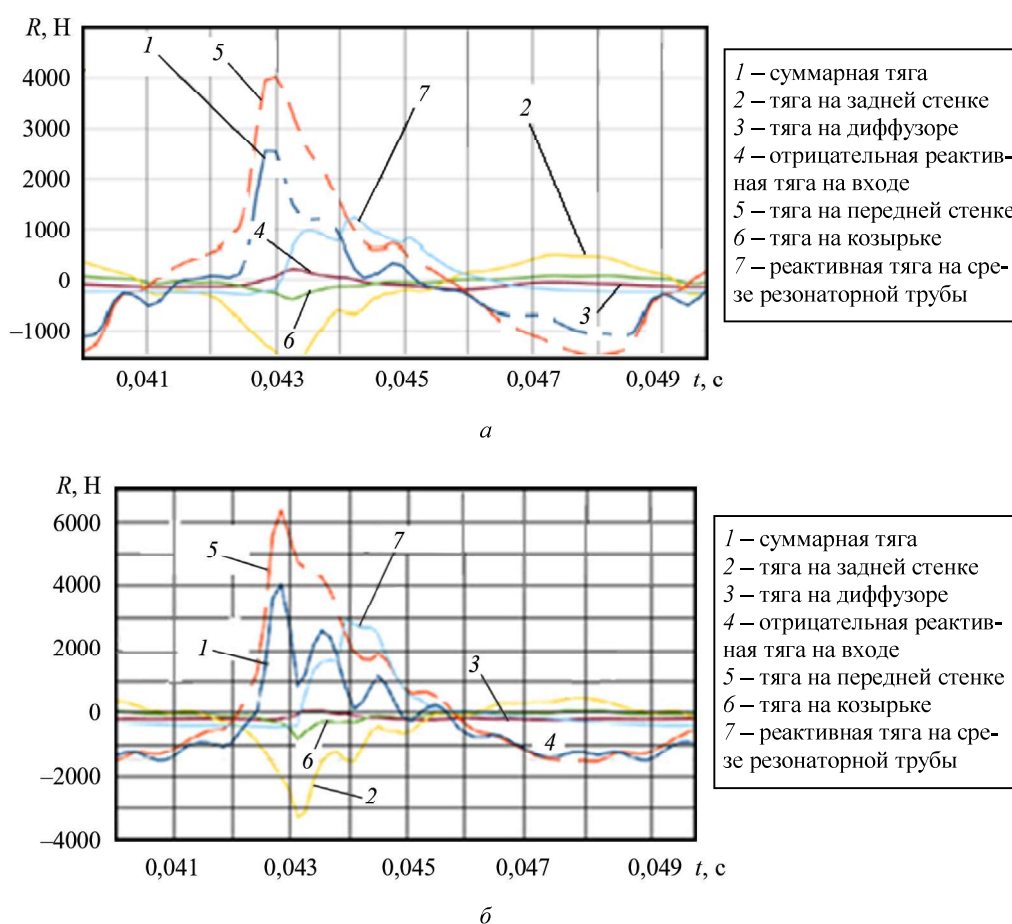


Рис. 4

Экспериментально и с помощью расчетов ранее был установлен факт влияния сдвига зоны горения на реактивную тягу. Так, сдвиг ее в переднюю часть камеры сгорания приводил к росту реактивной тяги и стабилизации пульсационного горения [8, 9]. Однако сдвиг зоны горения можно осуществить и в области газохода по потоку за камерой сгорания в зону поступления возвратного течения присоединенных масс. Для решения вопроса, как это повлияет на реактивную тягу, газоход был разбит на три зоны, а теплоподвод распределен по ним, как это показано на рис. 5.

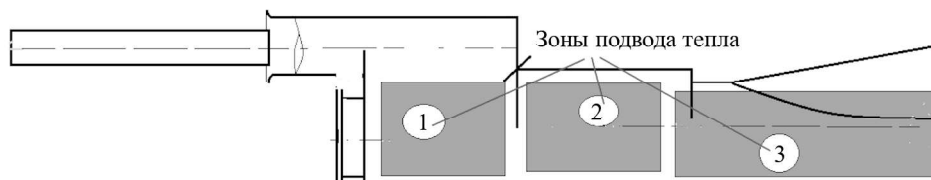


Рис. 5

Всего рассчитывалось четыре варианта распределения теплоподвода (таблица). Было принято, что теплоподвод происходит синхронно в три зоны.

Вариант	Распределение теплоподвода по зонам, %		
	Зона 1	Зона 2	Зона 3
1	10	80	10
2		70	20
3		60	30
4		50	40

С помощью расчетов подтверждена ранее наблюдавшаяся в экспериментах сильная зависимость тяги от характера распределении теплоподвода. С увеличением доли тепла, подводимого в зону 3, т. е. в резонаторную трубу, она увеличивается. Это может быть связано с действием присоединенных масс, т. е. с рециркуляционным течением внутрь резонаторной трубы. С увеличением скорости обдува рециркуляционное течение значительно ослабевает, а значит, уменьшается присоединенная масса. В диапазоне 300...400 м/с рециркуляционное течение пропадает почти полностью, а вместе с ним исчезает эффект от действия распределенного теплоподвода (рис. 6). В итоге было установлено, что максимальный эффект роста тяги на 50 % достигается при распределенном теплоподводе варианта 4 и скорости обдува около 100 м/с.

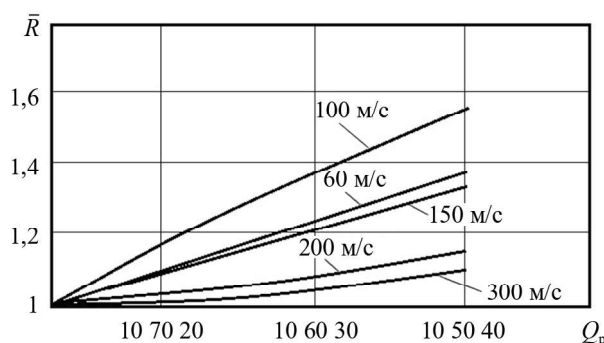


Рис. 6

Таким образом, согласно расчетам распределение теплоподвода по длине газохода двигателя в определенных скоростных диапазонах является эффективным способом увеличения тяги и, соответственно, удельных показателей двигателя. Физическая основа описанного явления состоит в дожигании в резонаторной трубе газохода присоединенных масс воздуха, поступивших туда за счет рециркуляционного течения. Однако эффект роста тяги будет наблюдаться и в другом случае, если осуществить в резонаторную трубу теплоподвод в объеме, например, 200 % от подводимого к камере сгорания. В этом случае тяга возрастет в 2,6 раза. Проблема состоит в том, что углеводородное топливо в таких объемах в продуктах сгорания основной камеры сжечь нереально. Вероятно, это можно сделать сжиганием нанопорошка алюминия, способного гореть в углекислоте с образованием корунда. Однако замена горения циклическим теплоподводом не полностью отображает физический процесс пульсирующего горения, на практике могут проявиться и другие неизвестные пока явления, способные как увеличивать реактивную тягу, так и уменьшать ее. В целом благодаря описанным явлениям возможно создание простого и технологичного реактивного двигателя, удельные показатели которого сопоставимы с турбореактивными двигателями малой тяги.

По проведенным расчетам в приложении к двигателю «Аргус – Шмидт» можно предположить, что с ростом скорости, высоты полета и посредством сопутствующего охлаждения стенок камеры сгорания зона горения в этом двигателе могла удлиняться, так как топливо подавалось холодным и в жидком виде, а из-за удлинения зоны горения мог возникнуть прирост тяги. По этой причине тяговооруженность рассчитывалась по заниженным значениям реактивной тяги, полученным, очевидно, в условиях наземных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигалин К.В., Сиденко К.А., Мигалин К.К. Эжекторные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели. Тольятти: Спект, 2020. 444 с.
2. Мигалин К.В., Сиденко К.А., Мигалин К.К. Эжекторные двухконтурные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели для около и сверхзвуковых скоростей полета. Тольятти: Спект, 2022. 200 с.
3. Государственный реестр открытий СССР. Явление аномально высокого прироста тяги в газовом эжекционном процессе с пульсирующей активной струей / В.Н. Челомей, О.И. Кудрин, А.В. Квасников. № 314; дата приоритета 2.04.1951, дата регистрации открытия 20.03.1986.
4. Кудрин О.И. Пульсирующее реактивное сопло с присоединением дополнительной массы // Тр. МАИ. 1958. № 97. С. 98–180.
5. Полежаев Ю.В., Богданов В.И., Гешеле В.Д. Безэжекторное присоединение массы газа для увеличения импульса пульсирующих реактивных двигателей и возможности его реализации // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2015. № 1. С. 35–44.
6. Богданов В.И. Взаимодействие масс в рабочем процессе пульсирующих реактивных двигателей как средство повышения их тяговой эффективности // Инженерно-физический журнал. 2006. № 3. С. 85–90.
7. Богданов В.И., Ханталин Д.С. Расчетное исследование влияния ударно-волновых эффектов взаимодействия масс газа на тяговую эффективность пульсирующих реактивных двигателей // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2011. № 2. С. 76–85.
8. Мигалин К.В., Сиденко К.А. Улучшение удельных показателей эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя за счет сдвига зоны горения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 89–92.
9. Борисоглебский А.В. Методика расчета нестационарных процессов в пульсирующих воздушно-реактивных двигателях // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 1. С. 34–37.

Поступила в редакцию 14.05.23

После доработки 6.08.23

Принята к публикации 10.08.23

Numerical Study of Thrust Force Formation in a Bypass Ejector Pulsejet Engine and the Method of Its Boosting due to Redistribution of Heat Release along the Gas Duct Length

K.V. MIGALIN AND D.A. CHARNTSEV

ООО RPC “Rotor”, Togliatti

On the basis of numerical calculation, the mechanism of thrust force formation in the bypass ejector pulsejet engine is given. It is shown how the impact on the combustion process by changing the heat release along the length of the gas duct can significantly improve the specific performance of the pulsejet engine. An explanation of the observed physical phenomenon is given on the basis of the effect of attached air masses.

Ejector bypass pulse jet engine, combustion zone, heat release zone, heat release zone shift, attached air masses, jet thrust