

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ СОПЛА НА ТЯГУ ДВУХФАЗНОГО ИМПУЛЬСНОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю. Янь, В. Фань, К. Ван, Я. Му

Школа мощности и энергии, Северо-Западный политехнический университет, 710072 Сиань, КНР
weifan419@nwpu.edu.cn

Приведены результаты исследования работы импульсного детонационного реактивного двигателя с сужающимися-расширяющимися соплами различной конфигурации. В качестве горючего и окислителя использовались соответственно жидкий керосин и газообразный кислород, в качестве продувочного газа — азот. Частота рабочего цикла варьировалась в диапазоне $10 \div 40$ Гц. Изменение степени заполнения достигалось изменением длины двигателя. Эксперименты выполнены при давлении подачи реагентов и противодавлении, равных 1 атм. Установлено, что при степени заполнения 0.73 и частоте 40 Гц все исследованные сопла увеличивали эффективность работы двигателя. При этом при степени сужения сопла 5.325 и степени расширения 12 достигалось максимальное увеличение тяги — примерно 21 %. Влияние частоты цикла на эффективность работы сопла оказалось незначительным. Установлено, что исследованные сопла со степенью сужения 5.325 уменьшали тягу двигателя при степени заполнения 0.29 и увеличивали ее при степени заполнения 0.37.

Ключевые слова: импульсный детонационный реактивный двигатель, сужающееся-расширяющееся сопло, двухфазная смесь.

ВВЕДЕНИЕ

Импульсные детонационные двигатели (ИДД) представляют собой революционный подход к силовым установкам. Для создания тяги используется управляемая периодическая детонация горючей смеси. Детонация есть вид горения, при котором сверхзвуковая ударная волна, распространяющаяся через газовую среду, поддерживается быстрым энерговыделением в зоне реакции. Ударная волна сжимает нереагирующую смесь, увеличивая ее температуру до точки воспламенения. Воспламенившаяся смесь сгорает за волной и выделяемая энергия поддерживает распространение скачка. В принципе детонация очень эффективный способ сжигания топливно-окислительной смеси — более эффективный, чем дефлаграция.

Тепловая эффективность идеального цикла ИДД выше, чем идеального цикла Брайтона и идеального цикла Хамфри [1]. Поэтому теоретически тепловая эффективность импульсного детонационного реактивного двигателя (ИДРД), работающего по циклу ИДД, больше, чем у стационарного реактивного двигателя,

работающего по циклу Брайтона. Правда, остается вопрос о правомерности применения обычного термодинамического анализа для существенно нестационарного цикла ИДД. Однако даже если эффективность работы ИДД в конце концов окажется недостаточной для практического применения, ИДД по-прежнему будет привлекать к себе внимание из-за надежности, обеспечиваемой малым количеством движущихся частей, масштабируемости двигателя и гибкости его геометрии.

Сопла, являющиеся важной составной частью стационарного реактивного двигателя, также важны для ИДД. В работах [2, 3] показана их роль в повышении производительности ИДД. Однако, какой вид сопел подходит для ИДД, до сих пор остается предметом дискуссии. За последние десять лет опубликовано множество численных и экспериментальных работ [2–23], в которых исследовалась эффективность применения сопел в ИДД. Поскольку ИДД работают периодически и течение внутри двигателя нестационарно, возникают большие трудности в определении рациональных схем сопел и их исследовании.

Расчет [4] одноциклового детонации в трубе с расширяющимися соплами различной гео-

Yan Yu, Fan Wei, Wang Ke, Mu Yang.
School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China.

метрии показал, что такие сопла более эффективны, чем сопла с положительной кривизной.

В работе [5] методом численного моделирования проанализировано влияние сопел на эффективность ИДД и его работу в период прохождения одной детонационной волны. Наилучшие общие характеристики получены для сужающихся-расширяющихся сопел.

В работе [2] создана квазиодномерная модель многоциклового ИДД. Установлено, что добавление сужающегося горла на выходе ИДД дает выигрыш в тяге.

Численное исследование работы одноциклового ИДД с расширяющимися соплами, заполненными воздухом, выполнено в [3]. Наилучшим оказалось расширяющееся сопло, а сужающиеся сопла ограничивали частоту функционирования ИДД.

В [9] по квазиодномерной модели с конечной скоростью химической реакции проведен расчет газодинамических параметров ИДРД с сужающимися-расширяющимися соплами. Оказалось, что при одних и тех же модельных предположениях он превосходит эквивалентный стационарный реактивный двигатель в широкой области отношений давлений p_c/p_a , где p_c — давление в камере, p_a — противодавление.

В [10] экспериментально исследовали газовую детонацию в трубах с расширяющимися соплами при варьировании окружающего давления. Установлено, что при наибольших испытанных значениях окружающего давления частичное заполнение трубы горючей смесью увеличивает импульс, так как объемы сопел слишком большие.

Экспериментальные и численные исследования [11–14] работы одноциклового ИДРД с сужающимися-расширяющимися соплами при варьировании отношения давлений показали большую их эффективность по сравнению с соплами с простым расширением, в частности при увеличении отношения давлений.

В работе [17] были измерены характеристики многоциклового ИДД с выхлопными соплами, работающего с частотой 30 Гц при стехиометрических условиях. Найдено оптимальное соотношение площадей проходных сечений сопла как функция степени заполнения ИДД.

В работ [18, 19] экспериментально и численно исследованы характеристики ИДРД с соплами. В качестве горючего использовался жидкий керосин, рабочая частота цикла со-

ставляла 15 Гц.

В [20] представлены результаты измерения в детонационных трубах одноциклового импульса как функции окружающего давления. Измерения проведены с четырьмя расширяющимися и шестью сужающимися-расширяющимися соплами.

В [21] разработана аналитическая модель для количественного определения удельного импульса в одноцикловой детонационной трубе с расширяющимся соплом.

Итак, имеются многочисленные расчетные и экспериментальные исследования сопел для ИДРД. Однако определение зависимости характеристик ИДД от всех параметров является задачей трудной, поскольку число параметров может быть велико и они могут быть взаимосвязаны друг с другом. К тому же нестационарная природа детонационного цикла усложняет анализ схем сопел.

Расхождения в выводах объясняли большим числом параметров, влияющих на характеристики ИДД, и различными исходными условиями. Хотя общепризнано, что сопла увеличивают эффективность ИДД, оптимальная геометрия сопел еще не установлена. Однако имеются основания считать применение сужающихся-расширяющихся сопел правильным решением. Большинство публикаций посвящено одноцикловым экспериментам и моделированию, хотя для практики более важен многоцикловый процесс. Хорошо известно, что между одноцикловой и многоцикловой детонацией существует большое различие. Из цитированных работ многоцикловый ИДД экспериментально изучался в [17], но для газового горючего и только для сужающегося или только расширяющегося сопла, сужающиеся-расширяющиеся сопла не рассматривались.

В данной работе проведено экспериментальное изучение многоциклового ИДД на жидком керосине. Рассмотрены различные сужающиеся-расширяющиеся сопла. Сужение площади сопел доходило до 5.325, расширение — до 30. Длина сопла была на порядок меньше длины ИДРД. Для проверки эффективности сопла ИДРД при различной частоте цикла ее варьировали в экспериментах от 10 до 40 Гц. Для изучения влияния частичного заполнения трубы горючей смесью изменяли длину ИДРД. Противодавление в опытах было постоянным — 1 атм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для силовой установки ограниченного объема привлекательно применение жидких углеводородных топлив. В наших экспериментах в качестве горючего и окислителя использовались жидкий керосин и газообразный кислород соответственно. Реагирующую смесь поджигали при низкой энергии инициирования, поэтому детонация формировалась при переходе горения в детонацию (ПГД) с помощью спирали Щелкина. Для получения повторяющейся детонации горючее и окислитель инжесктировали в ИДРД периодически. Требовалось вдувать порцию инертного газа, чтобы отделить сгоревшие продукты в конце каждого цикла от новой порции топливно-кислородной смеси, инжесктируемой в начале следующего цикла для предотвращения преждевременного воспламенения, препятствующего формированию детонации. В данной работе в качестве инертного газа использовался азот.

Базовый ИДРД представляет собой трубу внутреннего диаметра 30 мм, длиной 920 мм (рис. 1). Он состоит из трех секций, соединенных фланцами: камера смешения, камера перехода горения в детонацию и секция распространения детонации. Длина камеры ПГД — 360 мм, коэффициент блокирования проходного сечения приваренной внутри камеры ПГД спиралью Щелкина — 0.43. Секция распространения детонации сменная, что позволяет изменять длину базового ИДРД. Жидкий керосин впрыскивался через центробежный распылитель.

Для управления периодической подачей окислителя, горючего и азота применялись электромагнитные клапаны. Для воспламенения использовалась автомобильная свеча зажигания, работающая в частотном режиме с энергией 50 мДж в одном разряде. Электромагнитные клапаны и воспламенитель контролировались системой управления. Временная послед-

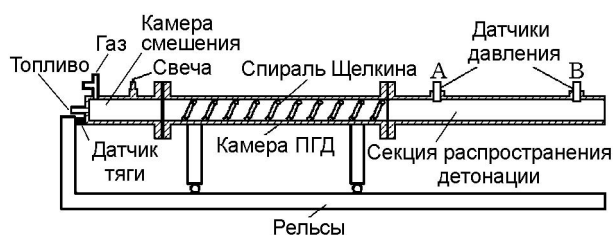


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

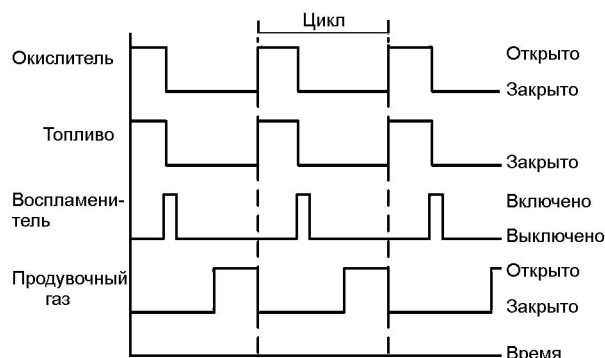


Рис. 2. Последовательность работы клапанов и воспламенителя

овательность управляющих сигналов изображена на рис. 2. В начале цикла клапаны горючего и окислителя открыты, реагирующая смесь инжесктируется в ИДРД. После заполнения детонационной трубы клапаны закрываются. Смесь воспламеняется свечой зажигания, в камере ПГД формируется детонация и распространяется вдоль двигателя. Перед выполнением следующего цикла в двигатель через открытый электромагнитный клапан вдувался азот для удаления горячих продуктов с низкой плотностью и предотвращения преждевременного воспламенения горючей смеси.

ИДРД мог свободно передвигаться по рельсам. Двигатель был соединен с датчиком тяги.

В секции распространения детонации по оси двигателя устанавливались два пьезоэлектрических датчика давления SINOCERA CY-YD-205 (А и В на рис. 1). Расстояние от начала двигателя до датчика А — 600 мм, между датчиком В и выходом из двигателя — 50 мм. Выходные сигналы от датчиков давления преобразовывались системой сбора данных «Деветрон» и системой обработки данных с частотой дискретизации 500 кГц. Мгновенная тяга ИДРД $f(t)$ измерялась силовыми датчиками 9331В фирмы «Kistler». Среднюю тягу определяли усреднением мгновенной тяги по времени.

Схемы и размеры изученных сужающихся-расширяющихся сопел показаны на рис. 3. Степени сужения и расширения сопел приведены в таблице.

Степень сужения определялась как отношение площади сопла на входе к площади его горла, степень расширения — как отношение площади сопла на выходе к площади его горла. Длиной сопла по сравнению с длиной ИДРД

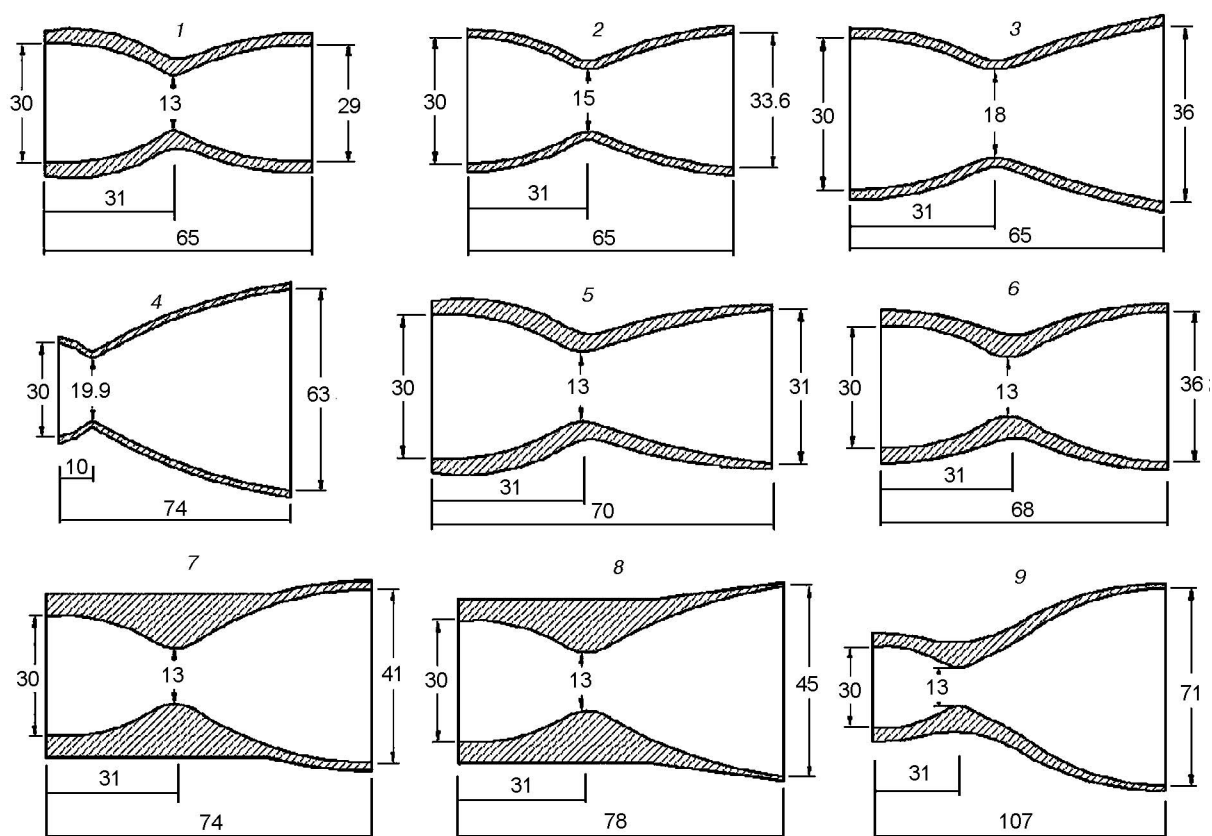


Рис. 3. Схемы сечения и размеры сужающихся-расширяющихся сопел

Степени сужения и расширения сопел

Номер сопла	Степень сужения	Степень расширения
1	5.325	5.0
2	4.000	5.0
3	2.778	4.0
4	2.273	10.0
5	5.325	6.0
6	5.325	8.0
7	5.325	10.0
8	5.325	12.0
9	5.325	30.0

можно пренебречь (менее 10 %). Таким образом, игнорирование эффекта частичного заполнения двигателя горючей смесью, вызванного соплами, вполне оправданно.

Все эксперименты были проведены при начальных давлении и температуре 1 атм и 20 °С

соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах рабочая частота ИДРД контролировалась электромагнитными клапанами и системой воспламенения. Поскольку смешение жидкого горючего и газообразного окислителя начинается только после инъекции в двигатель, процесс смешения очень важен для генерации детонации. В экспериментах было обнаружено, что при неподходящих скоростях вдува горючего и окислителя формирование повторяющейся детонации прекращается. При двухфазной газок капельной детонации изменение степени заполнения путем варьирования количества вдуваемого в двигатель реагента приводит к изменению скоростей вдува реагента, и процесс смешения изменяется. Возможно даже прекращение формирования детонации, что нежелательно. Более разумный способ изменения степени заполнения двигателя — это изменение его длины, что не влияет на процесс смешения.

Эффективность сопла при частоте 40 Гц

При частоте $f = 40$ Гц массовый расход кислорода составлял 26.03 г/с, керосина — 9.96 г/с. Эквивалентное отношение равно 1.32, степень заполнения 0.73. Установлено, что повторяющаяся детонация успешно формировалась в базовом ИДРД без сопла. Записи давления, полученные датчиком давления А, представлены на рис. 4. Видно, что ИДРД при указанных условиях работает хорошо.

ИДРД с соплами также работал стабильно. Так как в соплах была сужающаяся часть, то при прохождении детонационной волны через сопло отражалась ударная волна. Записи отраженных ударных волн приведены на рис. 5. Видно, что с увеличением диаметра горла сопла интенсивность отраженного скачка уменьшается. Площадь горла сопла оказы-

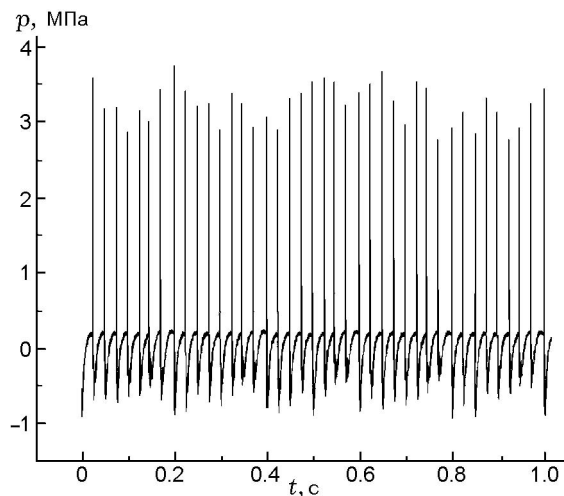


Рис. 4. Зависимости давления от времени в базовом ИДРД, измеренные датчиком давления А

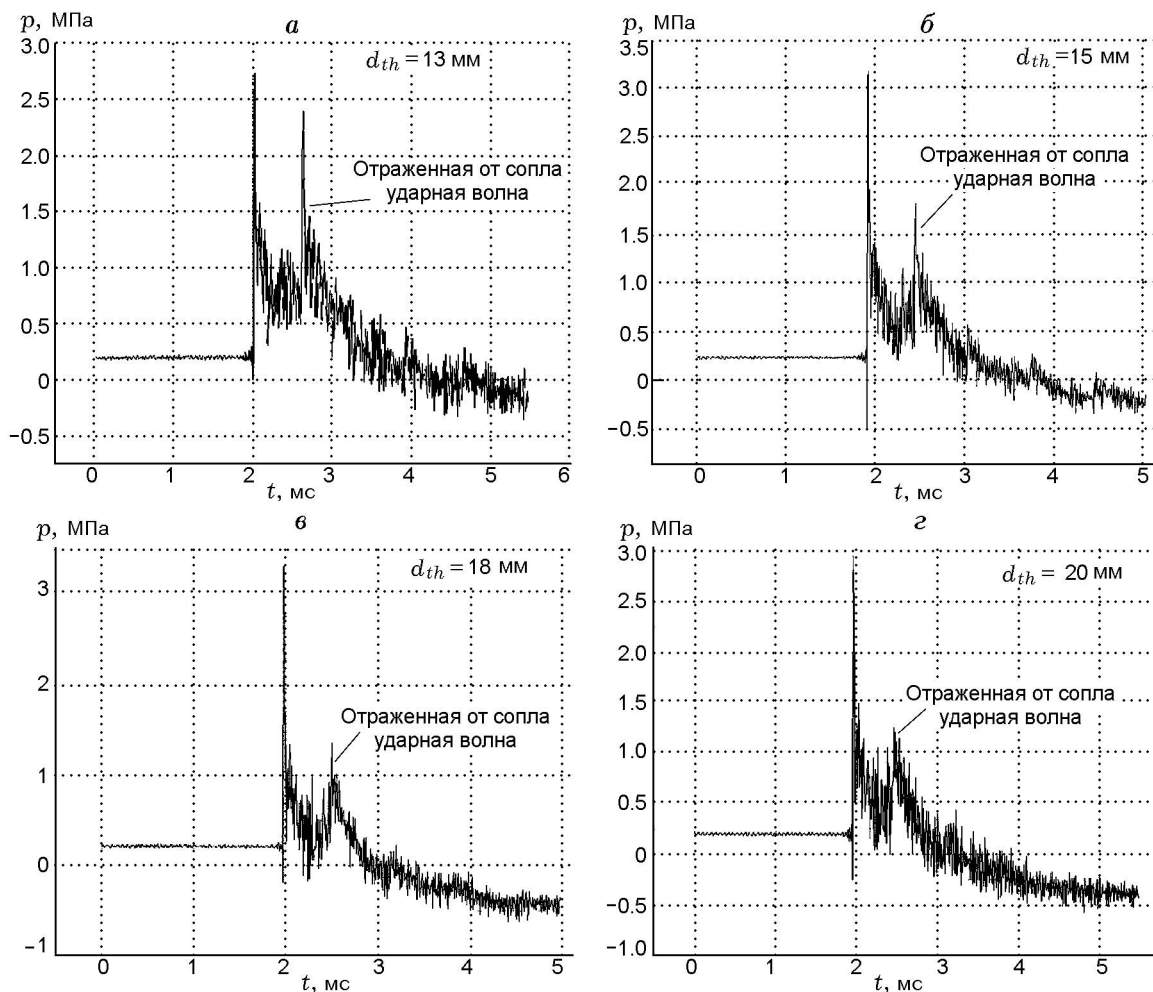


Рис. 5. Интенсивность ударной волны, измеренная датчиком Б, для сопел с разными диаметрами горла d_{th}

вает влияние на течение в детонационной трубе вверх по потоку: чем меньше площадь, тем сильнее воздействие на течение. Это может привести к неупорядоченности процесса и хаотичности поля течения внутри двигателя в начале следующего цикла, что вредно для повторяющейся работы двигателя. Чрезмерно малая площадь горла может даже вызвать прекращение работы двигателя.

Измеренная средняя тяга базового ИДРД использовалась как базовая. Средняя тяга ИДРД с соплами была нормирована к базовой величине тяги. Приращения тяги различных сопел показаны на рис. 6. Видно, что все девять исследуемых сопел увеличивают тягу базового ИДРД. Максимальный прирост тяги, примерно 21 %, дают сопла со степенью сужения 5.325 при достижении степени расширения 12, а затем приращение тяги уменьшается.

Сужающаяся часть сопла может уменьшать перерасширение в расширяющейся части сопла, в результате расширяющаяся часть формирует большую тягу по сравнению с расширяющимся соплом без сужающейся части. Однако если степень расширения сопла становится слишком большой, неизбежно должно происходить перерасширение. Это создает в расширяющейся части отрицательную тягу, что приводит к уменьшению прироста тяги. Следовательно, для сопла при фиксированной степени сужения существует оптимальная степень расширения.

Во всех экспериментах приращение тя-

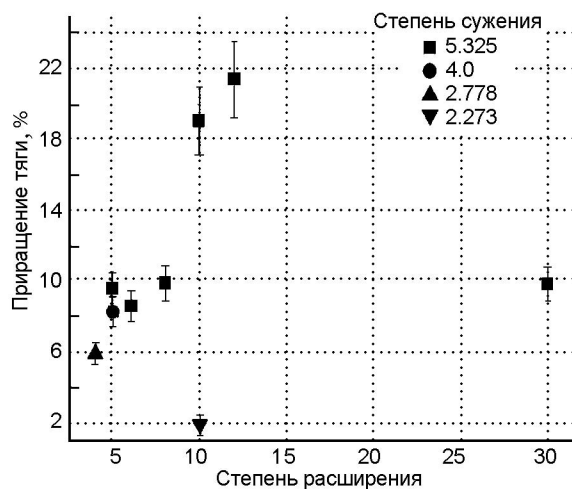


Рис. 6. Приращения тяги в зависимости от степени расширения и сужения площади сопла

ги получено при условии, что давление заполнения двигателя и противодействие равны 1 атм. Максимальное приращение тяги достигало 21 %. Это отличается от выводов работ [11, 14] о том, что оптимальные сужающиеся-расширяющиеся сопла обычно эффективны при высоких отношениях давлений и неэффективны при низких отношениях. Данные экспериментов показывают, что хорошо спроектированные сужающиеся-расширяющиеся сопла могут также повышать производительность даже при атмосферном давлении.

Эффективность сопла при различных частотах цикла

В практических приложениях ИДРД может создавать различную тягу в зависимости от частоты цикла.

На рис. 7 приведена средняя тяга базового ИДРД в зависимости от частоты цикла. Видно, что с ростом частоты тяга увеличивается, но скорость ее роста уменьшается.

Как показано на рис. 6, сопла со степенью сужения 5.325 дают большую, чем другие сопла, тягу. Эти сопла имеют одинаковые степени сужения, но различные степени расширения, поэтому дальнейшие исследования были проведены только для них. Изменения тяги в зависимости от степени расширения для ряда частот цикла представлены на рис. 8. Приращение тяги при фиксированных частотах было отнесено к средней тяге базового ИДРД при той же частоте.

Как видно из рис. 8, приращение тяги

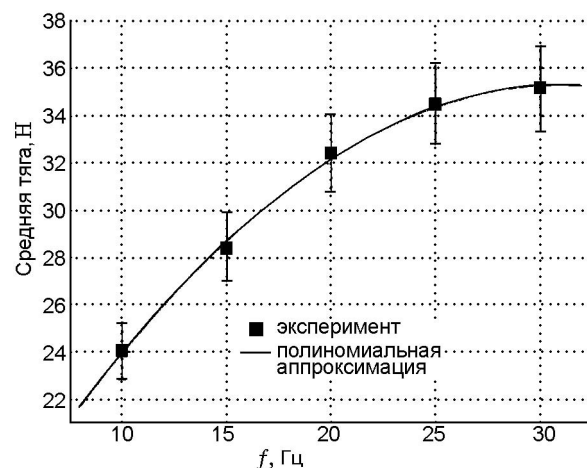


Рис. 7. Зависимость средней тяги базового ИДРД от частоты цикла

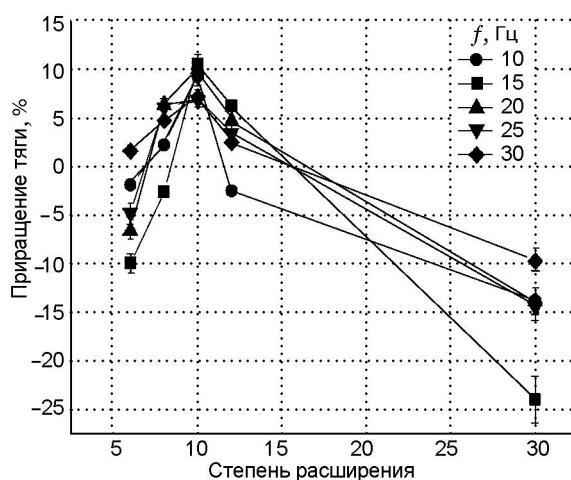


Рис. 8. Приращение тяги в зависимости от степени расширения сопла при различных частотах цикла

увеличивается до значения степени расширения 10, а затем начинает уменьшаться подобно тому, как показано на рис. 6. Было найдено, что значение степени расширения 30 является очень большим при низкой частоте цикла. Приращение тяги при $f = 10 \div 30$ Гц было отрицательным. Наибольшее приращение тяги на рис. 8 меньше, чем на рис. 6. Это указывает на то, что сужающиеся-расширяющиеся сопла более эффективны для увеличения тяговых характеристик ИДРД при росте частоты цикла. Согласно данным рис. 8 оптимальная степень расширения равна 10, это меньше, чем оптимальная степень расширения при $f = 40$ Гц. В целом настоящие эксперименты показали незначительное влияние частоты цикла на эффективность сопел.

Эффективность сопла при низкой степени заполнения двигателя горючим

Влияние частичного заполнения двигателя на характеристики ИДД хорошо продемонстрировано в [24]. Для полного понимания совместного влияния параметров сопла и частичного заполнения были исследованы характеристики ИДРД с сужающимися-расширяющимися соплами при малой степени заполнения. Расходы инжестируемых в камеру реагентов определяются электромагнитными клапанами. В данных экспериментах использовались три других электромагнитных клапана, обеспечивающие низкие расходы, чтобы осуществить частичную степень заполнения. При $f = 40$ Гц

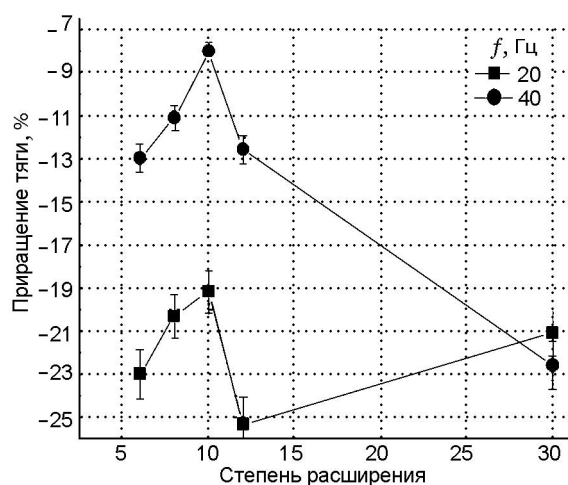


Рис. 9. Приращение тяги в зависимости от степени расширения сопла при степени заполнения 0.29

расход кислорода составил 8.76 г/с, керосина — 5.76 г/с. При длине ИДРД 920 мм степень заполнения равнялась 0.29, при длине 710 мм — 0.37. Длина базового ИДРД изменялась за счет замены секции распространения детонации, изображенной на рис. 1. Исследовались только сопла со степенью сужения 5.325.

Приращение тяги как функция степени расширения при степени заполнения 0.29 иллюстрирует рис. 9. Видно, что приращение тяги для всех испытанных сопел отрицательно. Это доказывает, что сопла при низкой степени

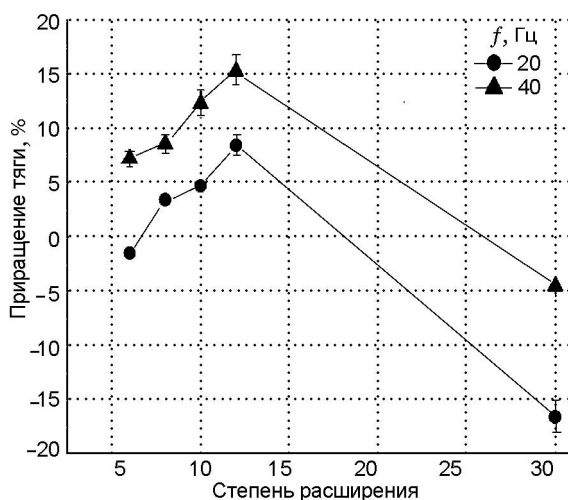


Рис. 10. Приращение тяги в зависимости от степени расширения сопла при степени заполнения 0.37

заполнения уменьшают эффективность ИДРД. Однако при степени заполнения 0.37 и частоте 40 Гц все испытанные сопла могут увеличивать тягу (рис. 10). Интересно заметить, что такое небольшое увеличение степени заполнения (от 0.29 до 0.37) приводит к противоположному эффекту. Этот вопрос нуждается в дальнейших исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было испытано девять сужающихся-расширяющихся сопел. Все испытанные сопла при степени заполнения 0.73 и частоте цикла 40 Гц увеличивают тягу ИДРД. Сопло со степенью сужения 5.325 и степенью расширения 12 дает максимальный прирост тяги ($\approx 21\%$). Установлено, что для сопла с фиксированной степенью сужения существует оптимальная степень расширения. Эксперименты также показали, что хорошо спроектированные сужающиеся-расширяющиеся сопла могут увеличивать тягу ИДРД даже при атмосферных условиях.

Установлено, что влияние частоты цикла на эффективность сопла в проведенных экспериментах оказалось незначительным. Показано, что сопла уменьшали тягу ИДРД при степени заполнения 0.29, в то время как при степени заполнения 0.37 она увеличивалась.

Авторы выражают благодарность Национальному фонду естественных наук Китая (грант № 50976094) и фонду докторских программ Министерства образования Китая (20096102110022) за финансовую поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heiser W. H., Pratt D. T. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines // *J. Propulsion and Power*. — 2002. — V. 18, N 1. — P. 68–76.
2. Mohanraj R., Merkle C. L. A numerical study of pulse detonation engine performance // *AIAA Paper* 2000-16225. — 2000.
3. Yungster S. Analysis of nozzle effects on pulse detonation engine performance // *AIAA Paper* 2003-1316. — 2003.
4. Cambier J. L., Tegner J. K. Strategies for pulsed detonation engine performance optimization // *J. Propulsion and Power*. — 1998. — V. 14, N 4. — P. 489–498.
5. Eidelman S., Yang X. L. Analysis of the pulse detonation engine efficiency // *AIAA Paper* 1998-3877. — 1998.
6. Kailasanath K. A review of research on pulse detonation engine nozzles // *AIAA Paper* 2001-3932. — 2001.
7. Kailasanath K. A review of PDE research-performance estimates // *AIAA Paper* 2001-0474. — 2001.
8. Talley D. G., Edward B. C. Constant volume limit of pulsed propulsion for a constant γ ideal gas // *J. Propulsion and Power*. — 2002. — V. 18, N 2. — P. 400–406.
9. Morris C. I. Quasi-one-dimensional modeling of pulse detonation rocket engines // *AIAA Paper* 2003-5204. — 2003.
10. Cooper M., Shepherd. The effect of transient nozzle flow on detonation tube impulse // *AIAA Paper* 2004-3914. — 2004.
11. Morris C. I. Numerical modeling of pulse detonation rocket engine gasdynamics and performance // *AIAA Paper* 2004-463. — 2004.
12. Barbour E. A., Owens Z. C., Morris C. I., Hanson R. K. The impact of a converging-diverging nozzle on PDE performance and its associated flow field // *AIAA Paper* 2004-867. — 2004.
13. Barbour E. A., Hanson R. K., Morris C. I., Radulescu M. I. A pulsed detonation tube with a converging-diverging nozzle operating at different pressure ratios // *AIAA Paper* 2005-1307. — 2005.
14. Morris C. I. Numerical modeling of single-pulse gasdynamics and performance of pulse detonation rocket engines // *J. Propulsion and Power*. — 2005. — V. 21, N 3. — P. 527–538.
15. Owens Z. C., Hanson R. K. Unsteady nozzle design for pulse detonation engines // *AIAA Paper* 2005-3649. — 2005.
16. Owens Z. C., Hanson R. K. Single-cycle unsteady nozzle phenomena in pulse detonation engines // *J. Propulsion and Power*. — 2007. — V. 23, N 2. — P. 325–337.
17. Allgood D., Gutmark E., Holk J., et al. Performance measurements of multicycle pulse-detonation-engine exhaust nozzles // *J. Propulsion and Power*. — 2006. — V. 22, N 1. — P. 70–77.
18. Fan W., Yan C. J., Li Q., et al. Experimental investigation on pulse detonation engine nozzles // *J. Aerospace Power*. — 2007. — V. 22, N 6. — P. 869–872.
19. Li Q., Fan W., Yan C. J. Numerical simulation of converging-diverging nozzle flow in pulse detonation rocket engine // *J. Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics*. — 2007. — V. 33, N 7. — P. 789–792.
20. Cooper M., Shepherd J. E. Single-cycle impulse from detonation tubes with nozzles // *J. Propulsion and Power*. — 2008. — V. 24, N 1. — P. 81–87.
21. Barbour E. A., Hanson R. K. Analytic model for single-cycle detonation tube with diverging

- nozzles // J. Propulsion and Power. — 2009. — V. 25, N 1. — P. 162–172.
22. **Cooper M., Jackson S., Austin J., et al.** Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations // AIAA Paper 2001-3812. — 2001.
23. **Wintenberger E., Austin J. M., Cooper M., Jackson S.** An analytical model for the impulse of a single-cycle pulse detonation engine // AIAA Paper 2001-3811. — 2001.
24. **Li C., Kailasanath K.** Partial fuel filling in pulse detonation engines // J. Propulsion and Power. — 2003. — V. 19, N 5. — P. 908–916.

Поступила в редакцию 10/VI 2010 г.
