

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Богданов В.И.

ОДК-Сатурн,
пр. Ленина, 163, Рыбинск, 152903, Россия
e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru

Представлены результаты исследований в развитие выполненного в МАИ научного открытия №314 «Явление anomalно высокого прироста тяги в газовом эжекторном процессе с пульсирующей активной струёй». Экспериментально показана возможность увеличения импульса пульсирующего реактивного двигателя за счёт безэжекторного присоединения массы газа как из внешней среды, так и отработанной, что повышает значимость открытия. Расчётными и экспериментальными исследованиями обоснована возможность создания сопла с резонатором-усилителем тяги для воздушно-реактивного двигателя (ВРД) со стационарным рабочим процессом без ухудшения его массогабаритных характеристик. Определены возможные перспективные направления дальнейших исследований по реализации полученных эффектов увеличения тяги.

Ключевые слова: камера сгорания постоянного объёма, присоединённая масса газа, пульсирующий рабочий процесс, эжекторный усилитель тяги, спиновая детонация в ракетных двигателях, сопло с резонатором.

Согласно научному открытию №314 (далее — открытие) «Явление anomalно высокого прироста тяги в газовом эжекторном процессе с пульсирующей активной струёй» [1] при определённых механико-геометрических соотношениях в потоке было установлено высокоэффективное присоединение массы в эжекторном канале. Прирост тяги мог составлять 120—150% по отношению к тяге без

эжекторного канала. При этом КПД процесса присоединения массы достигал 0,7.

В ОДК-Сатурн были проведены испытания экспериментального пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПуВРД), выполненного на базе высокочастотной золотниковой камеры сгорания постоянного объёма (КС $V = \text{const}$) нового типа (рис. 1) [2, 3] как с эжекторным усилителем тяги (ЭУТ), так и без него.

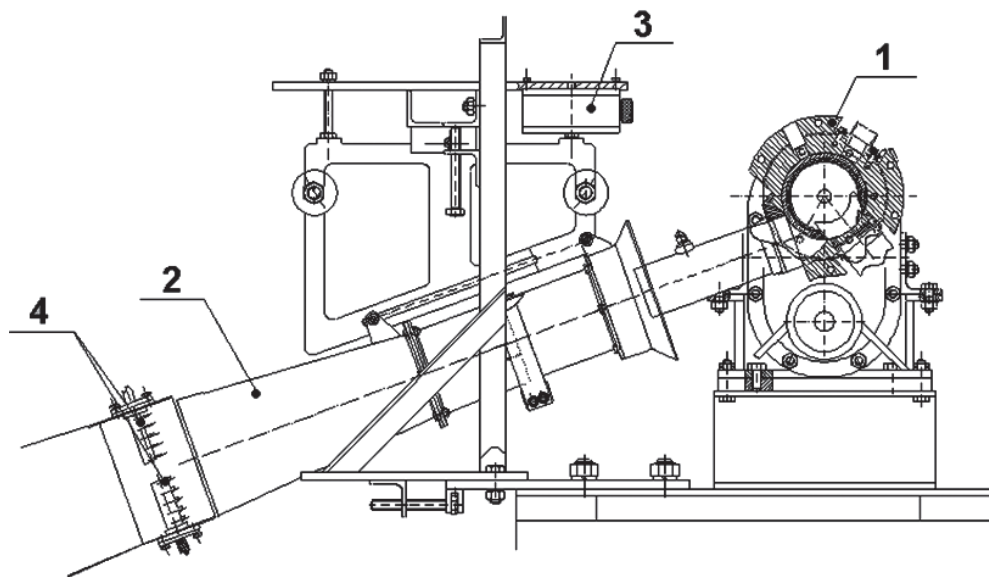


Рис. 1. ПуВРД с золотниковой камерой сгорания и эжекторным усилителем тяги: 1 — ПуВРД; 2 — эжекторный канал; 3 — силоизмерительный датчик; 4 — датчики измерения полного давления и температуры газа

Результаты измерений тяги двигателя без ЭУТ с помощью тяговой стенки и расчетов её (по внутриводвигательным параметрам) при допущении квазистационарности процесса истечения показали, что измеренная тяга P примерно в два раза (в зависимости от частоты вращения золотника n) превысила ее расчетное значение (рис. 2).

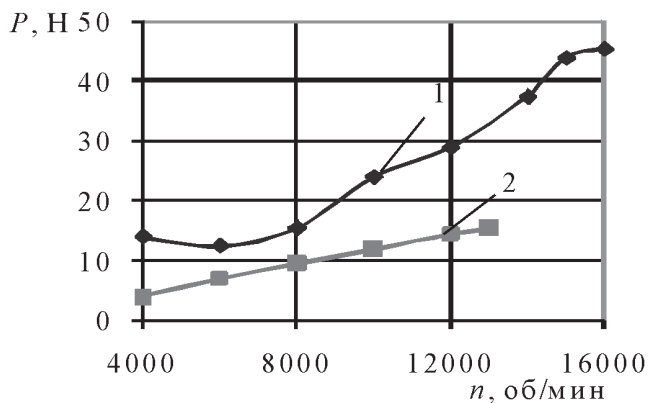


Рис. 2. Зависимость тяги ПуВРД без ЭУТ от частоты вращения золотника: 1 — эксперимент; 2 — расчет

Это подтверждает известное расчетно-теоретическое исследование единичного цикла (одномерного разлета продуктов детонации — газа) [4], которое показало возможность увеличения импульса в атмосфере в три раза по сравнению с вакуумом за счёт присоединения атмосферной массы воздуха.

На основании изложенного для оценки возможного присоединения массы без эжекторного канала в открытии были выполнены анализ и предварительное расчётное исследование на базе результатов исследований, заложенных в обоснование этого открытия с использованием оригинальных (сканированных) рис. 3—6 из [5].

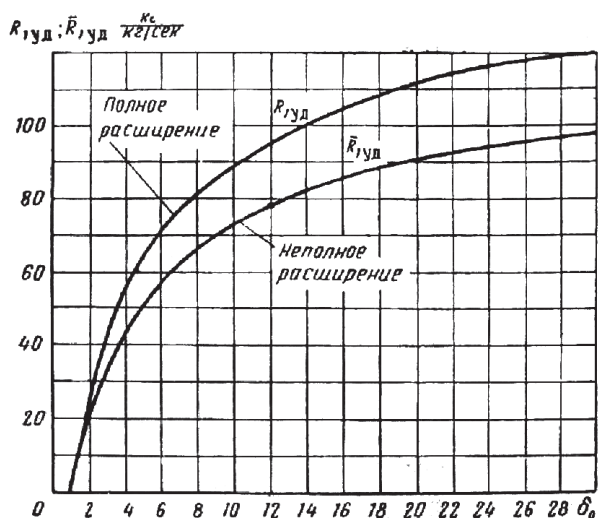


Рис. 3. Зависимость начальной степени понижения давления в выходном устройстве на удельную тягу

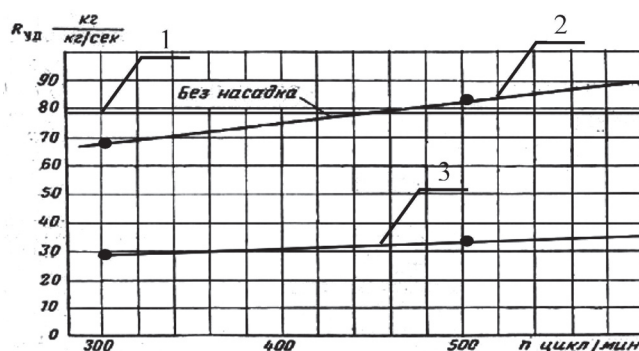


Рис. 4. Влияние частоты циклов на удельную тягу: 1 — идеальная удельная тяга для неполного расширения; 2 — удельная тяга, определённая в условиях стенда; 3 — удельная тяга, определённая расчётом по измеренному давлению в патрубке на входе в сопло

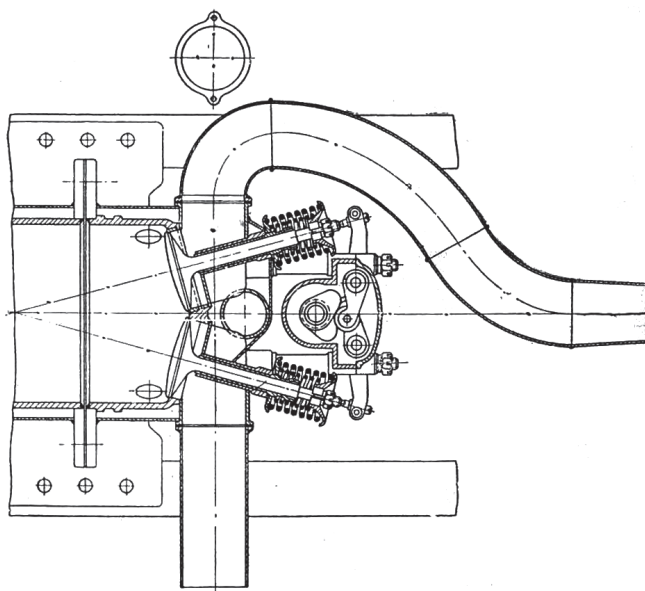


Рис. 5. Выходное устройство

Анализ показал, что расчётная идеальная и определённая при испытаниях удельные тяги для давления в камере сгорания 1,2 МПа (степень понижения давления в выходном устройстве равна 12) примерно одинаковы (рис. 3, 4). При этом удельная тяга при испытаниях с увеличением частоты рабочих пульсаций даже становилась больше идеальной. Однако выходное устройство (рис. 5) включает в себя клапан поршневого двигателя, который по сути является дросселем, и выхлопной патрубком с четырьмя поворотами на 90°, что должно вызвать значительные гидравлические потери при больших скоростях истечения газа. Кроме того, объём патрубка составляет 12% от объёма камеры сгорания, и при его заполнении газом тяга не создаётся. Следует также отметить, что истечение газа завершается до полного открытия клапана. Измеренное

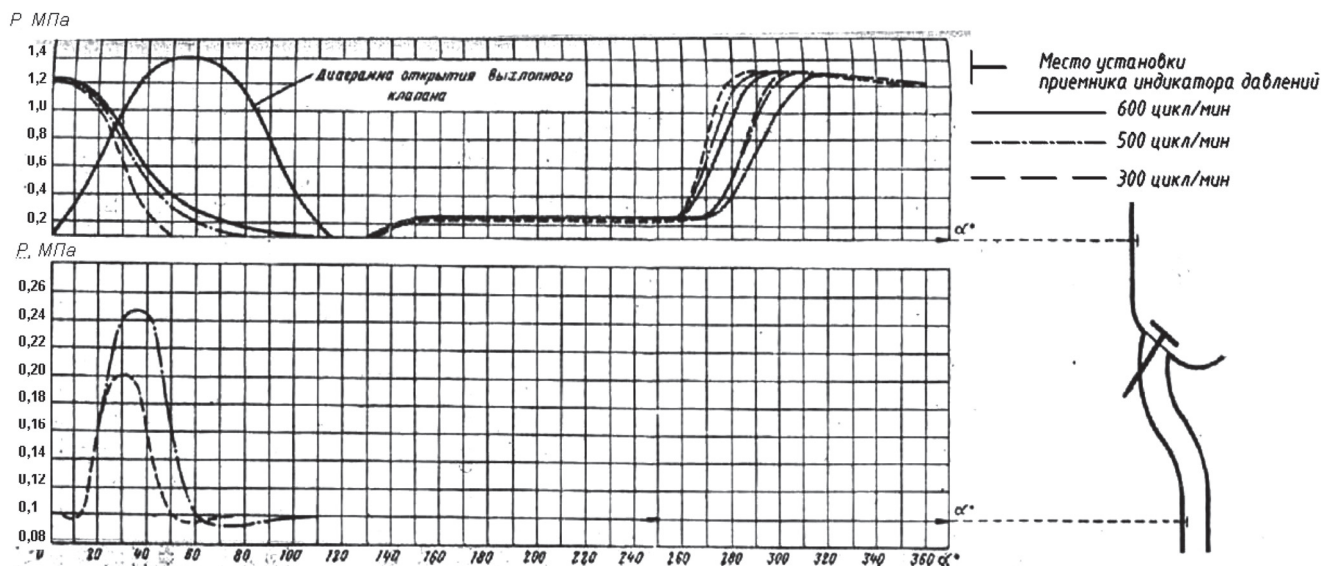


Рис. 6. Диаграмма давлений в камере сгорания и патрубке

давление газа в патрубке подтверждает большой уровень потерь — оно в четыре раза меньше, чем в камере сгорания (рис. 6). То есть полученная при испытаниях удельная тяга должна быть значительно меньше идеальной.

Предварительное расчётное исследование с использованием газодинамических функций показало следующее:

- определённая по соотношению площадей проходных сечений патрубка и сопла (рис. 5) приведенная скорость в патрубке может достигать значительной величины 0,6 (при сверхкритическом перепаде давлений в сопле);

- для приведенной скорости, равной 0,6, максимальное полное давление в патрубке перед соплом будет больше измеренного статического (рис. 6) на 19%;

- определённая по графику рис. 3 для неполного расширения (при полученных перепадах давлений в сопле), удельная тяга представлена на рис. 4 (поз. 3), т.е. вдвое меньше измеренной (поз. 2).

Таким образом, с учётом гидравлических и волновых потерь в клапане и патрубке удельная тяга должна быть почти вдвое меньше, чем полученная при испытаниях. Данное противоречие можно объяснить безэжекторным присоединением массы газа, как показано в работах [2—4] и на рис. 2.

Учитывая, что прирост тяги меняется в зависимости от параметров рабочих пульсаций, целесообразно за базовую тягу принимать расчётную квазистационарную, относительно которой и оценивать увеличение тяги двигателя с эжектором или без него. В этом случае для [1] прирост тяги будет значительно больше, и это повышает значимость открытия и требует его уточнения.

В [4] показано, что при взаимодействии газа с атмосферой происходит колебательный процесс, в определенные моменты которого газ движется обратно к источнику. Этот газ может стать присоединенной массой для следующего цикла. При скажности рабочих пульсаций, близкой к нулю, возможно использование части отработанной цикловой массы струи газа, её хвостовой части, имеющей меньшую скорость, чем фронт [4], в качестве присоединённой массы (рис. 7).

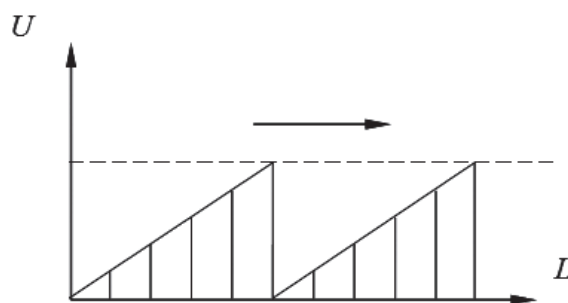


Рис. 7. Типичное распределение скорости U по длине L цикловых масс газа [4]

Для выявления данного эффекта проанализированы результаты испытаний ПуВРД с ЭУТ, представленные на рис. 8—10 в виде зависимостей измеренных усилий на ЭУТ, динамического напора, определяющего скорость потока, и пульсаций давления на выходе из эжекторного канала от частоты вращения золотника.

Представляет интерес изменение параметров в диапазоне частот вращения золотника n от 12000 до 13000 об/мин. При изменении n на 8,3 % усилие на ЭУТ $R_{э,ксп}$ увеличилось на 41 %. При этом резко изменилось распределение напора (скоростей) на

выходе из ЭУТ — произошло уменьшение скорости потока в пристеночной области канала. Для объяснения явления была выполнена расчетная оценка изменения тяги на ЭУТ $R_{э.расч}$ по параметрам потока на его выходе и выполнен анализ экспериментальных и расчетных результатов [7] (см. таблицу).

Экспериментальные и расчётные значения тяги ЭУТ

n , об/мин	12 000	13 000
$R_{э.расч}$, Н	10,18	10,23
$R_{э.эсп.}$, Н	12,14	17,15

По расчетной оценке усилие на эжекторном канале значительно меньше измеренного, при увеличении n с 12000 до 13000 об/мин почти не изменилось. Резкое уменьшение скорости потока в пристеночной области эжекторного канала ($n = 13000$ об/мин, рис. 9) можно объяснить отрывом

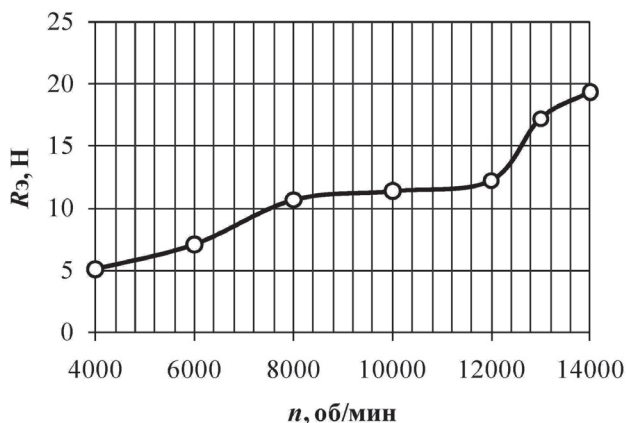


Рис. 8. Зависимость измеренных усилий на эжекторном канале от частоты вращения золотника

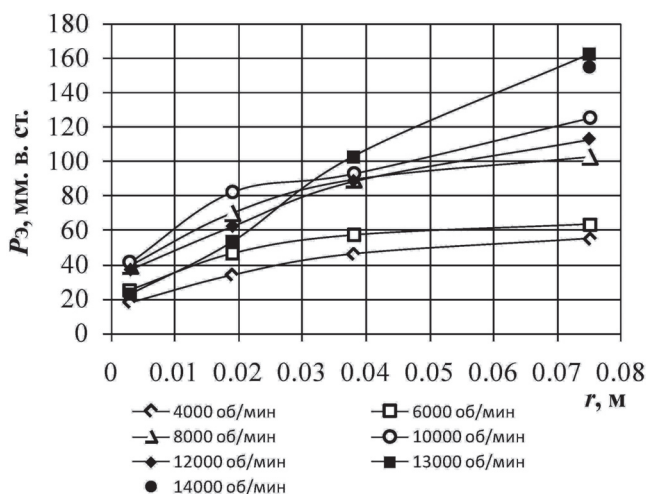


Рис. 9. Распределение измеренного водяными пьезометрами динамического напора в радиальном направлении на выходе эжекторного канала

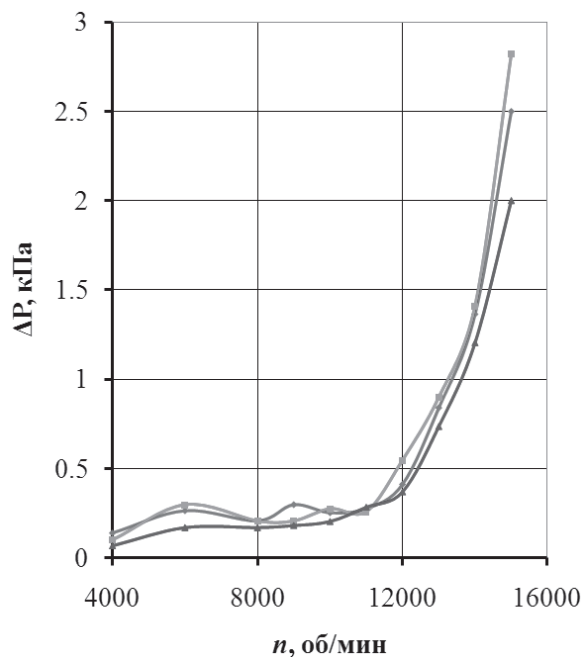


Рис. 10. Пульсации давления на выходе эжекторного канала

потока в диффузорной части канала. Известно [8], что отрыв пограничного слоя всегда связан с образованием вихрей в результате взаимодействия прямого и обратного течений, что может быть в колебательном процессе. В этом непрерывном (с нулевой скважностью) колебательном процессе и может происходить присоединение массы, повышающее тягу [4], т. е. одна и та же масса воздуха может создавать тягу сначала как активная, а затем как присоединенная. При этом происходит преобразование кинетической энергии (динамического напора) в импульс. Этим и объясняется противоречие между измеренной тягой и результатом расчетной оценки ее по динамическому напору. Можно предположить, что на $n = 12000$ об/мин имеет место умеренное присоединение массы газа без отрыва потока, а на $n = 13000$ об/мин — более интенсивное, с его отрывом, возможно, в резонансном колебательном процессе уже с неоднократным присоединением одной и той же отработанной массы (назовём это присоединением собственной массы газа).

Для подтверждения этого, а также для исключения возможного присоединения внешней массы на выходе эжекторного канала (на расстоянии 10...20 мм) устанавливался цилиндрический экран. Испытания показали [6], что динамика протекания усилия на эжекторном канале не изменилась, значения усилий с экраном и без него мало различались для одних и тех же частот пульсаций. Характерным является и то, что динамика протекания амплитуды пульсаций ΔP (рис. 10), измеренных на выхо-

де эжекторного канала датчиком ЛХ-610 на $n > 12000$ об/мин, такая же, как у усиления, измеренного на эжекторном канале.

Эффект от взаимодействия масс подтверждают и другие исследования:

1. В Центре Гленна (НАСА) при экспериментальных исследованиях пульсирующего эжекторного усилителя тяги с резонансным устройством на входе [9] получен КПД эжекторного процесса на уровне 1,15, что противоречит законам сохранения. Отмечено обратное течение газа назад в определенные промежутки времени. Авторы исследования не смогли дать этому объяснения. Противоречие разрешается при условии использования одной и той же массы воздуха сначала в качестве активной, а затем как присоединенной массы в колебательном процессе.

2. В Институте механики МГУ [9] удельные тяговые параметры пульсирующего процесса, организованного в установке на базе сферического резонатора (рис. 11), приведенные к расходу рабочего тела, при определённых газодинамических и геометрических соотношениях в 1,5...2 раза превышали величины, соответствующие квазистационарному расчету.

Аналогичные экспериментальные работы, проведенные в 2004 году в НТЦ им. А. Люльки, еще раз подтвердили это. Кроме того, здесь была выявлена на определенных режимах работы прямо пропорциональная зависимость увеличения тяги от температуры воздуха при постоянном давлении и неизменной геометрии проточной части. Предположительно это можно объяснить тем, что с ростом температуры повышается упругость взаимодействующих цикловых масс газа (они меньше деформируются) и поэтому уменьшаются потери на удар.

Расчётные исследования сферического резонатора-усилителя тяги [10] показали, что здесь увеличение тяги происходит в основном за счёт присоединения собственной массы газа в высокочас-

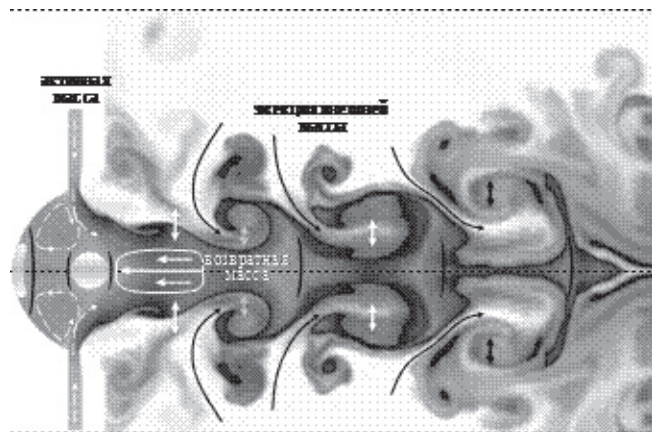


Рис. 11. Визуализация течения в резонаторе

тотном колебательном процессе (рис. 11). Установлено, что по результатам первых предварительных расчётов необходимо проводить анализ течения в его узлах (например, на появление динамической составляющей тяги в кольцевом сопле), для расчётных исследований использовать большие (оперативная память ~ 3 ТБ) вычислительные мощности (например, для проведения длительного расчета в полноразмерной постановке) и применять вихре-разрешающие модели турбулентности. При выполнении этих условий может быть обеспечена достаточная сходимость расчётных и экспериментальных результатов.

Такой резонатор, как усилитель тяги, может использоваться в качестве выходного устройства (сопла) в реактивных двигателях. Однако из-за поворотов потока газа он имеет низкую лобовую тягу.

Для проверки эффекта увеличения импульса за счёт взаимодействия собственных масс газа в пульсирующем реактивном двигателе в условиях космоса была создана экспериментальная установка с золотниковым устройством, подобным КС $V = \text{const}$ (рис. 12) с привязкой к вакуумной камере ВК-25 ОАО «ВПК «НПО Машиностроения», обеспечивающей давление 0,001 МПа (технический вакуум) [11]. Предварительные результаты испытаний показали превышение измеренной удельной тяги над расчётной (рис. 13), что свидетельствует о присоединении собственной массы газа.

Анализ результатов испытаний выявил возможность дальнейшего увеличения тяги за счёт оптимизации геометрии выходного устройства. Выполненные предварительные расчётные исследования с учётом результатов эксперимента показали возможность повышения импульса за счёт увеличения объёма выходного устройства при конусном исполнении (рис. 12). При этом, например для $\pi_c = 100$, необходимо, чтобы объём выходного устройства был примерно в 100 раз больше объёма рабочей полости золотника, что обеспечит взаимодействие больших масс воздуха. Целесообразно продолжить исследования с учётом этой доработки.

Перспективным следует считать реализацию полученного эффекта в космических ракетных двигателях и в первую очередь как одно из направлений развития жидкостных ракетных двигателей малой тяги [12].

При использовании газодинамического резонатора-усилителя тяги для обеспечения заданного уровня лобовой тяги ВРД необходимо уменьшать угол разворота потока газа, что будет сопровождаться снижением эффекта присоединения массы. Для оценки снижения прироста тяги, целесообразно-

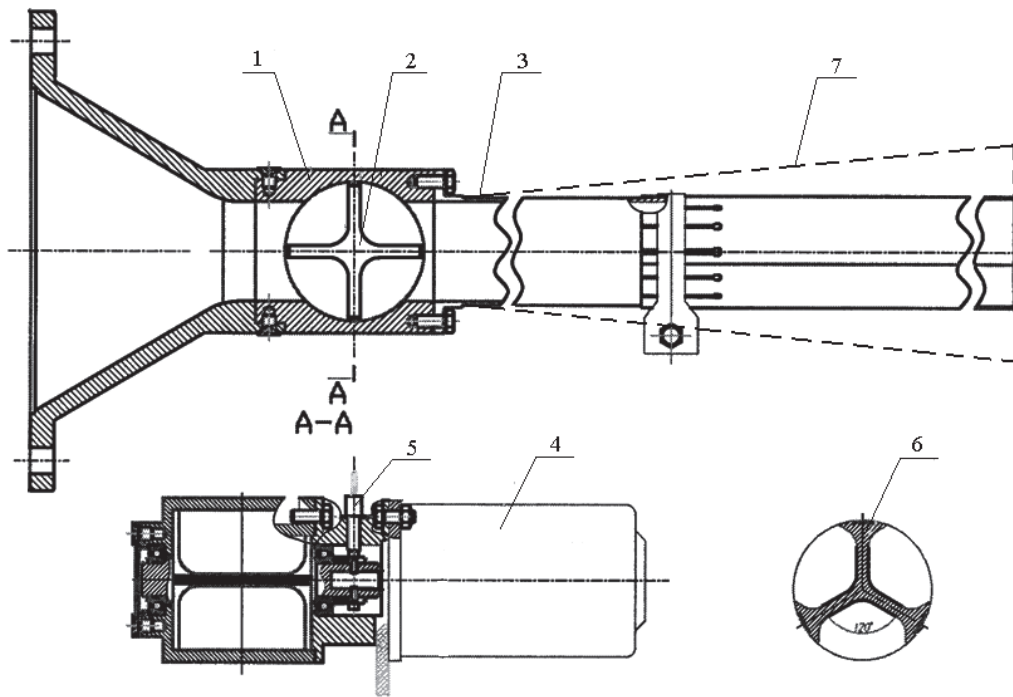


Рис. 12. Схема экспериментального пульсирующего реактивного двигателя: 1 — корпус; 2 — четырехполостной золотник; 3 — выходное устройство с регулируемой длиной; 4 — приводной электродвигатель; 5 — датчик частоты вращения; 6 — трехполостной золотник; 7 — конфигурация выходного устройства с увеличенным объёмом

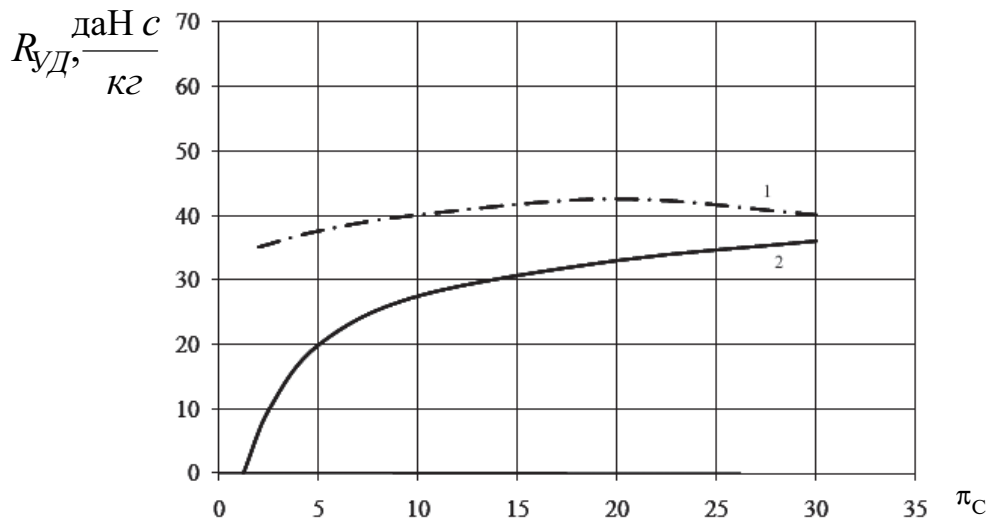


Рис. 13. Зависимости $R_{уд}$ от π_c : 1 — расчёт, 2 — эксперимент

ти применения резонатора было выполнено расчётное исследование резонатора (устанавливаемого вместо сопла) с геометрическими и газодинамическими параметрами, соответствующими проекту малоразмерного ВРД с укороченным соплом и современным уровнем характеристик (рис. 14). Кон-

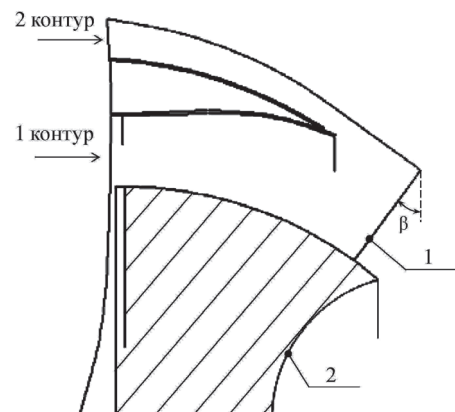


Рис. 14. Выходное устройство ВРД с резонатором: 1 — критическое сечение сопла; 2 — резонатор; β — угол выхода потока

фигурация исходного резонатора была скорректирована с учётом сохранения поперечного габарита традиционного сопла, опыта создания укороченных сопел Знаменского и подъёмных двигателей разработки РКБМ (г. Рыбинск).

Предварительные расчеты выходного устройства ВРД с резонатором выполнены в программном комплексе вычислительной газовой динамики ANSYS CFX при допущении стационарности процесса истечения. Математическая модель основана на решении уравнений Навье—Стокса для вязкого теплопроводного совершенного газа, замыкаемых RNG $k-\epsilon$ -моделью турбулентности. Физический расчетный шаг принимался $5 \cdot 10^{-6}$ с. Дискретизация полноразмерной расчетной модели осуществлялась гексаэдрическими элементами. Размерность расчетной сетки составляла 4.3 млн узлов, расчётный прирост тяги — 7% [13].

На основании новых полученных данных выполнен анализ возможных, представленных ниже, перспективных направлений дальнейших исследований по реализации эффектов присоединения масс газа.

В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН ведутся исследования по использованию термодинамически высокоэффективного непрерывного спигового детонационного сжигания топлива в энергодвигательных установках [15]. Упрощенно, суть данного способа сжигания топлива заключается в следующем (рис. 15). Топливовоздушная смесь *1* поступает в кольцевой канал 2 камеры сгорания. Здесь перпендикулярно потоку распространяется со скоростью *D* одна или несколько поперечных детонационных волн (ПДВ) 3. К детонационному фронту примыкает косая ударная волна 4. Продукты детонации 5 выбрасываются из открытого конца камеры сгорания. Анализ результатов этих исследований с учётом [15] даёт основания предполагать, что и здесь имеет место присоединение собственной массы газа при разгоне её косой ударной волной 4. Повышенное давление за волной передаётся на стенки камеры, создавая импульс. Осевая составляющая силы *P*, создаваемой присоединённой массой, и является дополнительной тягой. Она зависит от количества ПДВ, геометрии канала и достигает максимального значения при оптимальных соотношениях параметров пульсирующего течения газа. В свою очередь, это требует инициации (задания) и поддержания определённого количества ПДВ. Управляя этими факторами, возможно в зависимости от скорости полёта поддерживать максимальную тяговую эффективность двигателя. Обоснование этого механизма со-

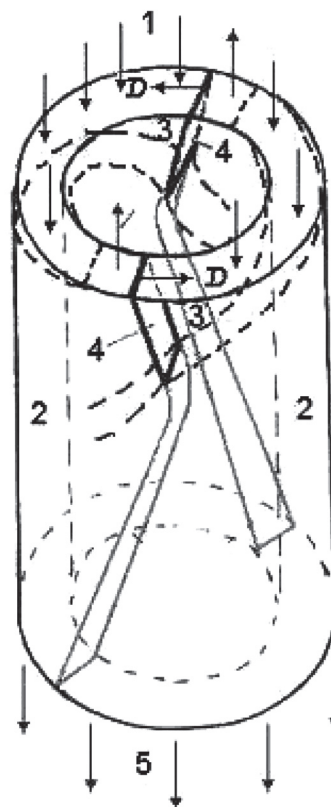


Рис. 15. Схема непрерывного спигового детонационного сжигания топлива

здания тяги и управления ею требует проведения целевых исследований.

В РДТТ [16] присоединение массы может быть организовано за счёт непрерывного послойного сгорания топлива, уложенного по спирали (рис. 16). При этом слои топлива герметично разделены специальной лентой, распадающейся под воздействием истекающих газов. Угол наклона спирали (рис. 16) определяется скоростями сгорания и выброса газа в месте горения для получения в итоге его осевого выхода из двигателя. То есть сгорание идёт по спирали, а истечение газа — по оси двигателя.

Анализ аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, выполненный на основе данных Акта аварии, размещённого в интернете, показал, что гидротурбина в критический момент работала на высоком напоре в пульсирующем режиме, допустимом только кратковременно. Во время аварии произошёл разрушительный подъём турбины под действием возникшей

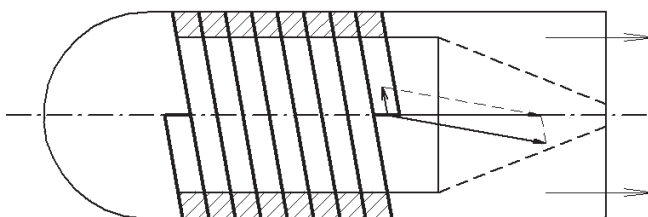


Рис. 16. Схема РДТТ со спиговым сжиганием топлива

осевой силы. Причина возникновения этой силы (не отмеченная в Акте аварии) может быть такой же, как в описанном выше эксперименте [2]. На рис. 17 представлено типичное распределение давления за рабочим колесом турбины [17] как результат взаимодействия межлопаточных струй газа. Характер протекания его идентичен показанному на рис. 8. На основании этого можно предполагать, что и здесь при определённом критическом сочетании

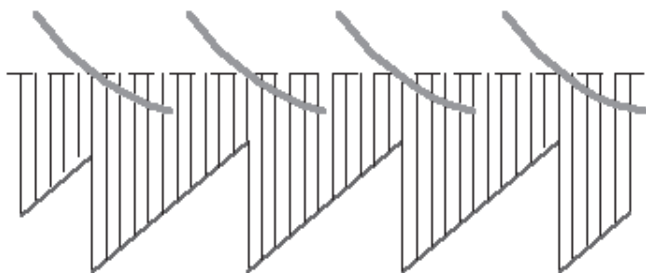


Рис. 17. Распределение давления за рабочим колесом гидравлической турбины

значений параметров водяного потока за счёт перепада давлений, возникающего между струями за задними кромками рабочих лопаток, может происходить присоединение массы, создающее аварийное по величине усилие на турбине, направленное навстречу потоку (как в эксперименте с ПуВРД). Инициатором этого явления с критическим уровнем параметров может быть прецессирующий вихревой жгут, образующийся за рабочим колесом гидротурбины на режимах её недогрузки или перегрузки [18].

Понимание физики аварийной ситуации облегчит решение проблемы обеспечения безопасной работы турбины.

Описанный выше способ присоединения массы, но уже для нужного повышения тяги может быть рассмотрен и на газовых турбинах в турбореактивных двигателях (ТРД). В настоящее время на рабочих колёсах газовых турбин реализуется невысокий околосвуковой перепад давлений. Увеличение перепада ограничивается ростом потерь, которые относят к турбине. Однако в обычных ГТД для повышения тяговой эффективности используется присоединение массы во втором контуре, КПД которого в системе турбина низкого давления — вентилятор составляет примерно 0,75. Такой же уровень КПД получен при взаимодействии масс в эксперименте [2]. Это позволяет снижать КПД турбины для формирования необходимого распределения давления за рабочим колесом (с повышенным перепадом давлений на выходных кромках лопаток) для эффективного присоединения массы.

Рассмотренные присоединения собственных масс газа в пульсирующем рабочем процессе потребовали уточнения соотношений для определения тяговых характеристик двигателя [19].

Анализ полученных результатов показывает, что наибольший прирост импульса от присоединения собственной массы в газах может быть получен в реактивных двигателях, работающих в стационарном режиме при низком полётном КПД [15]:

- двигателях первых ступеней ракет-носителей;
- двигателях торможения;
- двигателях ориентации космических аппаратов;
- подъёмных двигателях для самолетов вертикального взлета и посадки.

С учётом полученных новых данных представляет интерес и возобновление исследований по крылу с повышенной подъёмной силой за счёт пульсирующего обтекания [20].

Выводы

1. Экспериментально показана возможность значительного увеличения импульса пульсирующего реактивного двигателя за счёт безэжекторного присоединения массы газа как из внешней среды, так и отработанной, что повышает значимость Научного открытия №314 и требует его уточнения.

2. Присоединение массы может быть реализовано в реактивных двигателях при непрерывном сгорании топлива за счёт применения резонаторов и новых конструктивных решений.

3. Показаны возможные перспективные направления дальнейших исследований по реализации эффектов присоединения масс газа для увеличения тяги в реактивных двигателях, требующие проведения большого объёма исследований. Определены области рационального применения этих двигателей.

Библиографический список

1. Кудрин О.И., Квасников А.В., Челомей В.Н. Явление аномально высокого прироста тяги в газовом эжекторном процессе с пульсирующей активной струей. Описание открытия №314 // Вестник АН СССР. 1986. №10. С. 94-99.
2. 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.
3. Bogdanov V.I. Pulse Increase at Mass Interaction in an Energy Carrier // American Journal of Modern Physics. 2013. Vol. 2. № 4, pp. 195-201.
4. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975. — 704 с.

5. Кудрин О.И. Пульсирующее реактивное сопло с присоединением дополнительной массы // Сборник «Труды МАИ». 1958. Вып. 97. С. 98-180.
6. Богданов В.И., Буракова Л.И. Оценка эффектов взаимодействия масс в пульсирующих реактивных двигателях по результатам экспериментальных исследований // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2010. № 3(18). С. 90-95.
7. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика. — М.: Машиностроение, 1981. — 374 с.
8. Paxson D.E., Wilson J., Dougherty K.T. Unsteady Ejector Performance: An Experimental Investigation Using a Pulsejet Driver // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, Indiana, United States (July 7-10, 2002). AIAA-2002-3915, 12 p.
9. Левин В.А., Смехов Г.Д., Тарасов А.И., Хмелевский А.Н. Расчетное и экспериментальное исследование пульсирующей детонации в модели двигателя. — М.: Институт механики МГУ, 1998. Препринт № 42-98. — 34 с.
10. Богданов В.И., Ханталин Д.С. Особенности расчёта сферического газодинамического резонатора-усилителя реактивной тяги // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2014. № 3(30). С. 44-49.
11. Богданов В.И., Реш Г.Ф., Шишуринов А.В. Предварительные результаты экспериментальных исследований эффекта увеличения импульса пульсирующего реактивного двигателя в вакууме за счёт присоединения собственной массы газа, перспективы его использования // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2013. № 1(24). С.23-30.
12. Коватёва Ю., Воробьёв А.Г., Боровик И.Н., Хохлов А.Н., Казеннов И.С. Жидкостный ракетный двигатель малой тяги на топливе газообразный водород и газообразный метан // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т.18. № 3. С. 45-54.
13. Богданов В.И., Ханталин Д.С. Повышение лобовой тяги сферического газодинамического резонатора-усилителя импульса // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 1. С. 186-190.
14. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. — 423 с.
15. Богданов В.И. Техническая реализация эффекта присоединения массы газа для увеличения тяги пульсирующих реактивных двигателей // Вестник машиностроения. 2014. № 9. С. 38-42.
16. Богданов В.И., Боровкова О.С. Пульсирующий ракетный двигатель твёрдого топлива. Патент №162799 РФ. Бюлл. №18, 27.06.2016.
17. Кривченко Г.И. Гидравлические машины: Турбины и насосы: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1978. — 320 с.
18. Смирнов С.А., Богданов В.И. Взаимодействие масс рабочего тела в пульсирующем течении за турбиной как причина нестационарных явлений в напорных системах ГЭС и способ повышения тяговой эффективности ТРД // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, специалистов, аспирантов и студентов (Саяногорск, р.п. Черёмушки. 22-23 мая 2014). — Саяногорск; р.п. Черёмушки: Саяно-Шушенский фил. СФУ. С.104-107.
19. Богданов В.И., Боровкова О.С. Некоторые особенности определения тяговых характеристик пульсирующих реактивных двигателей // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. 2013. № 2. С. 29-34.
20. Богданов В.И. О повышенной эффективности крыла в пульсирующем потоке // Инженер. 2006. №11. С. 14-15.

RESEARCH ON REALIZATION OF PULSATING WORKING PROCESSES IN JET ENGINES

Bogdanov V.I.

*UEC-Saturn,
163, Lenin av., Rybinsk, 152903, Россия
e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru*

Abstract

The article presents the results of the study in elaboration of scientific discovery No 314 “Phenomenon of the abnormal high growth of thrust in the ejector process with pulsating active stream” performed in MAI. The possibility of pulsating jet impulse increase through ejectorless addition of gas mass both from the external atmospheric environment and used up gas was shown

experimentally. It increases the meaningfulness of the discovery. The physics of the process of the used up gas mass in pulsating stream is based the well-known phenomenon of wave interaction of cyclic masses with various velocities of front and tail parts.

Calculating and experimental studies substantiated the capability of creating a nozzle with the spherical

resonator-thrust amplifier for air-breathing jet engine with stationary fuel combustion. The mechanism of gas masses adding in oscillating process is shown. The thrust amplification at certain gas-dynamic and geometrical relationships herewith can make 1.5 and more.

Carrying out of experimental studies on a vacuum bench (imitation of space conditions) has confirmed effective exhaust gas mass addition that opens new capabilities for increasing the thrust efficiency of space jet engines. According the test results, the constructive recommendations on the improvement of working process are given.

The results of computation and design working out of implementation of the obtained effects in the nozzle with the resonator of an optimum configuration for conventional air-breathing jet engine without its mass and dimensions characteristics derating present a great practical interest. Conditions and recommendations on calculation are given.

Possible perspective trends of further studies on implementation of the obtained effects of thrust increase at the expense of exhaust gas mass addition in liquid-propellant rocket engine and solid-propellant rocket engine with spin detonation fuel combustion, as well as in a gas turbine engine are determined.

Keywords: combustion chamber of constant volume, added gas mass, pulsing working process, ejector thrust amplifier, spin detonation in rocket engines, nozzle with the resonator.

References

1. Kudrin O.I., Kvasnikov A.V., Chelomei V.N. *Vestnik AN SSSR*, 1986, no. 10, pp. 94-99.
2. Bogdanov V.I. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2006, vol. 79, no. 3, pp. 85-90.
3. Bogdanov V.I. Pulse Increase at Mass Interaction in an Energy Carrier. *American Journal of Modern Physics*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 195-201.
4. Baum F.A., Stanyukovich K.P., Shekhter B. I. *Fizika vzryva* (Physics of explosion), Moscow, Nauka, 1975, 704 p.
5. Kudrin O.I. *Trudy MAI, Sbornik statei*, Moscow, 1958, issue 97, pp. 98-180.
6. Bogdanov V.I., Burakova L.I. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P.A. Solov'eva*, 2011, no. 3, pp. 90-95.
7. Sergel' O.S. *Prikladnaya gidrogazodinamika* (Applied fluid dynamics), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 374 p.
8. Paxson D.E., Wilson J., Dougherty K.T. Unsteady Ejector Performance: An Experimental Investigation Using a Pulsejet Driver. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, Indiana, United States (July 7-10, 2002). AIAA-2002-3915, 12 p.
9. Levin V.A., Smekhov G.D., Tarasov A.I., Khmelevskii A.N. *Raschetnoe i eksperimental'noe issledovanie pul'siruyushchei detonatsii v modeli dvigatelya* (Design and experimental study of a pulsating detonation in the motor model), Moscow, Institut mekhaniki MGU, 1998, 34 p.
10. Bogdanov V.I., Khantalin D.S. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P.A. Solov'eva*. 2014, no. 3(30), pp. 44-49.
11. Bogdanov V.I., Resh G.F., Shishurin A.V. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P.A. Solov'eva*, 2013, no. 1(24), pp. 23-30.
12. Kovateva Yu., Vorob'ev A.G., Borovik I.N., Khokhlov A.N., Kazennov I.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 45-54.
13. Bogdanov V.I., Khantalin D.S. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2017, vol. 90, no. 1, pp. 186-190.
14. Bykovskii F.A., Zhdan S.A. *Nepreryvnaya spinovaya detonatsiya* (Continuous spin detonation), Novosibirsk, SO RAN, 2013, 423 p.
15. Bogdanov V.I. *Vestnik mashinostroeniya*, 2014, no. 9, pp. 38-42.
16. Bogdanov V.I., Borovkova O.S. *Patent RU 162799*, 27.06.2016.
17. Krivchenko G.I. *Gidravlicheskie mashiny: Turbiny i nasosy*, Moscow, Energiya, 1978, 320 p.
18. Smirnov S.A., Bogdanov V.I. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, spetsialistov, aspirantov i studentov "Gidroelektrostantsii v KhKhI veke"*, Sayanogorsk, 2014, pp. 104-107.
19. Bogdanov V.I., Borovkova O.S. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta im. P.A. Solov'eva*, 2013, no. 2, pp. 29-34.
20. Bogdanov V.I. *Inzhener*, 2006, no. 11, pp. 14-15.