

Asymmetric properties of thermal processes at superficial heating of a two-layer metal plate

O. N. Shablovsky, D. G. Kroll
Gomel State Technical University, Gomel, Belarus

Nonlinear thermal properties of a two-layer metal plate at influenced by a non-stationary superficial source of energy are studied. Asymmetry reveals itself at rearrangement of layers. Entropy and hysteresis properties of heat exchange are investigated. The results of research of systems Fe—Mo and Fe—V are submitted.

УДК 621.438

Струйные энергетические технологии

Б. М. Кондрашов
Москва, Россия

Рассмотрены способы преобразования низкопотенциальной энергии внешней среды для получения мощности на силовом валу, высокопотенциальной теплоты, "холода" и реактивной тяги. При этом был использован процесс последовательного присоединения дополнительных масс, который реализуется в эжекторных сопловых аппаратах газотурбинных двигателей (ГТД).

С каждым годом сокращаются запасы углеводородного сырья, растет энергопотребление, ухудшается экология, а известные технологии использования возобновляемых экологически чистых источников энергии, в том числе атмосферы, неэффективны.

Неравномерный нагрев газов, сжатых под действием гравитации, вызывает изменения давления и нарушает равновесное состояние атмосферы, при восстановлении которого потенциальная и тепловая энергии воздушных масс преобразуются в кинетическую. В результате такого стохастического природного процесса энергия атмосферы становится доступной для использования в ветродвигателях, выполняющих механическую работу без потребления кислорода и выработки продуктов сгорания. Их недостатки — низкая плотность энергии на единицу рабочей площади и неуправляемость процесса. Однако нарушать равновесное состояние атмосферы для преобразования потенциальной энергии воздушных масс в кинетическую можно и за счет управляемых локальных воздействий, например в эжекторных устройствах. Восстанавливая равновесное состояние, нарушаемое в эжекторном насадке активной струей рабочего тела, атмосфера совершает механическую работу. Ее объем зависит от величины, но в большей степени — от способа воздействия, а также параметров эжекторных устройств и сферы их применения. В эжекторном процессе — параллельном присоединении к стационарной реактивной струе —

тяги увеличивается без дополнительных затрат энергии топлива за счет "неуравновешенной силы внешнего давления на входной раструб (заборник) эжектора, появление которой обусловлено понижением давления на стенках раструба при втекании в него эжектируемого воздуха" [1]. Это утверждение Г. Н. Абрамовича констатирует факт управляемого использования энергии атмосферы для выполнения работы. Показатели эффективности процесса — КПД и коэффициент присоединения дополнительных масс m (равный отношению присоединяемой воздушной массы к массе активной струи) — низкие из-за турбулентного смешения и трения, уменьшающих скорость активной струи C_{aj} . В результате тяга и кинетическая энергия реактивной массы увеличиваются незначительно.

В другом процессе — последовательном присоединении (имеющим иную физическую основу, которая не обязательно связана со смешением объединяемых масс) — воздействие пульсирующей активной струи создает периодическое разрежение в эжекторном насадке, при котором за счет неуравновешенной силы атмосферного давления вслед за каждым импульсом активной струи ускоряется воздух. Процесс может происходить практически без смешения объединяемых масс и уменьшения скорости активной струи, но лишь в узком диапазоне величин и соотношений основных параметров: расчетной частоты, формы, длительности и скорости газовой массы импульсов активной струи, скорости набегающего

потока, а также конструктивных параметров эжекторного устройства.

Только при оптимальном значении указанных параметров присоединение происходит за счет последовательного втекания воздушных масс вслед за газовой массой импульсов, при котором практически отсутствуют их выталкивание из эжекторного насадка газовой массой следующего импульса и турбулентное смешение разделенных газовых масс, уменьшающие эффективность управляемого преобразования энергии атмосферы.

О. И. Кудриным — одним из авторов открытия "Явления аномально высокого прироста тяги в газовом эжекторном процессе с пульсирующей активной струей" [2] — проведены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность этого процесса [3]. К сожалению, открытие не получило широкого применения, вероятно, потому, что изначально исследования были направлены на получение реактивной тяги (дополнительной к тяге винтовых двигателей поршневых авиационных двигателей). Следует отметить, что если процесс присоединения дополнительных масс, в котором происходит существенный прирост кинетической энергии реактивной струи, применяется для увеличения тяги реактивного двигателя, то большая часть дополнительно полученной энергии не может быть использована для выполнения полезной работы и неизбежно рассеивается в атмосфере, создавая при этом иллюзию низкой эффективности и самого процесса присоединения. Это, наряду с недостатком информации об экспериментальных исследованиях, стало препятствием для его внедрения в других отраслях, где кинетическую энергию воздушной массы, получаемую в результате управляемого преобразования энергии атмосферы, можно использовать не для образования реактивной тяги, а более эффективно. Кроме того, открытие было сделано в тот период, когда проблемы уменьшения запасов традиционных энергоносителей и ухудшения экологической ситуации, обусловленного их применением, не были столь актуальны, как сейчас. Однако и сегодня в энергетических и транспортных системах оно "не работает", вероятно, еще и потому, что использование энергии атмосферы традиционно ограничено ветроэнергетикой.

Для описания предлагаемых способов преобразования энергии используем следующие показатели, характеризующие происходящие процессы.

В процессе присоединения получается объединенная реактивная масса TM :

$$TM = 1 + m,$$

где 1 — масса активной струи;

m — присоединенная масса, численно равная коэффициенту присоединения m .

Эффективность процесса последовательного присоединения характеризует также коэффициент скорости объединенной реактивной массы

$$w_{tm} = C_{tm} / C_{pj}, \quad (1)$$

где C_{tm} — скорость объединенной реактивной массы (C_{tm} равна C_{aj} — скорости активной струи), которая зависит от периодического изменения давления в эжекторном насадке);

C_{pj} — скорость пульсирующей реактивной струи, образованной рабочим телом с такими же параметрами, как при образовании активной струи, но расширяющимся в объеме с неизменным давлением.

Рассмотрим четыре основных способа преобразования низкопотенциальной энергии в струйных двигателях с разными термодинамическими циклами.

Первый способ

Низкопотенциальная энергия преобразуется в струйном двигателе с эжекторным сопловым аппаратом и рабочим телом, получаемым при сгорании топлива в камере периодического сгорания [4]. В данном случае процесс присоединения состоит из повторяющейся с заданной периодичностью пары последовательных, но разных термодинамических циклов (в каждом цикле свои источник энергии и рабочее тело). В первом цикле после сгорания топлива (при $V = \text{const}$) энергия продуктов сгорания, истекающих из реактивного сопла, преобразуется в кинетическую энергию первой части реактивной массы, которая движется в эжекторном насадке как газовый поршень и создает вслед за собой разрежение, а при истечении воздействует на лопатки турбины, создавая момент на валу.

За счет полученного разрежения источником энергии во втором цикле становится потенциальная и тепловая энергии сжатого силой гравитации атмосферного воздуха, который под действием разности давлений втекает в насадок, расширяясь, охлаждаясь и ускоряясь как в стохастическом природном процессе, но в заданном направлении, образуя при истечении из эжекторного насадка вторую часть реактивной массы с расчетными термодинамическими параметрами, воздействующую на лопатки.

За счет ускорения присоединяемой воздушной массы в насадке понижается давление, увеличивается разность потенциалов давлений перед истечением импульса активной струи следующего периода и, соответственно, его кинетическая энергия. Как следствие, повышаются степень разрежения в насадке во втором цикле этого периода и скорость присоединяемого воздуха. В результате преобразования энергии низкопотенциального источника в предыдущем периоде создаются условия для повышения эффективности преобразования энергии высокопотенциального источника в следующем периоде.

Таким образом, в отличие от процесса параллельного присоединения, в котором уменьшается кинетическая энергия эжектирующего потока

за счет перераспределения его первоначальной энергии на большую массу газа, периодическое нарушение равновесного состояния атмосферы в эжекторном насадке воздействием пульсирующей активной струи создает в нем с заданной частотой разность потенциалов давлений, обеспечивающую при восстановлении равновесного состояния ускорение присоединяемых воздушных масс, а также увеличение кинетической энергии активной струи. В результате этого дискретного процесса объединенная масса с возросшей кинетической энергией, воздействуя на лопатки турбины, увеличивает момент на ее валу без дополнительных затрат топлива. При этом для получения одинаковой мощности топлива затрачивается меньше (пропорционально коэффициенту m , скорректированному на величину коэффициента w_{tm}), чем в ГТД традиционных схем.

После начала истечения продуктов сгорания уменьшается их давление в камере, а также перед критическим сечением сопла и, соответственно, степень расширения "хвостовой" части газовой массы импульса в первом цикле и ее скорость. Происходит также снижение степени разрежения в насадке, уменьшение присоединяемой во втором цикле газовой массы и ее скорости. При этом "головная" часть импульса продуктов сгорания следующего периода выталкивается из насадка "хвостовую" часть присоединяемой воздушной массы предыдущего периода, имеющую меньшую скорость, что приводит к частичному смешению разделенных газовых масс, снижающему скорость объединенной реактивной массы.

Однако эксперименты [3] показали, что даже при наличии этих потерь кинетическая энергия объединенной реактивной массы

$$E_{tm} = 0,5 (1 + m) C_{tm}^2 \quad (2)$$

значительно больше кинетической энергии активной струи.

$$E_{aj} = 0,5 C_{aj}^2 \quad (3)$$

При эжектировании атмосферного воздуха пульсирующей струей продуктов сгорания экспериментально получен прирост реактивной силы до 140 % к исходной тяге [2, 3]. Его величина зависит от параметров эжекторного устройства, изменения реактивной массы и скорости ее истечения. Если коэффициент w_{tm} больше 1, то прирост кинетической энергии в результате процесса присоединения больше прироста тяги. Чтобы получить такой же прирост тяги (в 2,4 раза) при w_{tm} меньше 1, присоединяемая воздушная масса должна быть равна $2,4 mn$, где n — коэффициент, на который уменьшаются C_{aj} и C_{tm} .

А для получения прироста кинетической энергии, равного приросту тяги, в процессе с w_{tm} меньше 1, необходим коэффициент m , увеличенный в n^2 раз. Например, для получения прироста кинетической энергии в 2,4 раза при условии, что C_{tm} будет меньше по сравнению с C_{pj} в 2 раза (что маловероятно в этом процессе), m должен быть $2,4 \times 2^2$, т. е. равен 9,6, а коэффициент m , полученный экспериментально [3], больше 10, поэтому прирост кинетической энергии и при таком гипотетическом предположении больше прироста тяги.

Таким образом, при максимально возможном уменьшении w_{tm} экспериментально полученное значение кинетической энергии, равное $E_{tm} = 0,5(1 + 2,4mn^2) (C_{tm} / n)^2$, больше в 2,4 раза кинетической энергии активной струи (3). Причем она не рассеивается в атмосфере, как при создании реактивной тяги движителя, а используется для выполнения механической работы. Следовательно, большая часть мощности данным способом получается за счет преобразования потенциальной энергии и низкопотенциальной теплоты сжатых под действием гравитации газов в кинетическую энергию воздушной массы, воздействующей на лопатки турбины. Поэтому эффективность комбинированных струйных ГТД оценивается суммарным КПД, который равен КПД теплового двигателя, увеличенному на произведение коэффициентов m и w_{tm} .

Сегодня возможности повышения эффективности ГТД с циклом при $P = \text{const}$ практически исчерпаны, а значения коэффициента m , полученные экспериментально, в зависимости от параметров процесса присоединения изменяются в пределах 10—50, т. е. эффективность комбинированных двигателей может быть более чем на порядок выше эффективности современных ГТД (с соответствующим уменьшением выброса в атмосферу продуктов сгорания).

Автором статьи разработан стендовый вариант комбинированного струйного ГТД (совместно с НПО "Машиностроение", г. Реутов, подготовлена конструкторская документация), который позволяет варьировать и оптимизировать основные параметры процесса последовательного присоединения, в том числе с учетом скорости набегающего потока.

Второй способ

Проведенные эксперименты [3] показали, что оптимальное значение C_{aj} продуктов сгорания в процессе присоединения находится в диапазоне скоростей, которые можно получать при расширении сжатого рабочего тела, не используя для него дополнительный подогрев. Следовательно, продукты сгорания можно заменить сжатым воздухом, а камеру сгорания пневмоаккумулятором [5]. При истечении воздуха из последнего давление перед критическим сечением сопла в

течение цикла остается постоянным. Поэтому "хвостовая" часть газовой массы импульсов активной струи, снижающая эффективность процесса присоединения, отсутствует, что практически исключает смешение последовательно движущихся разделенных воздушных масс и, следовательно, потери на их трение. В результате коэффициент w_{tm} становится больше 1. Так как C_{tm} равно C_{aj} , то кинетическая энергия объединенной массы будет больше кинетической энергии активной струи, т. е. E_{tm} больше E_{aj} и, соответственно, больше потенциальной энергии рабочего тела — сжатого воздуха, образующего активную струю E_{ace} , не менее чем в m раз. Величина m изменяется в зависимости от параметров процесса присоединения в диапазоне 10—50 [3], поэтому E_{ace} составляет лишь 0,1—0,02 E_{tm} . Для повышения давления воздуха в пневмоаккумуляторе перед его расширением в струйном устройстве можно использовать различные способы и источники энергии, а такой баланс энергии позволяет сжимать его в компрессоре за счет мощности, полученной в результате процессов преобразований энергии атмосферы в предыдущих периодах.

Суммарные энергозатраты и потери в процессах преобразований выражаются формулой

$$E_{exp} = E_{ace} + E_{ce} + E_{te} + E_{oe}, \quad (4)$$

где E_{ace} — энергия для сжатия воздуха, образующего активную струю;

E_{ce} — потери энергии при сжатии воздуха в компрессоре;

E_{te} — потери энергии при преобразовании E_{tm} в турбине;

E_{oe} — прочие потери энергии.

Общий удельный вес технологических потерь ($E_{ce} + E_{te} + E_{oe}$) не превышает 25 % E_{tm} , в том числе: E_{ce} — 20 % E_{ace} ; E_{te} — 15 % E_{tm} ; E_{oe} — 2 % E_{aj} (потери означают, что данный способ преобразования энергии не противоречит второму началу термодинамики). В основном величина потерь зависит от КПД турбины, а удельный вес потерь в компрессоре и прочих потерь при больших величинах m незначителен и составляет, соответственно, 1 и 0,1 % от E_{tm} , увеличиваясь с уменьшением m .

С учетом энергозатрат и потерь (4), энергия для использования потребителями будет

$$E_{us} = E_{tm} - E_{exp}.$$

Если принять E_{tm} равной 100 %, то, при m , равном 20, и w_{tm} , равном 1, $E_{us} = 100 \% - (5 \% + 1 \% + 15 \% + 0,1 \%) = 78,9 \%$, а E_{exp} равна 21,1 % E_{tm} . Если основные параметры процесса и/или их соотношения отклоняются от опти-

мальных величин, то значения m и w_{tm} уменьшаются. Для компенсации технологических энергозатрат и потерь в процессах преобразования достаточно увеличить кинетическую энергию в результате процесса присоединения дополнительных масс на 44 %, т. е. для самоподдержания этого процесса E_{tm} должна быть больше E_{aj} лишь в 1,44 раза. Полученная сверх этого энергия может быть использована внешними потребителями. Например, при m , равном 1, удельный вес технологических затрат и потерь, за исключением E_{te} , значительно увеличивается: E_{ace} — до 50 %, E_{ce} — до 10 %, E_{oe} — до 1 %, а $E_{us} = 100 \% - (50 \% + 10 \% + 15 \% + 1 \%) = 24 \% E_{tm}$. Это значит, что даже при такой малой величине m , равной 1 (достижимой при не самых оптимальных параметрах этого процесса присоединения), невысоких КПД турбины (0,85) и компрессора (0,8), для сжатия рабочего тела можно использовать энергию, полученную в предыдущих циклах, оставляя потребителям 24 % располагаемой E_{tm} .

Результаты экспериментов подтверждают возможность преобразований энергии атмосферы при сжатии рабочего тела за счет мощности, полученной при ее преобразовании в предыдущих периодах. Если экстраполировать увеличение кинетической энергии (в 2,4 раза), полученное экспериментально в процессе последовательного соединения с активной струей из продуктов сгорания [3], на аналогичный процесс с использованием сжатого воздуха для образования этой струи, то даже без учета реального снижения потерь на смешение и трение объединяемых масс, повышающего эффективность этого процесса, $E_{us} = 100 \% - (41,7 \% + 8,3 \% + 15 \% + 0,8 \%) = 34,2 \% E_{tm}$.

Согласно второму началу термодинамики не вся энергия одного неисчерпаемого источника преобразуется в работу, часть превращается в теплоту, а при механическом сжатии рабочего тела — в высокопотенциальную теплоту, температуру которой можно регулировать в зависимости от степени сжатия и охлаждения рабочего тела перед расширением для полезного использования, например, в системах отопления. При расширении сжатого и охлажденного, например, до атмосферной температуры рабочего тела значения C_{aj} и C_{tm} будут находиться в диапазоне величин коэффициента скорости λ до 2,45, вполне достаточном для получения окружных скоростей, обеспечивающих высокий КПД турбомашин.

Температура высокопотенциального рабочего тела, а также низкопотенциального — воздуха в процессах преобразований энергии понижается. Управляя количеством атмосферного и холодного отработавшего воздуха, возвращаемого в

эжекторные насадки в качестве присоединяемых масс следующих периодов, можно получать температуру воздушной массы, необходимую, например, в системах кондиционирования. Если отработавший в одном устройстве присоединения или эжекторном сопловом аппарате воздух направлять в качестве присоединяемых масс в другое или следующий сопловой аппарат и т. д., то его можно охлаждать до сверхнизких температур, используемых в криогенной технике.

Процесс присоединения дополнительных масс воздуха в рассмотренном бестопливном способе преобразования энергии атмосферы также состоит из повторяющейся с заданной периодичностью пары последовательно связанных термодинамических циклов со своими источниками энергии и рабочими телами: из обратного цикла Карно (цикла воздушного теплового насоса — холодильной машины) и цикла охлаждения атмосферного воздуха при его расширении и ускорении. Часть мощности, полученной в результате преобразований энергии атмосферы в предыдущих периодах, используется для сжатия атмосферного воздуха в обратном цикле Карно. За счет работы расширения сжатого воздуха (высокопотенциального рабочего тела) создаются условия для начала второго цикла с использованием энергии низкопотенциального рабочего тела (так же как в процессе с продуктами сгорания).

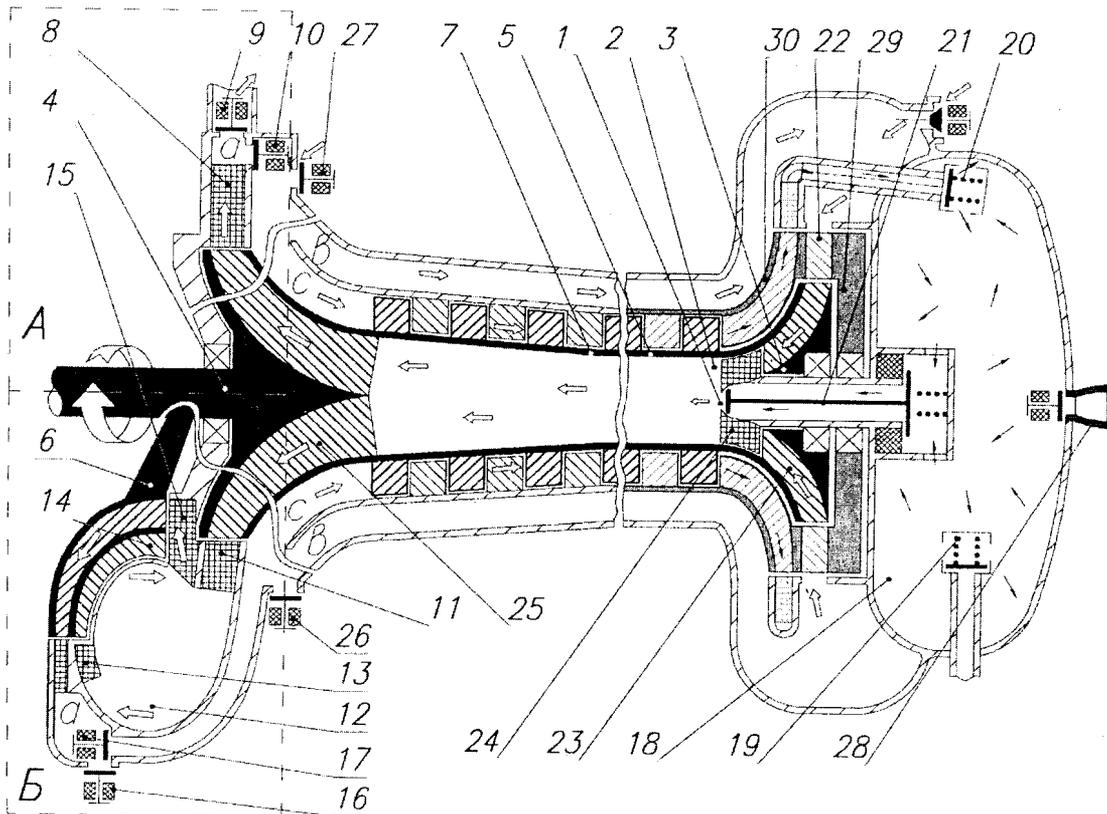
Таким образом, за счет энергии атмосферы осуществляется привод воздушного теплового насоса, в результате работы которого создаются условия для преобразования в эжекторном насадке низкопотенциальной энергии внешней газовой массы, находящейся вне насадка в равновесном состоянии, в доступную для использования кинетическую энергию, высокопотенциальную теплоту и "холод" расчетной температуры. Данный бестопливный способ преобразования энергии атмосферы отличается от способа ее преобразования в традиционных ветродвигателях управляемостью процесса создания воздушной струи в эжекторном насадке и высокой плотностью энергии на единицу рабочей площади. Устройства для осуществления этого способа — атмосферные бестопливные струйные двигатели.

С учетом результатов научных и экспериментальных исследований процесса последовательного присоединения эксперимент по получению мощности на валу атмосферного бестопливного струйного двигателя с открытым термодинамическим циклом можно провести без затрат на дополнительные научные исследования, разработку и производство оригинальной конструкции. Для создания стендового образца такого двигателя можно использовать уже готовые уст-

ройства, например, в качестве силового элемента — турбинный модуль маломощного турбовального ГТД, а для сжатия воздуха, образования активной струи — компрессор любого типа, ресивер с пневмоклапаном и реактивным соплом. Соотношения геометрических параметров эжекторного устройства и необходимые параметры процесса присоединения для получения расчетного количества и скорости объединенной воздушной массы, воздействующей на лопатки турбины, известны, а конструкция эжекторного насадка — единственного элемента, который необходимо изготовить, — предельно проста. Кроме того, возможность изменения параметров модульной конструкции позволяет использовать ее для оптимизации параметров процесса последовательного соединения с воздушной активной струей и при разработке необходимых (в зависимости от сферы применения) оригинальных конструкций бестопливных струйных ГТД.

Эффективность атмосферных бестопливных струйных двигателей по сравнению с известными ветровыми, солнечными и геотермальными преобразователями даровой и экологически чистой энергии не зависит от географических, временных и погодных условий, а удельная мощность значительно выше и сопоставима с удельной мощностью тепловых двигателей традиционных схем. Отсутствие жаростойких материалов и систем, связанных с использованием топлива, упрощает конструкцию, технологию, снижает себестоимость, повышает надежность и наряду с возможностью одновременной выработки трех видов энергии расширяет сферу применения бестопливных двигателей. Эффективность в основном зависит от значений m и w_{im} , технологических потерь, а также видов используемой потребителями энергии и сферы применения (в энергетических стационарных и мобильных системах, для привода различных устройств и типов движителей с одновременным получением высокопотенциальной теплоты и/или "холода"). Ее можно оценивать величиной удельной мощности или отношением E_{us}/E_{im} , числитель которого увеличивается на величину энергии, используемой дополнительно сверх получаемой мощности.

Из приведенного выше описания бестопливного способа преобразования энергии и принципа конструкции двигателя для его реализации видно, что наряду с простотой они достаточно эффективны. Однако за счет некоторого усложнения конструкции можно дополнительно повысить эффективность и расширить сферы применения атмосферных бестопливных струйных двигателей (см. рисунок).



Принципиальная схема возможных вариантов бестопливного преобразования низкопотенциальной энергии в струйных двигателях:

1 — сужающееся реактивное сопло; 2 — эжекторный насадок — устройство присоединения дополнительных масс эжекторного соплового аппарата; 3, 4 — первая и вторая турбины силового вала, соответственно; 5 — силовой вал; 6 — центробежный компрессор силового вала; 7 — осевой компрессор силового вала; 8 — центробежный диффузор; 9 — выпускной пневмоклапан; 10 — пневмоклапан; 11 — направляющий аппарат; 12 — объем вихревой камеры — низкотемпературного теплоприемника; 13 — направляющий аппарат на входе второй ступени турбины 4; 14 — лопатки второй ступени турбины 4; 15 — направляющий аппарат на входе компрессора 6; 16 — выпускной пневмоклапан; 17 — пневмоклапан; 18 — пневмоаккумулятор рабочего тела; 19, 20 — обратные клапаны для подачи рабочего тела, сжатого внешними устройствами, и сжатого в компрессоре двигателя, соответственно; 21 — электромагнитный клапан для периодической подачи рабочего тела; 22 — турбинные лопатки — направляющий аппарат на входе в турбину 3; 23 — турбинные лопатки турбины 3; 24 — направляющий аппарат на выходе турбины 3; 25 — лопатки первой ступени турбины 4; 26, 27 — клапаны впускные; 28 — реактивное сопло; 29 — турбина, не закрепленная на силовом валу; 30 — компрессор, кинематически не связанный с силовым валом

В рассматриваемых вариантах эжекторный сопловой аппарат может состоять из сужающегося реактивного сопла 1 (или струйного устройства любого другого принципа действия, обеспечивающего расчетные параметры импульсов активной струи) и эжекторного насадка — устройства присоединения 2. Для уменьшения продольных размеров струйного двигателя прочная часть устройства присоединения и турбин 3 и 4, закрепленных на концах силового вала 5, находится внутри этого полого вала, а снаружи вала расположены роторы компрессоров 6, 7. Выход ступеней компрессора 30, не закрепленного на валу 5, связан через обратный клапан 20 с пневмоаккумулятором 18 рабочего тела. Сжатый воздух в него подается через клапан 19 или 20. Клапан 21 обеспечивает расчетную периодичность и длительность истечения сжатого воздуха из реактивного сопла. Вслед за воздушной массой импульса в устройстве 2 образуется разрежение. Под действием атмосферного давления присоединяемый воздух через

клапаны 26, 27, лопатки 22 турбины 29, лопатки 23 турбины 3, направляющий аппарат 24 ускоряется вслед за воздушной массой импульса. От геометрических параметров сопла 1, устройства 2, их соотношения и термодинамических параметров реактивной массы импульсов зависит степень получаемого в устройстве 2 разрежения и период времени, в течение которого оно сохраняется. А от этого, в свою очередь, зависит количество присоединяемого воздуха, его скорость и суммарный напор, создающий момент на валу 5 за счет воздействия втекающей воздушной массы на лопатки 23 турбины 3 и объединенной реактивной массы на лопатки 25 турбины 4, закрепленной на другом конце этого вала. Часть полученной суммарной мощности используется для привода компрессоров 6, 7, а часть — внешними потребителями.

В одном из вариантов (А) отработавшая объединенная масса направляется в центробежный диффузор, в котором ее оставшаяся кинетическая энергия преобразуется в потенциальную

перед выбросом во внешнюю среду по каналу a через клапан 9 для повышения эффективности процесса присоединения и/или повторного использования через канал b в качестве присоединяемых масс.

Сжимая отработавшую массу в компрессоре 7 за счет части E_{us} , можно повысить эффективность процесса присоединения и стравливать ее во внешнюю среду с повышенным давлением через клапан 9 и/или повторно использовать, подавая через клапан 10 по каналам b и c . За счет разрежения, получаемого перед входом в компрессор 7, увеличивается разность потенциалов давлений при образовании импульсов, а в результате — увеличивается также скорость активной струи и кинетическая энергия объединенной реактивной массы с понижением температуры и увеличением момента на валу 5.

Получить разрежение для увеличения разности потенциалов давлений можно без дополнительных затрат энергии. Для этого струи, истекающие из лопаток 25 турбины 4 после создания момента, через направляющий аппарат 11 закручиваются по спирали (Б). В вихревой камере 12, в которую происходит истечение, за счет оставшейся кинетической энергии создается вихревой эффект, образующий в центральной части разрежение, увеличивающее разность потенциалов давлений при расширении рабочего тела. Одновременно в периферийной части созданного вихря повышается давление объединенной массы, которая через направляющий аппарат 13 воздействует на лопатки 14 турбины 4, а затем (сразу или после сжатия в компрессоре 6) через клапан 16 выбрасывается и/или через клапан 17 направляется для повторного использования. В этом случае можно дополнительно увеличивать разность потенциалов давлений за счет использования части E_{us} , соединив центр объема 12 через направляющий аппарат 15 со входом компрессора 6.

При сжатии низкотемпературной отработавшей массы уменьшаются затраты энергии на работу сжатия по сравнению со сжатием воздуха с атмосферной температурой, поэтому двигатели с открытым циклом, наряду с получением мощности, можно использовать в качестве эффективных генераторов высокопотенциального рабочего тела для более мощных бестопливных систем, создания низкотемпературных реактивных струй (в соплах 28) и тяги. Эффективность сжатия можно повысить также, используя биротативные компрессоры 7 и 30 с вращающимися в противоположные стороны рабочими колесами без неподвижных направляющих аппаратов.

Третий способ

Процесс последовательного присоединения можно использовать для получения мощности, высокопотенциальной теплоты и "холода" вне атмосферных условий, преобразуя тепловую энергию внешней среды в замкнутом термодинамическом цикле [5].

Представим, что атмосферный бестопливный струйный двигатель помещен в изолированный от внешней среды объем, заполненный газом — воздухом или гелием. При работе двигателя за счет охлаждения отработавшей массы в нем понижается температура и давление. Параметры процесса присоединения изменятся настолько, что в какой-то момент E_{tm} станет недостаточно для создания расчетной мощности компрессора, сжимающего рабочее тело для образования активной струи. В каждом цикле будет уменьшаться степень сжатия и C_{qf} . Процесс присоединения постепенно "затухнет" и двигатель, "заморозившись", остановится. Этого не произойдет, если изолированный объем используется в качестве низкотемпературного теплоприемника для истечения отработавшей газовой массы и соединен с теплообменным устройством, а выход этого устройства соединен с входами устройства присоединения и компрессора, образуя замкнутый контур.

Под действием неуравновешенной силы давления газов, возникающей при создании разрежения за газовой массой импульсов активной струи, часть отработавшей газовой массы из этого объема направляется в теплообменное устройство. В нем, получая тепло и понижая температуру внешней среды, она нагревается до температуры, необходимой для выполнения функции присоединяемых масс следующих периодов. Другая часть газовой массы через теплообменное устройство (или минуя его) направляется в компрессор для сжатия и дальнейшего использования в качестве высокопотенциального рабочего тела.

В результате нагрева отработавшей газовой массы в теплообменном устройстве процесс последовательного присоединения в струйных двигателях с замкнутым циклом продолжается сколь угодно долго и независимо от давления внешней среды, которая при этом выполняет функции нагревателя — источника теплоты, преобразуемой в работу.

Отличие бестопливных двигателей с замкнутым циклом от двигателей с разомкнутым циклом заключается в организации теплообмена с внешней средой и возможности варьировать давление и температуру в теплоприемнике. Причем эффективность этих двигателей в значительной степени зависит от разности температур между источником теплоты внешней среды и теплоприемником перед нагревом отработавшей газовой массы, используемой в следующих периодах. Варьируя параметры процесса присоединения, давление и температуру в теплоприемнике и перед повторным использованием отработавшей массы, можно управлять мощностью двигателя и расширять диапазон температуры используемых источников теплоты внешней среды до отрицательных температур. На основе струйных двигателей с замкнутым циклом можно создавать воздухонезависимые бестоплив-

ные энергетические системы, способные работать за счет низкопотенциальной теплоты в экстремальных условиях внешней среды.

Четвертый способ

В двух предыдущих бестопливных способах преобразования низкопотенциальной энергии внешней среды рабочее тело для получения активной струи сжимали в многоступенчатом механическом компрессоре.

Рассмотрим варианты использования рабочего тела без механического сжатия — при его ускорении в результате нагрева за счет теплоты различных источников энергии, например, низкопотенциальным теплом внешней среды в замкнутом объеме пневмоаккумулятора. В этом случае необходимое давление в последнем может быть получено за счет его заполнения отработавшей в предыдущих периодах низкотемпературной массой, а расчетная разность температур перед нагревом сменяющейся массой внешнего теплоносителя достигается за счет многократного использования отработавшей массы в процессе присоединения. Нагревать отработавшую массу нужно по меньшей мере в двух пневмоаккумуляторах, которые должны поочередно соединяться со струйным устройством после нагрева и отсоединяться для удаления остатков нагретого рабочего тела (при снижении давления ниже расчетного уровня) и очередного заполнения отработавшей массой. Причем в двигателях с открытым циклом при расширении удаляемых остатков можно выполнять полезную работу, например привод устройств, ускоряющих нагнетание низкотемпературной массы в другой пневмоаккумулятор, а в двигателях с замкнутым циклом — выполнять работу и использовать в следующих периодах процесса присоединения в качестве присоединяемых масс. Для данного варианта нагрева необходимы большой объем пневмоаккумуляторов и площадь рабочей поверхности теплообменного устройства. Поэтому он может применяться в тех энергетических установках, в которых объем и масса не играют существенной роли и не может — в двигателях большинства транспортных средств.

Снизить массу бескомпрессорных двигателей можно, нагрев рабочее тело с использованием электроэнергии, генерируемой в предыдущих периодах за счет части получаемой мощности, так как при нагреве низкотемпературного рабочего тела в пневмоаккумуляторе высокопотенциальной теплотой не нужно применять теплообменное устройство. При этом уменьшается время нагрева, масса электрогенератора меньше, конструкция проще и технологичнее, а производство и эксплуатация по сравнению с компрессором менее затратны; потери энергии при получении расчетного уровня давления меньше, чем при механическом сжатии рабочего тела. Такой вариант эффективнее варианта нагрева рабочего за счет низкопотенциальной теплоты и

позволяет получить удельную мощность, даже большую, чем при механическом сжатии газов.

В другом варианте — при использовании электрореактивного устройства для образования активной струи — низкотемпературную массу в пневмоаккумуляторе нужно нагревать лишь до минимального уровня давления или использовать иной способ, обеспечивающий поступление рабочего тела в это устройство, для последующего ускорения за счет электроэнергии, генерируемой в предыдущих периодах. Для ускорения рабочего тела в импульсном электрореактивном устройстве можно применять различные методы (термоэлектрический, электромагнитный и т. д.), а при использовании этого устройства в процессе последовательного присоединения увеличивается скорость активной струи, повышаются коэффициент m и удельная мощность бескомпрессорного струйного двигателя.

Если за счет мощности, полученной в результате преобразований низкопотенциальной энергии внешней среды, генерировать электроэнергию для ускорения активной струи и одновременно для внешнего использования, то получается универсальный источник электроэнергии с неограниченной сферой применения. Основное преимущество способа — простота конструкции, надежность и высокая удельная мощность двигателей для его реализации — качества, необходимые большинству двигателей транспортных средств, а особенно авиационным двигателям. Электрореактивному устройству для образования активной струи в процессе присоединения необходима лишь одна часть от полученной электроэнергии, а оставшуюся можно использовать, например, в электрореактивном двигателе этого двигателя для создания реактивной тяги. Причем можно получать гиперзвуковую скорость истечения реактивной массы, которая ускоряется за счет использования электроэнергии, получаемой также в результате бестопливных и бескомпрессорных преобразований низкопотенциальной энергии внешней среды. А при истечении реактивной струи из импульсного электрореактивного движителя в атмосфере ее можно использовать в качестве активной в эжекторном устройстве этого движителя для увеличения реактивной тяги без дополнительных затрат электроэнергии.

Заключение

Необходимо отметить, что не вся теплота внешних источников преобразуется в работу, часть ее (согласно второму началу термодинамики) в разной степени, но во всех способах, рассеивается во внешней среде в процессах преобразования энергии. Важно подчеркнуть, что реактивная тяга и кинетическая энергия объеди-

ненной массы, получаемые в результате процесса последовательного присоединения, больше тяги и кинетической энергии активной струи. На этом утверждении, подтвержденном экспериментально [2, 3] и современными методами численного моделирования, основаны рассмотренные бестопливные способы преобразования низкопотенциальной энергии внешней среды, которые отличаются лишь организацией теплообмена с этой средой, различными вариантами подготовки рабочего тела для образования активной струи и ее ускорения.

Принцип увеличения кинетической энергии одинаков во всех способах: прирост происходит при восстановлении газовыми массами низкопотенциального рабочего тела равновесного состояния, нарушаемого газовой массой импульсов активной струи в эжекторном насадке. Величина прироста кинетической энергии объединенной массы зависит от соотношений основных параметров процесса последовательного присоединения, а также соотношения конструктивных параметров и пропорций эжекторного устройства. Только в узком диапазоне их оптимальных значений отсутствуют смещение и трение газовых масс в процессе присоединения и возможен значительный прирост кинетической энергии.

Использование процесса последовательного присоединения дополнительных масс в энергетических системах позволяет без ущерба для экологии преобразовывать неисчерпаемую, даровую природную энергию в любом месте и не-

зависимо от условий внешней среды в необходимый вид энергии, доступный для потребления непосредственно в местах выработки. При использовании источников теплоты можно управлять их агрегатным состоянием, а при масштабном применении этих систем — локально изменять климатические условия.

Бестопливные струйные двигатели могут иметь широкий диапазон мощностей и сферы применения. В зависимости от используемых циклов и назначения они способны работать в любых условиях внешней среды: в атмосфере, космосе, под водой. Их производство проще, эффективнее аналогичных традиционных и возможно на большинстве машиностроительных предприятий.

Литература

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969.
2. Открытие 314. СССР. Явление аномально высокого прироста тяги в газовом эжекторном процессе с пульсирующей активной струей / О. И. Кудрин, А. В. Квасников, В. Н. Челомей // Открытия и изобретения. 1951.
3. Кудрин О. И. Пульсирующее реактивное сопло с присоединением дополнительной массы: Тр./МАИ, 1958. Вып. 97.
4. Пат. 2188960 RU F 02 C 3/32, 5/12. Способ преобразования энергии в струйной установке (варианты), струйно-адаптивном двигателе и газогенераторе / Б. М. Кондрашов // Бюл. изобретений. 2002. № 25.
5. Международная заявка PCT/RU2002/000338 F 02 C 3/32. Способ преобразования энергии в струйных двигателях / Б. М. Кондрашов // ВОИС PCT WO2004/008180A1.

Статья поступила в редакцию 15 июня 2004 г.

Jet energy technologies

B. M. Kondrashov
Moscow, Russia

Considered are the methods of an environment low-potential energy transformation for deriving a power on the power arbor, a high-potential heat, a "cold" and a reactive thrust. In them use is made of the process of a series affixion of padding masses, which is implemented in the ejector nozzle boxes of gas-turbine engines.

* * *