

УДК 627.036.46: 536.6.071

ИМПУЛЬСНАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА С КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ

А. А. Маслов, В. В. Шумский, М. И. Ярославцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mails: maslov@itam.nsc.ru, shumsky@itam.nsc.ru, yaroslav@itam.nsc.ru

Предложены схема и конструкция высокоэнтальпийной установки кратковременного действия (импульсной аэродинамической трубы) с различными режимами работы, реализуемыми путем комбинирования различных способов нагрева рабочего тела (электрической дуги, химической энергии, адиабатического сжатия, нагрева во внешнем по отношению к форкамере источнике тепла). Установка рассчитана на следующие диапазоны параметров: давление торможения $p_0 = 1 \div 200$ МПа, температура торможения $T_0 = 600 \div 4000$ К, число Маха $M = 4 \div 20$, время рабочего режима $t < 1$ с. Предусмотрена работа установки в режиме классической импульсной трубы с уменьшающимися параметрами рабочего тела и в режиме стабилизации параметров за счет синхронного движения навстречу друг другу оппозитно расположенных поршней мультипликатора давления.

Ключевые слова: высокоэнтальпийная установка кратковременного режима, импульсная труба, форкамера, рабочее тело, стабилизация параметров, мультипликатор давления, электрическая дуга, химический нагрев, адиабатическое сжатие.

Введение. Основным преимуществом высокоэнтальпийных установок кратковременного режима (менее 1 с) по сравнению со стационарными установками длительного действия является возможность воспроизведения натуральных давлений p_0 и температур T_0 торможения в широком диапазоне сверх- и гиперзвуковых скоростей и высот полета летательных аппаратов. Это преимущество позволяет обеспечить в экспериментах моделирование аэродинамических характеристик ЛА по числам Маха и Рейнольдса, в частности для масштабных моделей [1, 2]. Воспроизведение p_0 и T_0 позволяет на примере моделей с тепломассоподводом исследовать процессы, происходящие в высокоскоростных воздушно-реактивных двигателях, поскольку воспламенение и сгорание топлива, скорости химических реакций, тепловыделение во времени и пространстве зависят не только от критериев подобия, но и от абсолютных давлений и температур.

Выполнение всех требований, необходимых для полного моделирования процессов в высокоскоростных летательных аппаратах и воздушно-реактивных двигателях, не может быть обеспечено ни одним типом наземных установок. Однако при решении конкретных задач именно эксперименты в высокоэнтальпийных установках кратковременного режима позволяют наиболее точно моделировать реальные условия [3]. При этом кратковременность рабочего режима позволяет решить такую сложную проблему, как обеспечение от-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00138-а) и в рамках Программы РАН № 25.

© Маслов А. А., Шумский В. В., Ярославцев М. И., 2012

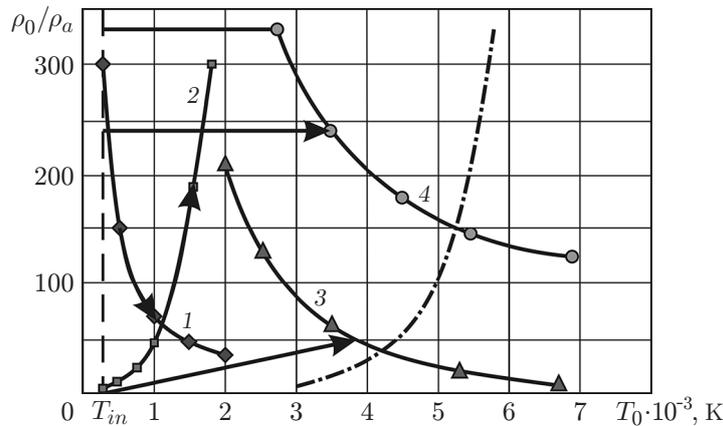


Рис. 1. Зависимость ρ_0/ρ_a от температуры торможения в различных АДТ: 1 — обычные АДТ (время режима до 10 мин, нагрев РТ при постоянном давлении); 2 — АДТ с тяжелым поршнем (время режима до 0,1 с, адиабатический нагрев РТ); 3 — ударные АДТ (время режима менее 0,01 с); 4 — импульсные АДТ (время режима до 0,2 с, нагрев при постоянной плотности); штрихпунктирная линия — граница области равновесного течения в сопле; стрелки — направление процесса при нагревании РТ от температуры $T_{in} = 290$ К

сутствия разрушения деталей высокоэнтальпийных установок, которое может произойти вследствие высоких температуры и давления торможения.

Установки кратковременного режима используются для изучения процессов, характерные времена установления которых значительно меньше времени режима (в случае работы установки с постоянными в течение режима параметрами) или скорости изменения параметров в рабочей части установки (в случае работы установки с уменьшающимися в течение режима физическими параметрами).

Указанные преимущества и особенности работы высокоэнтальпийных установок кратковременного режима обеспечили их широкое применение при исследовании аэротермогазодинамических задач о сверх- и гиперзвуковых течениях газа. Характеристики и результаты сравнительного анализа основных типов таких установок, проблемы и перспективы их развития, перечень задач, исследуемых с их использованием, результаты сравнения полученных данных с данными натурных полетов летательных аппаратов подробно изложены в работах [3–7].

Не повторяя выводов, содержащихся в [3–7], отметим только проблему получения в установках больших чисел Рейнольдса при больших числах Маха ($Re \sim \rho_0/M^4$, где ρ_0 — плотность рабочего тела (РТ) в форкамере (ФК); M — число Маха в рабочей части). В установках различного типа эта проблема решается за счет увеличения ρ_0 и температуры РТ в ФК разными способами.

На рис. 1 сравниваются способы увеличения ρ_0 в зависимости от T_0 (ρ_a — плотность газа при нормальных условиях) [8]. В обычных аэродинамических трубах (АДТ) нагрев происходит при постоянном давлении, что приводит к уменьшению плотности РТ пропорционально увеличению T_0 (кривая 1 на рис. 1). Адиабатический нагрев с помощью тяжелого поршня (кривая 2), эффективный при получении высоких плотностей и больших чисел Рейнольдса, не позволяет получать высокие температуры торможения без использования дополнительных способов нагрева РТ. В ударных АДТ (кривая 3), в которых достижимы высокие температуры торможения, происходит неизоэнтропический нагрев РТ в ударных волнах, что приводит к значительным потерям давления и соответственно плотности. Это

обстоятельство ограничивает возможность моделирования в таких АДТ чисел Рейнольдса и при $T_0 > 4000$ К приводит к неравновесности течения в сопле (штрихпунктирная линия на рис. 1). Только нагрев в замкнутом объеме ($\rho_0 = \text{const}$), который имеет место в импульсных АДТ, позволяет одновременно получать большие значения p_0 , T_0 , ρ_0 , а следовательно, большие значения Re , пропорциональные ρ_0 , и удельные энтальпии РТ (кривая 4). Получение натуральных значений энтальпии особенно важно при исследовании процессов в высокоскоростных воздушно-реактивных двигателях.

Целью настоящей работы является разработка схемы высокоэнтальпийной установки кратковременного режима (импульсной АДТ) с различными режимами работы, в которой обеспечиваются параметры РТ в диапазонах $p_0 = 1 \div 200$ МПа, $T_0 = 600 \div 4000$ К, $M = 4 \div 20$. Установка является модификацией гиперзвуковой импульсной АДТ ИТ-302М Института теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН [11].

1. Схема и принцип действия АДТ. Разработанная установка имеет следующие особенности [9].

1. Использование различных способов нагрева РТ (электрической дуги, химической энергии, выделяющейся при разложении закиси азота или сжигании горючих газов [10], адиабатического сжатия [3], нагрева во внешнем по отношению к ФК источнике тепла [3]) и их комбинаций. По отдельности все способы получения и нагрева РТ применяются в различных высокоэнтальпийных установках кратковременного режима. Некоторые комбинированные способы нагрева опробованы в гиперзвуковых импульсных трубах ИТ-302М и АТ-303 ИТПМ СО РАН.

2. Обеспечение наряду с режимами классической импульсной трубы с падающими параметрами РТ (истечение газа из ФК постоянного объема) режимов с постоянными параметрами РТ в ФК и рабочей части (стабилизация параметров) за счет наличия мультипликатора давления [11].

3. Возможность задержки момента вскрытия диафрагмы до завершения в ФК химических реакций при использовании для нагрева химической энергии. Задержка момента вскрытия диафрагмы также обеспечивает повышение точности определения параметров за счет исключения из времени режима промежутка времени, в течение которого в объеме ФК и измерительных каналах происходят переходные процессы при ударных нагрузках, вызванных ударным подводом тепла (например, при мощном электрическом разряде в ФК или при детонационном сжигании химически реагирующих газов в ФК).

4. Большой объем ФК ($V_{\text{ф}} = 80$ дм³). Использование такого объема $V_{\text{ф}}$ позволяет расширить возможности импульсных труб и увеличить информативность эксперимента, в частности организовать в рабочей части гиперзвуковой поток при использовании сопел с диаметром среза $d_c = 1$ м при времени режима до 100 мс (в сочетании со второй ФК) либо увеличить время режима до 1 с за счет использования сопел умеренного размера ($d_c \approx 0,3$ м).

5. Оппозитное расположение поршней мультипликатора для уменьшения (в идеале до нуля) инерционных нагрузок на АДТ. При этом имеется принципиальная возможность регулировать объем ФК от опыта к опыту за счет изменения начального расстояния между поршнями мультипликатора.

На рис. 2 приведена схема трубы, содержащей ресивер 1 со сжатым воздухом, используемым при работе мультипликатора давления, и быстродействующий пневмоклапан 2, изолирующий толкающий воздух от надпоршневого пространства 3 поршня 4 левой (на рис. 2) части 5 мультипликатора. Правая часть 6 мультипликатора содержит поршень 7. Поршни 4 и 7 расположены оппозитно и могут синхронно перемещаться навстречу друг другу.

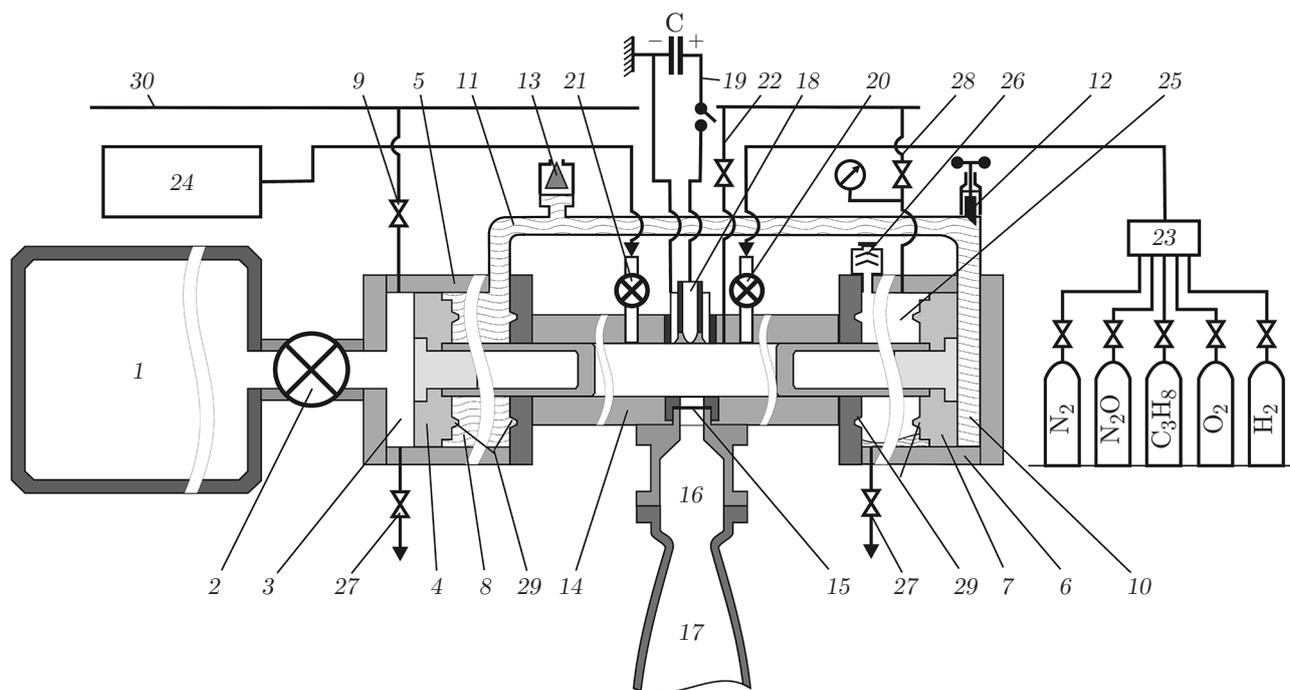


Рис. 2. Схема импульсной трубы с оппозитным расположением поршней мультипликатора:

1 — ресивер; 2 — быстродействующий пневмоклапан; 3 — надпоршневое пространство поршня 4; 4 — поршень левой (на схеме) части мультипликатора давления; 5 — левая часть мультипликатора давления; 6 — правая часть мультипликатора давления; 7 — поршень правой части мультипликатора; 8 — подпоршневая полость поршня 4; 9 — пневмотрасса для технологических работ; 10 — надпоршневая полость поршня 7; 11 — гидроканал для протока жидкости; 12 — регулятор расхода жидкости; 13 — обратный клапан для вакуумирования жидкости и выхода пузырьков газа; 14 — ФК; 15 — диафрагменный узел; 16 — вторая ФК; 17 — сопло; 18 — коаксиальные электроды; 19 — конденсаторная батарея; 20 — пневмотрасса для заправки ФК газами, участвующими в химических реакциях; 21 — пневмотрасса для заправки ФК высокотемпературным сжатым воздухом от внешнего подогревателя 24; 22 — пневмотрасса для заправки ФК сжатым воздухом; 23 — распределительная система заполнения ФК химически реагирующими газами; 24 — внешний подогреватель; 25 — подпоршневая полость поршня 7; 26 — дренированная емкость для выхода воздуха из полости 25 и слива тормозной жидкости; 27 — пневмотрасса для сброса избыточного давления; 28 — пневмотрасса для возвращения поршневой системы в исходное положение; 29 — лабиринтное уплотнение; 30 — воздух из газгольдеров

К надпоршневому пространству 3 поршня 4 подходят пневмотрасса 27 с вентилем для сброса давления и пневмотрасса 9 с вентилем для заполнения (для ряда вариантов работы установки) полости 3 воздухом с избыточным давлением. Подпоршневое пространство 8 соединено с надпоршневым пространством 10 поршня 7 гидроканалом 11, содержащим устройство 12 для изменения расхода протекающей по каналу жидкости (за счет изменения площади проходного сечения канала) и обратный клапан 13 для удаления пузырьков газа.

Перпендикулярно оси мультипликатора в центре форкамеры 14 расположены диафрагма 15, устройство для ее вскрытия (на рис. 2 не показано), дросселирующая камера 16 (вторая ФК), узел дросселирующей решетки между первой и второй ФК (на рис. 2 не показан), сопло 17 и коаксиальные электроды 18 для создания в ФК 14 разряда электрической энергии конденсаторной батареи 19 емкостью C . Установка может работать как с одной ФК 14 (в этом случае сопло 17 подсоединяется непосредственно к узлу диафрагмы 15), так и с двумя ФК (в этом случае сопло 17 подсоединяется ко второй ФК (см. рис. 2)).

К ФК 14 подходят пневмотрассы 20, 21, 22. Трасса 20 с вентилями предназначена для подсоединения к ФК системы заправки 23 реагирующими газами (N_2O , C_3H_8 , H_2), азотом, кислородом, углекислым газом и другими газами, хранящимися в стандартных сменных баллонах. Через трассу 22 ФК наполняется воздухом из газгольдеров. Предусматривается возможность работы установки при нагреве воздуха во внешнем подогревателе 24, принципы действия которого могут быть различными: от кауперного нагрева до адиабатического сжатия. В этом случае наполнение ФК происходит по трассе 21 с быстродействующим клапаном.

На заключительном этапе вытеснения РТ из ФК 14 торможение поршней 4, 7 мультипликатора осуществляется лабиринтными уплотнениями 29, находящимися на больших ступенях поршней и торцевых стенках мультипликатора. С этой целью подпоршневое пространство 25 поршня 7 частично заполняется жидкостью. В тот момент, когда движущийся поршень 7 достигает крайнего левого положения, избыток этой жидкости переливается в дренированную емкость 26. При открытой верхней крышке емкости 26 происходит стравливание через нее воздуха из полости 25 при движении поршня 7 влево из крайнего правого положения.

После проведения опыта для возвращения поршней 4 и 7 в исходное положение крышка емкости 26 закрывается, а в полость 25 через трассу 28 подается избыточный воздух. Поршень 7 движется вправо, вытесняя жидкость из полости 10 через гидроканал 11 в полость 8, что обеспечивает синхронное с поршнем 7 возвращение поршня 4 в исходное положение.

Имеется возможность уменьшения объема ФК 14. Такая необходимость возникает, когда, например, планируется нагрев РТ только за счет электрической дуги. В этом случае повышение давления и температуры в начале режима должно соответствовать возможностям конденсаторной батареи. Такое соответствие обеспечивается за счет уменьшения массы РТ, накачиваемого в ФК до опыта, т. е. за счет уменьшения объема ФК. Если при работе установки планируется нагрев РТ за счет электрической дуги и химической энергии, выделяющейся при разложении N_2O , то энергии конденсаторной батареи должно быть достаточно для нагрева исходной смеси в ФК только за счет дуги как минимум до $1100 \div 1200$ К, чтобы обеспечить полное разложение N_2O . Объем ФК можно уменьшить за счет установки кольцевой вставки в полость 3. Возможны также другие варианты.

При нагреве РТ только за счет электрической дуги вклад энергии (разряд конденсаторной батареи) и, следовательно, повышение давления в изохорном процессе осуществляются в течение промежутка времени не более 1 мс. Пренебрегая тем, что часть энергии будет подводиться не в изохорном процессе, а также некоторым произволом в определе-

нии начального давления в нулевой момент режима вследствие наличия переходных процессов, происходящих в измерительном канале при почти ступенчатом росте давления в ФК, можно предусмотреть автоматическое вскрытие диафрагмы 15 за счет естественной потери прочности при увеличении давления. При использовании для нагрева РТ химической энергии необходима задержка вскрытия диафрагмы, для того чтобы реакции в ФК полностью завершились. (Обычно при иницировании реакции мощным электрическим разрядом задержка достигает десятков миллисекунд [10].) Кроме того, задержка может использоваться при работе установки без выделения химической энергии с целью повышения точности результатов за счет исключения из времени режима промежутка времени, в течение которого происходят переходные процессы. Поэтому в установке предусматривается вскрытие диафрагмы 15 двумя способами: за счет естественной потери прочности при увеличении давления в ФК и при поступлении сигнала от электронного блока управления, обеспечивающего заранее заданную задержку относительно времени начала нагрева РТ в ФК (управляемая диафрагма).

2. Работа АДТ в режиме адиабатического сжатия РТ. Подготовка АДТ к пуску предусматривает выполнение следующих операций. До начала эксперимента газодинамический тракт установки, включающий вторую ФК 16, сопло 17, рабочую часть и выхлопную вакуумную емкость (на рис. 2 не показаны), изолируется от ФК диафрагмой 15 и откачивается вакуумными насосами до давления, равного нескольким паскалям. Быстродействующий пневмоклапан 2 закрывается, и ресивер 1 заполняется сжатым воздухом до давления, необходимого для данного эксперимента. Крышка на емкости 26 закрывается, вентиль пневмотрассы 28 открывается, и в подпоршневое пространство 25 поршня 7 подается избыточное давление. При этом поршни 4, 7 расходятся в крайние положения. Под действием избыточного давления жидкости в гидроканале 11 обратный клапан 13 закрывается. После возвращения поршней 4, 7 в исходное положение осуществляется сброс давления из полости 25. Крышка на емкости 26 открывается. Система заправки ФК реагирующими газами 23 отключена и не имеет механической связи с ФК. Вентили пневмоканалов 9, 20, 22, 27, 28 закрыты.

Возможны варианты работы АДТ с подсоединенным источником внешнего нагрева РТ 24 и без него, с управляемой диафрагмой и без нее. В данном пункте рассматривается вариант с нагревом РТ во внешнем источнике тепла, подсоединенном к пневмоканалу 21 при отсутствии управляемой диафрагмы.

При запуске трубы путем открытия вентиля пневмоканала 21 ФК заполняется РТ, нагретым во внешнем источнике тепла 24. После заполнения ФК открывается быстродействующий клапан 2. Толкающий воздух из ресивера 1 поступает в полость 3. Под действием давления толкающего воздуха поршень 4 начинает перемещаться по направлению к ФК, выталкивая жидкость из подпоршневого пространства 8 через гидроканал 11 в полость 10 правой части мультипликатора. Под действием давления воздуха и жидкости поршни 4, 7 синхронно сходятся к центру ФК, адиабатически сжимая РТ. При увеличении давления в ФК 14 диафрагма 15 вскрывается и РТ с постоянным расходом вытесняется из ФК в сопло 17. Величина постоянной скорости поршней 4, 7, обеспечивающая постоянство параметров РТ в ФК, подбирается заранее с учетом давления РТ и его расхода через сопло 17 и полностью определяется расходом жидкости через гидроканал 11. Расход РТ устанавливается регулирующим органом устройства 12 перед пуском трубы. Большие ступени поршней 4, 7 имеют разные диаметры, причем площадь поршня 7 меньше площади поршня 4 на величину, равную площади поперечного сечения ФК 14. Это обеспечивает синхронность хода и одинаковые скорости поршней при сжатии и вытеснении РТ в ФК.

3. Работа АДТ при нагреве РТ только электрической дугой. В качестве РТ установки может использоваться воздух, азот, углекислый газ или другой нереагирующий

газ. Наполнение ФК 14 осуществляется либо через трассу 22 воздухом из газгольдеров, либо через трассу 20 из сменных баллонов с азотом, углекислым газом. Как отмечено выше, при таком варианте работы установки может потребоваться уменьшение объема ФК 14.

Подготовительные операции к запуску трубы представлены в п. 2 и поэтому в данном и следующих пунктах не описываются. Указаны только те изменения технологического процесса, которые необходимо выполнить для реализации рассматриваемых режимов.

Конденсаторная батарея 19 заряжается до необходимого напряжения. При запуске трубы происходит разряд конденсаторной батареи, давление и температура РТ в ФК резко повышаются. Если предусмотрено вскрытие диафрагмы 15 за счет роста давления в ФК, то момент начала режима совпадает (с погрешностью менее 1 мс (время разряда)) с моментом разряда. Если предусматривается задержка, то в качестве момента начала режима принимается момент принудительного вскрытия диафрагмы.

Установка может работать в режиме классической импульсной трубы с уменьшающимися в течение режима параметрами и в режиме стабилизации параметров. В последнем случае одновременно с вскрытием диафрагмы открывается быстродействующий клапан 2. Далее работа трубы осуществляется так же, как в п. 2, за исключением этапа адиабатического сжатия, который в данном варианте работы АДТ отсутствует.

4. Работа АДТ при нагреве РТ с использованием электрической дуги и химической реакции. Данный режим может использоваться только с управляемой диафрагмой, обеспечивающей задержку ее вскрытия для завершения в ФК химических реакций. В зависимости от вида реагирующего газа можно использовать различные варианты исходной смеси ФК [10]. Широкий выбор исходных составов обеспечивает получение различных давлений и температур РТ. Режимы работы характеризуются тем, что загрязнение РТ продуктами эрозии электродов является минимальным, так как энергия дугового разряда незначительна. Обычно эта энергия ограничена снизу минимальным напряжением зарядки конденсаторной батареи, необходимым для зажигания дуги. В импульсной АДТ ИТ-302М это напряжение составляет $2,0 \div 2,5$ кВ, что соответствует энергии разряда, равной $200 \div 250$ кДж.

Операции по заправке ФК реагирующими газами включают поочередное введение через трассу 20 с помощью узла 23, состоящего из электромагнитных клапанов, необходимых компонентов из сменных баллонов. Затем ФК заполняется воздухом (если необходимо) с помощью вентиля трассы 22, после чего вентили 20, 22 закрываются и система заправки 23 отводится от ФК.

Производится зарядка конденсаторной батареи. При запуске трубы происходит разряд конденсаторной батареи, в ФК начинается химическая реакция с выделением тепла. По истечении времени задержки осуществляется вскрытие диафрагмы. Возможные при этом варианты режимов изложены в пп. 2, 3.

5. Работа АДТ при нагреве с использованием электрической дуги, химической энергии и адиабатического сжатия РТ. Отличие данного режима от режима, описанного в п. 4, заключается в том, что после электрического разряда и завершения в ФК химических реакций открывается быстродействующий клапан 2. Затем начинает работать мультипликатор, последовательность действий которого изложена в п. 2.

Данный режим используется в случае, когда после завершения нагрева с помощью электрической энергии и химической реакции необходимо дополнительно увеличить температуру и давление РТ. Это осуществляется за счет адиабатического сжатия, после завершения которого происходит принудительное вскрытие диафрагмы. Возможные при этом режимы рассмотрены выше.

6. Выводы. Разработана схема высокоэнтальпийной установки кратковременного действия (импульсной АДТ) с различными режимами работы. Установка рассчитана на следующие диапазоны параметров РТ: $p_0 = 1 \div 200$ МПа, $T_0 = 600 \div 4000$ К, $M = 4 \div 20$. Продолжительность рабочего режима $t < 1$ с.

Данная установка имеет следующие преимущества:

— использование различных способов нагрева (электрическая дуга, химическая реакция, адиабатическое сжатие, нагрев во внешнем по отношению к ФК источнике тепла) и их комбинаций;

— наличие оппозитно расположенных поршней мультипликатора давления для стабилизации параметров РТ в течение рабочего режима;

— возможность задержки вскрытия диафрагмы.

Описаны технологические процессы, происходящие в импульсной АДТ с комбинированным нагревом и стабилизацией параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Королев А. С.** Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях / А. С. Королев, Б. В. Бошняков, И. Г. Друкер, В. В. Затолока. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978.
2. **Затолока В. В.** Импульсные аэродинамические трубы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986.
3. **Топчян М. Е., Харитонов А. М.** Аэродинамические трубы для гиперзвуковых исследований (достижения, проблемы, перспективы) // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 3. С. 66–81.
4. **Advanced hypersonic test facilities** / Ed. by F. Lu, D. Marren. Reston: Amer. Inst. Aeronaut. and Astronaut., Inc., 2002. (Progress in astronautics and aeronautics; V. 198).
5. **Кислых В. В.** Высокоскоростные импульсные трубы. Сравнительный анализ и перспективы развития // Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Жуковский, 21–24 сент. 2004 г. Жуковский: Центр. аэрогидродинам. ин-т, 2004. С. 467–468.
6. **Волов Д. Б.** Теплотехнические устройства для получения плотного высокотемпературного газа // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 4. С. 604–626.
7. **Анфимов Н. А., Кислых В. В.** Моделирование обтекания и теплообмена гиперзвуковых летательных аппаратов в поршневых газодинамических установках многокаскадного сжатия (ПГУ МКС) // Проблемы современной механики. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2008. С. 17–43.
8. **Lukasiewicz J.** Experimental methods of hypersonics. N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 1973.
9. **Пат. 2436058 РФ, МПК G 01 M 9/2.** Аэродинамическая труба / М. И. Ярославцев, В. М. Фомин, А. А. Маслов, Л. Н. Пузырев, В. В. Шумский. № 2010129903/28; Заявл. 16.07.10; Оpubл. 10.12.11, Бюл. № 34.
10. **Шумский В. В., Ярославцев М. И.** Химический нагрев рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 5. С. 31–43.
11. **Пузырев Л. Н., Ярославцев М. И.** Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 135–140.

Поступила в редакцию 27/II 2012 г.