

УДК 627.036.46: 536.45: 536.46

## Высокоэнтальпийная установка кратковременного действия 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, Новосибирск*

E-mail: shumsky@itam.nsc.ru, yaroslav@itam.nsc.ru, maslov@itam.nsc.ru

Рассматриваются схема и технологические процессы обеспечения экспериментов в высокоэнтальпийной установке кратковременного действия — гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубе. Исследуется работа трубы с поддержанием постоянных в течение рабочего режима параметров рабочего тела и в режиме классической импульсной трубы с падающими параметрами при истечении рабочего тела из форкамеры постоянного объема. Стабилизация параметров осуществляется за счет мультипликатора давления, расположенного по одной оси с форкамерой, — линейная схема расположения форкамеры и мультипликатора. Применена разгрузка динамической составляющей мультипликатора с помощью компенсатора с поршнем, движущимся противоположно поршневой системе мультипликатора. Предусмотрена многовариантность режимов работы, осуществляемая комбинированием в различных сочетаниях нагрева рабочего тела за счет электрической дуги, химической энергии, адиабатического сжатия и нагрева во внешнем по отношению к форкамере источнике тепла. Рассмотрена принципиальная схема устройства задержки вскрытия диафрагмы. Конструкция и размеры аэродинамической трубы рассчитаны на работу установки при параметрах: числа Маха  $M = 4-20$ , температура в форкамере  $T_{\phi 1} = 600-4000$  К, давление в форкамере  $p_{\phi 1}$  до 200 МПа (при работе с двойной форкамерой давление торможения  $p_{0н} = p_{\phi 2}$  может меняться от 1 до 200 МПа). Объем форкамеры (80–100 дм<sup>3</sup>) позволяет организовывать в рабочей части гиперзвуковой поток диаметром 1 м при времени режима ~ 100 мс (в сочетании со второй форкамерой).

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

При исследованиях в наземных установках гиперзвуковых течений прежде всего ставится задача обеспечить максимально точное моделирование и воспроизводство реальных условий, сопровождающих натурный полет гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА), в том числе и натурную работу высокоскоростных воздушно-реактивных двигателей (ВРД).

Наиболее полное моделирование с учетом внешней и внутренней газотермодинамики имеет место в экспериментах, выполняемых в высокоэнтальпийных установках кратковременного режима [1]. Именно этот факт определяет широкое применение высокоэнтальпийных установок кратковременного режима для исследований разнообразных аэротермодинамических задач, связанных со сверх- и гиперзвуковыми потоками газа.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00435-а) и программы Президиума РАН (№ 25/12).

Анализ основных типов таких установок, перечень задач, исследования которых обеспечиваются параметрами установок, подробно содержатся в обзорах, выполненных в последнее время [1–5]. Не повторяя выводов этих работ, отметим два актуальных момента, связанных с высокоэнтальпийными установками кратковременного рабочего режима, особенно при исследовании задач, относящихся к высокоскоростным ВРД: 1) обеспечение постоянных в течение рабочего режима параметров рабочего тела (РТ) в форкамере и рабочей части (стабилизация параметров); 2) вопросы энергетики установки.

Цель настоящей работы — разработка высокоэнтальпийной установки кратковременного режима, являющейся естественным развитием гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы (АДТ) ИТ-302М ИТПМ СО РАН [6] в части десятикратного увеличения объема форкамеры. При этом основное внимание уделено проблеме надежной стабилизации параметров РТ [7] и увеличению диапазона реализуемых параметров гиперзвукового потока за счет использования различных источников энергии [8, 9] для нагрева РТ.

Основные причины, вызывающие необходимость увеличения объемов форкамеры (и, следовательно, всех размеров установки), связаны с растущими потребностями в экспериментальных исследованиях основных проблемных вопросов гиперзвуковых технологий для летательных аппаратов. Такими вопросами являются: 1) течения РТ в высокоскоростных ВРД; 2) ламинарно-турбулентный переход в пограничных слоях и эволюция течения в пристенных областях как на внешних поверхностях летательных аппаратов, так и в тракте ВРД; 3) тепловые потоки от РТ к элементам конструкции. Заметим при этом, что по низкой стоимости проводимых исследований импульсные трубы стоят вне конкуренции с другими типами наземных установок.

### Схема и принцип действия АДТ

На рис. 1 приведена схема рассматриваемой высокоэнтальпийной установки кратковременного режима — гиперзвуковой импульсной АДТ [10]. Функционально АДТ состоит из двух основных систем: газодинамического тракта установки с источником высокоэнтальпийного газового потока и системы стабилизации в течение рабочего режима параметров РТ. Система стабилизации расположена в левой части рис. 1 и будет рассматриваться в следующих разделах.

Газодинамический тракт состоит, в свою очередь, из нескольких подсистем и начинается справа от фланца 18 (рис. 1), который условно можно считать границей, разделяющей систему стабилизации от газодинамического тракта установки. К фланцу 18 подсоединяется форкамера 19, являющаяся генератором высокоэнтальпийного РТ. В форкамере расположены коаксиальные электроды 21 для разряда конденсаторной батареи С. На выходе из форкамеры 19 устанавливается диафрагма 33, отделяющая форкамеру от остального газодинамического тракта установки. Предусматривается вскрытие диафрагмы двумя способами: за счет потери прочности при росте давления в форкамере 19 и принудительное вскрытие с помощью устройства 30. Эти способы будут обсуждаться ниже в разделе “Управляемая диафрагма”.

Установка может работать в комплектации с одной форкамерой. В этом случае к форкамере 19 непосредственно за диафрагмой 33 подсоединяется сопло 32. Далее за соплом 32 следуют рабочая часть и вакуумная система, откачиваемая до давления в несколько Па (этот фрагмент на рис. 1 не отображен).

С целью увеличения времени рабочего режима и расширения области моделируемых параметров предусматривается работа установки с двухсекционной (двойной) форкамерой. В этом случае за диафрагмой 33 устанавливается, как показано на рис. 1, вторая форкамера 31, к которой и подсоединяется сопло 32. За счет давления  $p_{\phi 1}$  в первой форкамере 19, большего, чем требуемое в опыте давление торможения РТ  $p_{0н} = p_{\phi 2}$ , площадь отверстия, через которое РТ истекает из первой форкамеры, можно уменьшить

по сравнению с площадью  $F_{кр}$  критического сечения сопла:  $F_{1-2} = F_{кр} p_{\phi 2} / p_{\phi 1}$ . Здесь  $p_{0н}$  — давление торможения потока в рабочей части,  $p_{\phi 1}$  — давление в первой форкамере,  $p_{\phi 2}$  — давление во второй форкамере,  $F_{1-2}$  — площадь отверстия в дросселирующей решетке (на рис. 1 не показана), устанавливаемой между форкамерами в комплектации установки с двумя форкамерами. Примерно в отношении  $F_{кр} / F_{1-2}$  увеличивается время рабочего режима — в этом заключается смысл работы установки с двойной форкамерой [11].

Предусматривается возможность работы установки при нагреве РТ во внешнем подогревателе, принцип действия которого может быть различным: от кауперного нагревателя до адиабатического сжатия. На рис. 1 подсистема внешнего подогрева с быстродействующим клапаном обозначена позицией 26. К форкамере 19 эта подсистема подсоединяется с помощью стыковочного узла 25 с обратным клапаном.

В принципе величина фиксированного объема форкамеры 19 (полость Б) может выбираться в широких пределах, исходя из согласования величины энергии, которую можно выделить в форкамере 19, и величин параметров торможения и времени режима, которые необходимо реализовывать в конкретных опытах. Изменение объема форкамеры 19 осуществляется либо за счет сменной левой части корпуса 5 мультипликатора (при этом изменяется и длина гидравлического канала 11), либо за счет установки в левую часть корпуса 5 кольцевой проставки.

Наряду со стабилизацией параметров РТ, установка может работать в режиме классической импульсной трубы с падающими в течение режима параметрами РТ (истечение из форкамеры 19 постоянного объема). При работе в этом режиме мультипликатор в работу не включается.

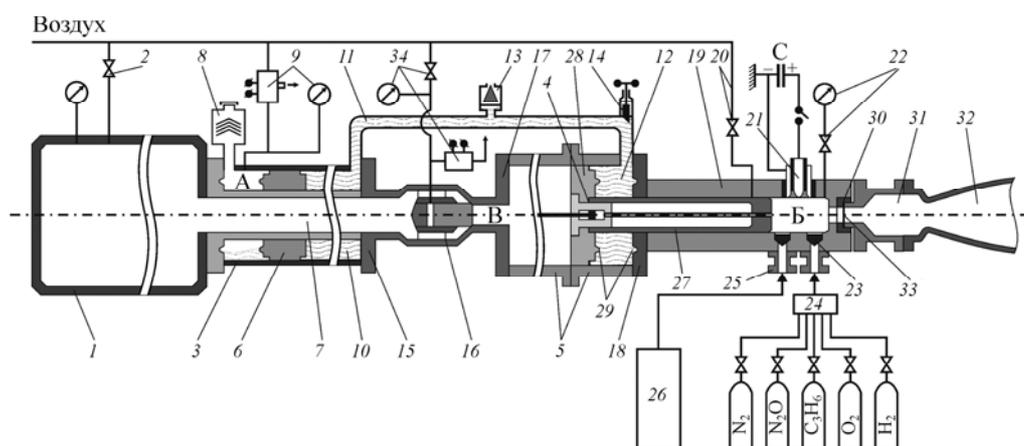


Рис. 1. Схема импульсной АДТ с линейным расположением ФК и мультипликатора.

1 — ресивер с толкающим воздухом, 2 — пневмотрасса для заполнения ресивера, 3 — корпус компенсатора динамической составляющей движения поршневой системы мультипликатора, 4 — двухступенчатая поршневая система мультипликатора, 5 — корпус мультипликатора, 6 — коаксиальный поршень компенсатора, 7 — канал подвода воздуха из ресивера к полости В мультипликатора, 8 — емкость с крышкой для сброса из полости А тормозной жидкости и избыточного давления воздуха, 9 — пневмотрасса с электромагнитным пневмоклапаном двойного действия, 10 — надпоршневая полость компенсатора, 11 — гидроканал для протока жидкости, 12 — подпоршневая полость мультипликатора, 13 — дренированная емкость с обратным клапаном, 14 — вентиль расхода жидкости, 15 — фланец, 16 — быстродействующий пневмоклапан, 17 — фланец, 18 — фланец, 19 — корпус форкамеры, 20 — пневмотрасса для заполнения форкамеры сжатым воздухом, 21 — коаксиальные электроды в форкамере для разряда конденсаторной батареи С, 22 — трасса для контроля давления в форкамере при наполнении, 23 — обратный клапан для заправки форкамеры реагирующими газами, 24 — стыковочный блок, 25 — стыковочный узел для подсоединения импульсного адиабатического источника высокотемпературного газа, 26 — импульсный адиабатический источник высокотемпературного газа, 27 — плунжер форкамеры Б, 28 — поршень мультипликатора, 29 — лабиринтное уплотнение, 30 — управляемая диафрагма (см. рис. 4), 31 — вторая форкамера, 32 — сопло, 33 — диафрагменный узел, 34 — пневмотрасса с манометром, вентилем и электромагнитным клапаном для работы системы запуска мультипликатора.

При работе установки с использованием в качестве РТ воздуха форкамера 19 наполняется им через пневмотрассу 20 из магистрали сжатого воздуха.

При использовании в качестве РТ азота, углекислого газа, добавок к РТ горючих газов водорода, пропана  $C_3H_8$ , метана  $CH_4$ , закиси азота  $N_2O$  и других газов, хранящихся в стандартных баллонах, а также их смесей в различных пропорциях форкамера 19 наполняется через стыковочный узел с обратным клапаном 23 с использованием подсистемы 24. После заполнения форкамеры газами предусматривается, что подсистема 24 отводится от форкамеры, разрывая механическую связь 24 с форкамерой 19 с целью исключения несанкционированного прорыва высокоэнтальпийного РТ из форкамеры 19 в подсистему 24.

Конструкция и размеры АДТ рассчитываются на работу установки при следующих параметрах: числа Маха  $M = 4-20$ , температура в форкамере  $T_{\phi 1} = 600-4000$  К, давление в первой форкамере  $p_{\phi 1}$  до 200 МПа (при работе с двойной форкамерой давление торможения  $p_{0н} = p_{\phi 2}$  может меняться от 1 до 200 МПа). Объем форкамеры 19 (до  $80-100$  дм<sup>3</sup>) позволяет организовывать в рабочей части гиперзвуковой поток диаметром 1 м при времени режима  $\sim 100$  мс (в сочетании со второй форкамерой). При использовании сопел умеренного размера с диаметром среза  $d_c = 0,2-0,3$  м время режима может быть увеличено до одной секунды.

### Стабилизация параметров

Наиболее просто и надежно стабилизация параметров РТ в течение режима обеспечивается за счет мультипликатора давления [1, 7]. Рис. 2 характеризует на примере АДТ ИТ-302М возможности мультипликатора по стабилизации параметров.

На рис. 2, а приведена запись давления  $p_{\phi 1}(t)$  в первой форкамере при работе установки с двойной форкамерой с  $V_{\phi 1} = 9,6$  дм<sup>3</sup>,  $V_{\phi 2} = 12$  дм<sup>3</sup>, площадью дросселирующих отверстий между форкамерами  $F_{1-2} = 0,79$  см<sup>2</sup> и критическим диаметром сопла  $d_{кр} = 130$  мм. Кривая 1 характеризует падение давления в первой форкамере при работе установки без мультипликатора. Кривая 2 — работа при стабилизации параметров, когда давление  $p_{\phi 1}$ , давление перед большим поршнем мультипликатора и площадь  $S_{ж}$  проходного сечения демпфирующей жидкости в регуляторе расхода жидкости (аналогично поз. 14 на рис. 1) подобраны так, чтобы выдерживать  $p_{\phi 1}(t) \approx \text{const}$  в течение режима 150 мс. Кривая 3 характеризует возможности мультипликатора по адиабатическому дожатию РТ в форкамере и соответствует опыту, когда давление перед большим поршнем мультипликатора выше, чем требуется для поддержания  $p_{\phi 1}(t) = \text{const}$ , а  $S_{ж}$  увеличено так, что обеспечивает большую скорость поршневой системы по сравнению со скоростью для случая  $p_{\phi 1}(t) = \text{const}$ .

На рис. 2, б приведены результаты опыта при достаточно тяжелом для импульсных АДТ режиме по воспроизводству условий полета ЛА с  $M = 5$  на уровне земли. Установка работала с мультипликатором с одинарной форкамерой  $V_{\phi} = 10$  дм<sup>3</sup> и  $d_{кр} = 10$  мм. Здесь  $p_{\phi} = p_{0н}$ ,  $T_{\phi} = T_{0н}$  — параметры в форкамере, равные давлению и температуре торможения в рабочей части,  $p_n$ ,  $T_n$ ,  $W_n$ ,  $Re_1$  — соответственно статические давление и температура, скорость, единичное число Рейнольдса в рабочей части.

Из рис. 2 видно, что мультипликатор давления надежно обеспечивает поддержание постоянных параметров РТ в течение режима и справляется с задачей (в случае необходимости) адиабатического дожатия РТ.

При работе мультипликатора установки ИТ-302М отсутствие в течение режима падения давления  $p_{\phi}$  (обычно применялась точность поддержания постоянного давления в пределах 1–5 %) зависит в основном от двух факторов: от объема ресивера  $V_p$  толкающего газа и, главным образом, от величины  $S_{ж}$ , определяющей скорость движения поршневой

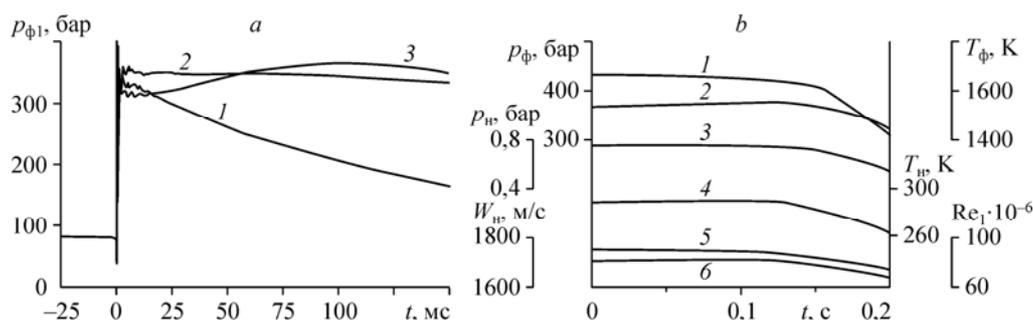


Рис. 2. Параметры рабочего тела установки в зависимости от времени режима.

*a* — давление  $p_{\phi 1}$  в первой форкамере, регистрируемое измерительной системой: без мультипликатора (1), с мультипликатором (2, 3); *b* — параметры РТ в форкамере (1 —  $p_{\phi}$ , 2 —  $T_{\phi}$ ) и на срезе сопла (3–6) при воспроизводстве с мультипликатором параметров полета с  $M = 5$  на уровне земли; 3 —  $p_{н}$ , 4 —  $T_{н}$ , 5 —  $W_{н}$ , 6 —  $Re_1$ .

системы и связанной функциональной зависимостью с  $F_{1-2}$  при работе АДТ с двойной форкамерой или с  $d_{кр}$  при работе АДТ с одинарной форкамерой. В пределе, если  $S_{ж} = 0$ , поршневая система не сдвинется с места, каким бы ни было давление толкающего газа. Другое предельное значение  $S_{ж \max}$  связано с тем, что критическое сечение на выходе из форкамеры ( $F_{1-2}$  или  $d_{кр}$ ) настолько большое, что расход воздуха из ресивера не успевает наполнять надпоршневое пространство большого поршня мультипликатора. В этом режиме мультипликатор не способен поддерживать  $p_{\phi} = \text{const}$ , а лишь уменьшает темп падения  $p_{\phi}$  в течение режима.

При проведении опытов в ИТ-302М  $S_{ж}$  задается следующим образом. Давление толкающего воздуха в ресивере выбирается на  $\sim 30\%$  больше величины  $p_{\phi}/7,44$ . Здесь 7,44 отношение площадей большого и малого поршней мультипликатора,  $p_{\phi}$  — ожидаемое давление в ФК. Затем по результатам двух–трех опытов выбирается величина  $S_{ж}$  из диапазона  $0-S_{ж \max}$ , обеспечивающая  $p_{\phi} \approx \text{const}$  с задаваемой точностью.

Для ИТ-302М с  $V_{\phi} = 9,6 \text{ дм}^3$  объем надпоршневого пространства мультипликатора составляет  $70 \text{ дм}^3$ , объем ресивера  $V_p = 410 \text{ дм}^3$ , т. е. отношение  $V_p/V_{\phi} = 410/9,6 = 43$ . При анализе установки с увеличенными объемами форкамеры именно эта величина ( $V_p/V_{\phi} = 43$ ) использовалась для оценки необходимого объема  $V_p$ . То есть, исходя из опыта работы ИТ-302М с мультипликатором,  $V_p$  для форкамеры с  $V_{\phi} = 80-100 \text{ дм}^3$  должен быть не менее  $4 \text{ м}^3$ , что предопределило применение в качестве ресивера одной батареи из двенадцати стандартных баллонов емкостью  $410 \text{ дм}^3$  с разрешенным давлением до 20 МПа (общий объем  $V_p \sim 5 \text{ м}^3$ ).

Требование стабилизации (или, как компромисс, существенного уменьшения темпа падения параметров РТ в течение режима) возникает в следующих случаях.

1. При исследовании моделей с горением желательнее выдерживать коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  постоянным в течение режима. При работе модели на газообразном горючем (водород, пропан, метан, ...)  $\alpha = \text{const}$  может быть выдержано и без стабилизации параметров РТ установки путем подбора темпов падения расходов через модель воздуха и газообразного горючего за счет согласования  $V_6 = \text{const}$  с  $V_{\phi 1}$  и  $p_6(t)$  с  $p_{\phi 1}(t) = \text{var}$ . Здесь  $V_6$  и  $p_6(t)$  — объем и давление в баллоне газообразного горючего. Но при испытаниях на жидком и особенно на твердом горючем выдерживать  $\alpha = \text{const}$  при отсутствии стабилизации параметров РТ установки практически невозможно. Скорости химических реакций и закон тепловыделения в модели зависят от величин  $p$ ,  $T$ ,  $\alpha$ . Когда эти величины одновременно являются переменными, проводить надежный количественный анализ результатов экспериментов затруднительно — приходится ограничиваться качественными характеристиками.

2. При весовых испытаниях тяжелых (массой больше нескольких килограммов) моделей. В случае наличия ударного воздействия в нулевой момент режима частота свободных колебаний, возникающих от ударного нагружения модели газодинамическими силами, обратно пропорциональна корню квадратному из массы модели. При переменных  $p$ ,  $T$ ,  $\alpha$  на свободные колебания накладываются нестационарные газодинамические силы. Отфильтровать эти частоты (во всяком случае, с приемлемой точностью) мало реально [11, 12], что резко снижает информативность весовых экспериментов при больших массах моделей.

3. Когда характерные времена исследуемых процессов больше или соизмеримы с темпами падения параметров РТ в установке.

4. Определение параметров в рабочей части импульсных АДТ выполняется при допущении квазистационарности течения РТ по всему газодинамическому тракту установки: считается, что параметры в любой момент режима  $t$  в форкамере и в рабочей части связаны стационарными газотермодинамическими соотношениями. При диаметре среза сопла  $d_c = 0,2-0,3$  м (в установке ИТ-302М длина от первой форкамеры до среза профилированного сопла 1,5–2 м) время движения РТ для чисел Маха  $M = 4-8$  от форкамеры до среза сопла 2–3 мс. При умеренном темпе падения параметров РТ в течение режима неучет зависимости параметров в рабочей части от времени движения РТ по газодинамическому тракту от форкамеры до среза сопла составляет небольшую часть в общей погрешности определения параметров РТ. При увеличении  $d_c$  до  $\sim 1$  м (при  $V_{\text{ф1}} = 80-100$  дм<sup>3</sup>) время движения РТ от форкамеры до среза сопла достигнет  $\sim 10$  мс, что потребует либо стабилизации параметров, либо существенного уменьшения темпа падения параметров, то есть работы мультипликатора.

В настоящей схеме импульсной АДТ система стабилизации параметров включает (рис. 1): ресивер 1 со сжатым воздухом давлением от нескольких МПа до 20 МПа для работы мультипликатора, компенсатор 3 динамической составляющей движения поршневой системы 4, мультипликатор с корпусом 5 и поршневой системой 4. Поршневая система 4 включает в себя большой поршень 28, движущейся в корпусе 5, малый поршень 27, движущийся в ФК 19, и часть системы запуска мультипликатора, позиции 36–38 на рис. 3.

При работе мультипликатора возникают две проблемы.

1. Колебательный процесс при движении поршневой системы 4 мультипликатора. В работе [7] эта проблема решена путем масляного демпфирования со стороны подпоршневого пространства большого поршня: как видно из сравнения на рис. 2 кривых 2 и 3 (опыты с мультипликатором) с кривой 1 (опыт без мультипликатора), колебательные

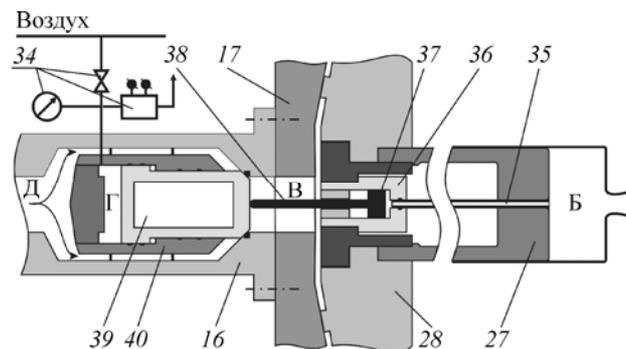


Рис. 3. Быстродействующий клапан системы запуска мультипликатора.

16 — корпус пневмомеханического клапана, 17 — крышка корпуса мультипликатора давления, 27 — плунжер форкамеры Б, 28 — поршень мультипликатора, 34 — система управления клапаном, 35 — канал подвода давления в надпоршневое пространство поршня со штоком 37, 37 — поршень со штоком, 38 — шток, 39 — поршень, открывающий и закрывающий канал В, 40 — коаксиально расположенный корпус поршня 39.

процессы давления в форкамере в первые 10–15 мс на этих кривых ничем не отличаются друг от друга. Эти колебания давления на кривых 1–3 вызваны реакцией системы изменения давления на 5-кратное (с 7 до 35 МПа), практически мгновенное повышение давления (длительность разряда конденсаторной батареи, а, следовательно, длительность повышения давления в изохорном процессе подвода тепла составляет 0,5–0,8 мс). Аналогичная система демпфирования применена и в настоящей схеме АДТ.

Для оценки влияния размеров установки на величину и характер колебательных процессов при старте мультипликатора со ступенчатым изменением давления толкающего газа перед большим поршнем мультипликатора был проведен анализ переходных процессов при наличии и при отсутствии демпфирования. Оценка выполнялась путем исследования уравнения, описывающего движение поршневой системы массой 1300 кг для форкамеры объемом 50 дм<sup>3</sup> с давлением толкающего газа 16 МПа и постоянным давлением  $p_{\phi} = 100$  МПа. Расчет динамики поршневой системы был выполнен для варианта, когда отсутствует компенсатор динамической составляющей при старте.

Без демпфирующей жидкости на равномерное движение поршневой системы накладывается колебательный процесс, длящийся в течение всего режима с частотой в несколько десятков Гц. Соответственно колеблется давление газа в форкамере. Причем амплитуда колебаний давления в форкамере достигает 10–15 % от среднего давления  $p_{\phi} = 100$  МПа, увеличиваясь к концу режима, что вызвано уменьшением с течением режима массы остающегося в форкамере газа.

При наличии демпфирующей жидкости переходный процесс движения поршневой системы, вызванный ступенчатым приложением давления толкающего газа, завершается в момент времени, близкий к 15 мс. При этом давление  $p_{\phi}$  выходит на полку в 100 МПа, оставаясь примерно постоянным до конца режима.

То есть результаты теоретического анализа показали, что применение масляного демпфирования поршневой системы со стороны подпоршневого пространства мультипликатора позволяет полностью решить проблему колебательного процесса (как это имеет место в ИТ-302М для форкамеры с  $V_{\phi} = 9,6$  дм<sup>3</sup>) и при увеличении в пять раз объема форкамеры и массы поршневой системы.

2. Ударное воздействие при запуске и остановке мультипликатора на всю конструкцию установки. В ИТ-302М с  $V_{\phi 1} = 9-10$  дм<sup>3</sup> сила, возникающая при запуске установки через жестко связанные форкамеру, сопло, рабочую часть, воспринимается фундаментом установки. Однако при увеличении размеров форкамеры (и, следовательно, массы и размеров мультипликатора) требуются мероприятия для уменьшения реактивных и инерционных сил. В работах [13, 14] эта проблема решается распределением функций мультипликатора на две части с оппозитным, симметричным расположением частей относительно форкамеры. В настоящей конструкции с линейным расположением форкамеры и мультипликатора применена разгрузка за счет компенсатора 3 (рис. 1).

Компенсатор 3 состоит из коаксиального поршня 6, сквозного цилиндрического канала 7, емкости 8 с крышкой для слива из полости А избыточной жидкости, используемой для торможения поршня 6, пневмотрассы 9 с манометром и электромагнитным клапаном двойного действия. Подпоршневое пространство 10 с демпфирующей жидкостью соединено гидравлическим каналом 11 с подпоршневым пространством 12 мультипликатора 5. В верхней точке гидравлического канала 11 расположен дренированный объем 13 с обратным клапаном (для выхода газовых пузырьков из демпфирующей жидкости при ее вакуумировании для исключения в ней газовых полостей). Канал 11 имеет вентиль 14 для изменения площади проходного сечения канала с целью регулирования скорости движения поршневой системы 4.

Компенсатор 3 динамической составляющей мультипликатора через фланец 15 соединяется с быстродействующим клапаном запуска системы стабилизации 16. Быстродействующий клапан 16 с другой стороны присоединен через фланец 17 с каналом В к корпусу 5 мультипликатора.

Исключение удара поршневой системы 4 о фланец 18 происходит, как и в ИТ-302М, с помощью гидравлического торможения на заключительном этапе хода поршневой системы за счет повышения давления в лабиринтном уплотнении 29, находящимся на торцевых поверхностях большого поршня 28 и фланца 18. При этом по расчетам динамики движения поршня процесс торможения составляет 10–20 мс, а амплитуда толчка торможения на порядок меньше стартовой реактивной силы при ступенчатом нагружении мультипликатора.

Для возможного изменения объема Б форкамеры 19 (см. предыдущий раздел “Схема и принцип действия АДТ”) корпус 5 мультипликатора выполнен разъемным и состоит из двух частей, которые соединены между собой быстроразъемным соединением.

Поршневая система 4 в предстартовом состоянии находится в крайнем левом положении и может взаимодействовать с быстродействующим клапаном 16 запуска мультипликатора.

### Запуск мультипликатора

Система запуска мультипликатора приведена на рис. 3. Нумерация позиций на рис. 1, 3 и 4 сквозная. Назначение системы запуска — обеспечить быстрое открытие пневмоклапана 16 (2–5 мс). Кроме того, важной функцией этой системы является предотвращение включения в работу мультипликатора при отсутствии электродугового разряда в форкамере (отсутствие роста давления) либо при незавершенности химической реакции (давление в форкамере не повысилось до определенного уровня). Система состоит из канала высокого давления 35, один конец которого неподвижно закреплен на торце поршня 27 и сообщается с полостью Б, а второй конец подвижно входит в пневмоцилиндр высокого давления 36, где расположен поршень 37 со штоком 38. Шток 38 в предстартовом состоянии трубы через отверстие В большого сечения во фланце 17 корпуса мультипликатора 5 соприкасается (или находится вблизи) с поршнем 39 быстродействующего клапана 16. Поршень 39 размещен в цилиндре 40, жестко связанном с корпусом клапана 16 с помощью пилонов и образующем кольцевой канал Д между собой и корпусом клапана 16. Через кольцевой канал Д толкающий газ из ресивера 1 по сквозному цилиндрическому каналу 7 подводится в надпоршневое пространство мультипликатора. В цилиндре 40 имеется полость Г, к которой подсоединена пневмотрасса 34 с манометром, вентилем и электромагнитным клапаном.

Запуск мультипликатора (рис. 1 и 3) осуществляется следующим образом.

Полость Г быстродействующего клапана запуска системы стабилизации 16 заполняется сжатым воздухом, при этом поршень 39 смещается вправо и закрывает канал В во фланце 17. Ресивер 1 через вентиль 2 заполняется воздухом до рабочего давления, одновременно заполняется и сквозной цилиндрический канал 7 вплоть до канала В. Крышка емкости 8 закрывается и в полость А подается небольшое избыточное давление из пневмотрассы 9 с помощью электромагнитного клапана двойного действия (при отсутствии напряжения на клапане происходит сброс давления из полости А в атмосферу, при наличии напряжения сброс давления прекращается, происходит наполнение полости А сжатым воздухом). При этом поршень 6 смещается вправо, вытесняя жидкость из полости 10 через гидравлический канал 11 в подпоршневое пространство 12 мультипликатора. При прохождении жидкости через канал 11 обратный клапан дренированного объема 13 автоматически закрывается. Под воздействием давления жидкости поршневая система 4 мультипликатора смещается влево до крайнего положения. Крышка емкости 8 открывается.

При достижении расчетного давления в полости Б (за счет нагрева РТ каким-либо способом: электрической дугой, химической энергией и т. д.), сила, действующая на поршень 37 со штоком 38, превысит запирающее усилие, действующее на поршень 39 клапана 16 запуска системы стабилизации со стороны полости Г (давление запираения

выбирается перед опытом, исходя из соотношения площадей поршней 37 и 39 и давления в форкамере). Поршень 39 отойдет влево и приоткроет кольцевой канал Д, ширина которого определяется величиной хода поршня 37. При этом толкающий газ через канал В во фланце 17 поступает в надпоршневое пространство мультипликатора. Под воздействием давления толкающего газа поршень 39 отходит в крайнее левое положение и полностью открывает отверстие В во фланце 17. Мультипликатор давления готов к работе.

Если в опыте предполагается адиабатическое сжатие, то поршневая система 4, двигаясь вправо, начинает сжимать РТ в форкамере 19 до требуемых параметров, при достижении которых происходит (после вскрытия диафрагмы 33) вытеснение РТ из форкамеры 19 с постоянной скоростью. Если адиабатического сжатия не требуется, то движение поршневой системы 4 начинается после вскрытия диафрагмы 33 и сопровождается вытеснением РТ из форкамеры 19. Величина постоянной скорости поршневой системы 4 мультипликатора при вытеснении РТ из форкамеры выбирается исходя из расхода РТ и задается расходом демпфирующей жидкости через гидравлический канал 11 вентилем 14 перед опытом.

Одновременно со стартом поршневой системы 4 под воздействием демпфирующей жидкости стартует коаксиальный поршень 6 системы 3 компенсации динамической составляющей, который движется в обратную сторону. Масса коаксиального поршня 6 при настройке системы компенсации подбирается таким образом, чтобы минимизировать отдачу на корпус АДТ в момент старта поршневой системы 4. При отсутствии системы компенсации величина отдачи может достигать нескольких сотен кН.

Торможение коаксиального поршня 6 происходит на начальном этапе небольшим повышением давления в полости А (крышка емкости 8 открыта), а на конечном этапе движения поршня 6 с помощью жидкости, проходящей через лабиринтные уплотнения (аналогичные уплотнениям 29 в мультипликаторе) на коаксиальном поршне 6 и фланце. При этом демпфирующая жидкость из полости 12 перетекает в дренированную емкость 13.

### Управляемая диафрагма

В большинстве импульсных АДТ вскрытие диафрагмы осуществляется автоматически за счет потери прочности при многократном росте давления в форкамере [11, 12]. При использовании для нагрева РТ химической энергии необходима задержка вскрытия диафрагмы с тем, чтобы реакции в форкамере завершились полностью. Кроме того, задержка может использоваться и в вариантах работы установки без химической энергии с целью повышения точности результатов исключением из времени режима переходных процессов. Поэтому в настоящей установке предусматривается вскрытие диафрагмы двумя способами: за счет естественной потери прочности при росте давления в форкамере и принудительное вскрытие при поступлении сигнала от электронного блока управления, обеспечивающее заранее выставленную задержку от начала вклада энергии в форкамеру (управляемая диафрагма).

На рис. 4 схематично изображено устройство 30 принудительного вскрытия диафрагмы 33 (см. также рис. 1). Устройство содержит корпус с поршнями 41 и 42, расположенными по его торцам, и жидкость 46 между ними. Поршень 41, обращенный к диафрагме 33, оснащен ножом 43 и приводится в движение поршнем 42, на который воздействует давление, возникающее при инициировании подрывного устройства 44. Нож 43 имеет квадратное сечение с тремя режущими кромками, четвертая кромка заглублена внутрь ножа и не участвует во вскрытии диафрагмы.

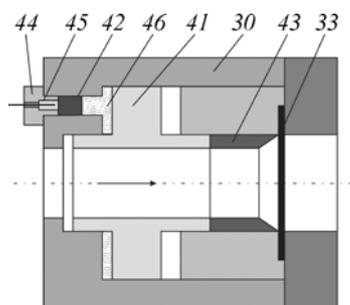


Рис. 4. Схема управляемой диафрагмы.

30 — корпус управляемой диафрагмы, 33 — диафрагма, 41 — поршень с цилиндрическим каналом для протока газа, 42 — поршень пиропатрона, 43 — кольцевой нож, 44 — пиропатрон, 45 — пороховой заряд, 46 — полость, заполненная маслом.

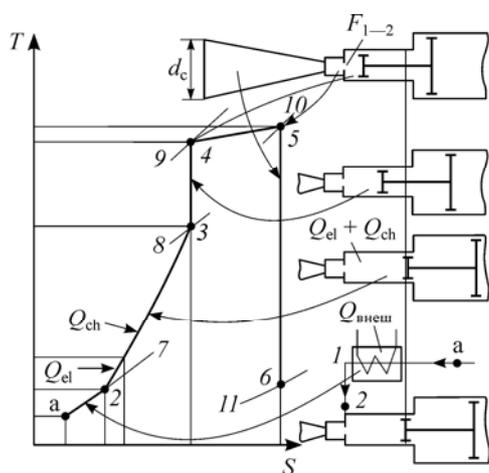
При подаче электрического импульса на устройство 44 происходит подрыв порохового заряда 45. Давление между поршнем 42 и устройством 44 резко возрастает и через поршень 42 передается на жидкость между поршнями. Под воздействием давления в жидкости подвижный поршень 41 вместе с ножом 43 смещаются вправо. Нож тремя режущими кромками надрезает по периметру диафрагму 33, которая под воздействием давления в форкамере вскрывается и отгибается по потоку вдоль четвертой кромки. Материал и толщина диафрагмы подбираются такими, чтобы выдержать ожидаемое давление в форкамере 19.

Система управляемого вскрытия диафрагмы отработана в составе АДТ ИТ-302М и обеспечивает задержку вскрытия от момента электродугового разряда (служащего либо для нагрева РТ в форкамере, либо для инициирования в форкамере химической реакции сгорания  $H_2$ ,  $C_3H_8$  или разложения  $N_2O$ ) в диапазоне от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Быстродействие системы (время от подачи электрического импульса на устройство 44 до вскрытия диафрагмы) не более 1 мс.

### Нагрев РТ

В высокоэнтальпийных установках кратковременного режима с временем режима меньше 1 с, как правило, используется нагрев РТ каким-либо одним источником энергии. В большинстве классических импульсных труб используется нагрев РТ электрической дугой [11, 12], образующейся в форкамере установки за счет разряда конденсаторной батареи или импульсного генератора. Использование химической энергии за счет эндотермических реакций разложения ( $N_2O$ ) или сжигания горючих ( $H_2$ ,  $C_3H_8$ ,  $CH_4$ ) позволяет применять форкамеру больших объемов, поскольку вклад химической энергии определяется только массой реагирующего компонента, вводимого в форкамеру пропорционально ее объему, и не накладывает ограничений на объем форкамеры.

Особенностью настоящей установки является возможность использования различных способов нагрева РТ за счет электрической дуги, химической энергии [9], адиабатического сжатия [1], нагрева во внешнем по отношению к форкамере источнике тепла [1] и сочетания перечисленных способов в различной их комбинации. По отдельности все способы получения и нагрева РТ успешно эксплуатируются в различных высокоэнтальпийных установках кратковременного режима. Отдельные комбинации способов нагрева и конструкции узлов опробованы в гиперзвуковых импульсных трубах ИТ-302М и АТ-303 ИТПМ СО РАН. На рис. 5 приведена  $T$ - $s$  диаграмма (температура-удельная энтропия) варианта работы установки, позволяющего получать максимальную энтальпию РТ [8] при комбинировании указанных способов нагрева (в компоновке с двумя форкамерами и стабилизацией параметров в течение режима).



Смесь исходных веществ проходит через внешний подогреватель 1, нагреваясь от температуры  $T_a \approx 290$  К до температуры  $T_{\phi 1}$ , с которой исходные вещества вводятся в первую форкамеру установки — процесс а-2 с подводом количества тепла  $Q_{\text{внеш}}$  в процессе  $p = \text{const}$  по изобаре 7. Если внешний нагрев отсутствует, то  $T_{\phi 1} = T_a$ . В изохорном процессе 2–3 к исходной смеси в первой форкамере подводится тепло  $Q_{\text{el}}$

Рис. 5. Последовательность процессов в установке при комбинировании различных способов нагрева РТ.

за счет электрического разряда и  $Q_{ch}$  — за счет экзотермических химических реакций. Если после изохорного процесса давление в первой форкамере в промежуточной точке 3 (изобара 8) меньше необходимого, то РТ дожимается до необходимого давления (изобара 9) в адиабатическом процессе 3–4. После достижения в точке 4 необходимого давления вскрывается диафрагма, отделяющая первую форкамеру от второй форкамеры. РТ начинает дросселироваться между форкамерами через дросселирующую решетку с площадью отверстий  $F_{1-2}$  (изоэнтальпийный процесс 4–5) и истекает через сопло (изоэнтропический процесс 5–6), образуя на срезе сопла поток с параметрами в точке 6.

Точка 4 характеризует в течение всего режима параметры в первой форкамере в процессе вытеснения из нее РТ мультипликатором давления, пока поршневая система мультипликатора не дошла до крайнего (левого на рис. 5) положения. Точка 5 — параметры в течение режима во второй форкамере после дросселирования РТ из первой форкамеры с выдерживанием значений энтальпий  $i_{\phi 1} = i_{\phi 2} = i_{0н}$ . Линии 7–11 — изобары в соответствующих точках процесса. Общий подвод энергии в первой форкамере к РТ равен  $Q_{внеш} + Q_{el} + Q_{ch}$  + работа адиабатического сжатия в процессе 3–4.

На рис. 5 приведена термодинамическая схема использования одновременно всех способов нагрева. Могут быть и другие комбинации отдельных способов нагрева, что обеспечивает многовариантность рабочих режимов импульсной АДТ предлагаемой схемы.

Особенности реализации технологических процессов для некоторых наиболее характерных рабочих режимов (таких как: работа АДТ в режиме адиабатического сжатия РТ, работа АДТ при нагреве РТ только электрической дугой, работа АДТ в режиме электрическая дуга + химическая энергия, работа АДТ в режиме электрическая дуга + химическая энергия + адиабатическое сжатие РТ) подробно изложены в работе [10].

### Выводы

Разработана схема высокоэнтальпийной установки кратковременного действия — импульсной АДТ — с многовариантными режимами работы, обеспечивающая параметры РТ в диапазоне  $M = 4-20$ ,  $T_{\phi 1} = 600-4000$  К,  $p_{\phi 1}$  до 200 МПа (при работе с двойной форкамерой давление торможения  $p_{0н} = p_{\phi 2}$  может меняться от 1 до 200 МПа). Объем форкамеры ( $80-100$  дм<sup>3</sup>) позволяет организовывать в рабочей части гиперзвуковой поток диаметром 1 м при времени режима  $\sim 100$  мс (в сочетании со второй форкамерой). При использовании сопел умеренного размера с диаметром среза  $d_c = 0,2-0,3$  м время режима может быть увеличено до одной секунды.

Особенностями установки являются:

- система стабилизации параметров РТ в течение режима с помощью мультипликатора давления (расположенного по одной оси с форкамерой — линейное расположение форкамеры и мультипликатора),
- разгрузка от динамической составляющей мультипликатора за счет компенсатора с поршнем, движущемся противоположно движению поршневой системы мультипликатора,
- использование различных способов нагрева за счет электрической дуги, химической энергии, адиабатического сжатия, нагрева во внешнем по отношению к форкамере источнике тепла и их комбинирования в различных сочетаниях,
- возможность задержки вскрытия диафрагмы.

Разработаны конструктивные решения и технологические процессы работы установки при различных сочетаниях способов нагрева.

### Список литературы

1. **Топчиян М.Е., Харитонов А.М.** Аэродинамические трубы для гиперзвуковых исследований // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 3. С. 66–81.
2. **Advanced hypersonic test facilities** / Ed. by F.K. Lu, D.E. Marren // Progress in Astronautics and Aeronautics. 2002. Vol. 198. 639 p.
3. **Кислых В.В.** Высокоскоростные импульсные трубы. Сравнительный анализ и перспективы развития // Материалы международной научно-технической конференции “Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений”, 2004. М.: ЦАГИ, 2004. С. 467–468.
4. **Волов Д.Б.** Теплотехнические устройства для получения плотного высокотемпературного газа // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 4. С. 604–626.
5. **Анфимов Н.А., Кислых В.В.** Моделирование обтекания и теплообмена гиперзвуковых летательных аппаратов в поршневых газодинамических установках многокаскадного сжатия (ПГУ МКС) // Проблемы современной механики: сб. ст. М.: Изд-во МГУ, 2008. С. 17–43.
6. **А.с. СССР № 1156462, G01M9/00.** Импульсная аэродинамическая труба / Дмитриев В.А., Трушников Ю.Ф., Пузырев Л.Н., Ярославцев М.И. 1985. 5 с.
7. **Пузырев Л.Н., Ярославцев М.И.** Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Известия СО АН СССР. Серия техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 135–140.
8. **Шумский В.В.** Комбинированный нагрев рабочего тела в газодинамических высокоэнтальпийных установках // Сибирский физико-технический журнал. 1993. Вып. 2. С. 87–97.
9. **Шумский В.В., Ярославцев М.И.** Химический нагрев рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // ФГВ. 2007. Т. 43, № 5. С. 31–43.
10. **Пат. 2439523. РФ, МПК G01M 9/02.** Импульсная аэродинамическая труба / Ярославцев М.И., Фомин В.М., Маслов А.А., Мещеряков А.М., Пузырев Л.Н., Шумский В.В., Соколовский А.С.; заявитель и патентообладатель Инст-т теорет. и прикл. механики им. С.А. Христиановича СО РАН. № 2010129768/28; заявл. 16.07.2010; опубл. 10.01. 2012. 14 с.
11. **Королев А.С., Бошенятов Б.В., Друкер И.Г., Затолока В.В.** Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1978. 80 с.
12. **Затолока В.В.** Импульсные аэродинамические трубы. Новосибирск: Наука, 1986. 143 с.
13. **Пат. 2436058 РФ, МПК G01M9/2.** Аэродинамическая труба / Ярославцев М.И., Фомин В.М., Маслов А.А., Пузырев Л.Н., Шумский В.В.; заявитель и патентообладатель Инст-т теорет. и прикл. механики им. С.А. Христиановича СО РАН. № 2010129903/28; заявл. 16.07.2010; опубл. 10.12.2011. 8 с.
14. **Маслов А.А., Шумский В.В., Ярославцев М.И.** Импульсная аэродинамическая труба с комбинированным нагревом и стабилизацией параметров // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 6. С. 3–10.

*Статья поступила в редакцию 13 апреля 2012 г.,  
после доработки — 11 февраля 2013 г.*