

УДК 533.6.07: 536.45

Расширение возможностей импульсной аэродинамической трубы с оппозитным мультипликатором давления*

В.В. Шумский¹, М.И. Ярославцев^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

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

Рассмотрен способ увеличения максимального давления в форкамере импульсной аэродинамической трубы с оппозитно расположенными для стабилизации параметров рабочего тела мультипликаторами. Для этого разработана схема трубы с дополнительным третьим мультипликатором, который подсоединяется к корпусу второго мультипликатора. Шток дополнительного мультипликатора находится в контакте с большой ступенью поршня второго мультипликатора, а надпоршневое пространство связано с ресивером трубы. Включение в схему дополнительного мультипликатора при максимальном располагаемом давлении толкающего газа 150–170 бар, определяемым стандартной величиной промышленного давления воздуха, используемого для наполнения ресивера трубы с толкающим газом, позволяет увеличить максимальное давление в форкамере в два раза: с 1100 бар до 2000–2200 бар. Для увеличения максимального давления в форкамере выше 2000–2200 бар одного дополнительного мультипликатора недостаточно — одновременно необходимо увеличивать давление толкающего воздуха выше 150–170 бар.

Ключевые слова: импульсная труба, форкамера, рабочее тело, стабилизация параметров, мультипликатор давления, толкающий воздух.

Исследования в гиперзвуковом диапазоне скоростей требуют применения в экспериментальных установках давлений рабочего тела порядка килобар. Это связано с необходимостью моделирования чисел Маха и Рейнольдса, воспроизведения натуральных давления и температуры, увеличения времени рабочего режима установок кратковременного действия за счет применения двойных форкамер (ФК), с использованием способов преобразования механической энергии в тепловую [1–3].

В работах [4, 5] рассматривалась схема импульсной аэродинамической трубы с двумя оппозитно расположенными мультипликаторами давления для стабилизации в течение режима параметров рабочего тела (РТ). В работе [4] исследовалась работа трубы при давлении $p_{\text{ф}}$ РТ в ФК до 2000 бар. Максимальное давление $p_{\text{ф}} = 2000$ бар, на которое рассчитана работа установки [4], определялось двумя факторами: 1) соотношением площадей больших и малых поршней; 2) давлением $p_{\text{в}}$ толкающего воздуха, который подается

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Правительства РФ (договор № 14.Z50.31.0019) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых и гранта РФФИ (проект 15-01-04788).

к большому поршню первого мультипликатора из ресивера трубы, наполняемого от внешнего источника сжатого воздуха. Соотношение площадей выбиралось с ориентацией на величину, проверенную в процессе эксплуатации гиперзвуковой импульсной трубы ИТ-302М ИТПМ СО РАН, которая служила прототипом при масштабировании размеров установки ИТ-302М на установки с большим объемом ФК. Чрезмерное увеличение соотношения площадей (за счет увеличения диаметра большого поршня первого мультипликатора) от величины, существующей в мультипликаторе ИТ-302М, изменяет динамику разгона и торможения поршневых систем большой массы. Кроме того, увеличение соотношения площадей нежелательно из-за трудностей изготовления и эксплуатации громоздких корпусов мультипликаторов высокого давления. То есть возможность увеличения соотношения площадей ограничена сверху. Это ограничение приводит к тому, что для обеспечения заявленного в работе [4] максимального давления $p_{\phi} = 2000$ бар требуется давление $p_{в} \sim 350$ бар. Однако на практике стандартная величина промышленного давления воздуха колеблется в диапазоне 150–200 бар, что фактически в два раза занижает возможности трубы [4] в части моделирования максимальных давлений торможения РТ (с 2000 бар до ~ 1000 бар). Например, система высокого давления в ИТПМ СО РАН (со стандартными баллонами, рассчитанными на 200 бар) обеспечивает подачу к импульсной трубе ИТ-302М воздуха с давлением не выше 170 бар. Создание отдельной станции высокого давления до 350 бар сопряжено со значительными финансовыми затратами, усложнением конструкции и ее эксплуатации.

Целью настоящей работы является исследование возможности увеличения давления в ФК импульсной аэродинамической трубы с оппозитным расположением поршней до $p_{\phi} = 2000$ бар при использовании для наполнения ресивера толкающего газа воздухом с промышленным давлением не более 150–170 бар. Для этого к корпусу второго мультипликатора предполагается подсоединить по оси третий мультипликатор, содержащий двухступенчатый поршень, малая ступень которого (шток) находится в контакте с большой ступенью поршня второго мультипликатора, а надпоршневое пространство третьего мультипликатора связано с ресивером воздуха.

Расчетная силовая схема такой трубы приведена на рис. 1. Схема состоит из трех мультипликаторов. Воздух высокого давления из ресивера трубы по трассе 1 поступает к надпоршневому пространству большого поршня первого мультипликатора 2 и одновременно (если открыт клапан 8) к надпоршневому пространству третьего мультипликатора 6. Между малыми поршнями первого и второго мультипликатора 5 расположена ФК 4. Диаметры d_{ϕ} ФК и малых поршней первого и второго мультипликаторов одинаковы. Контакт поршня третьего мультипликатора с большим поршнем второго мультипликатора осуществляется с помощью штока 7. Подпоршневое пространство большого поршня

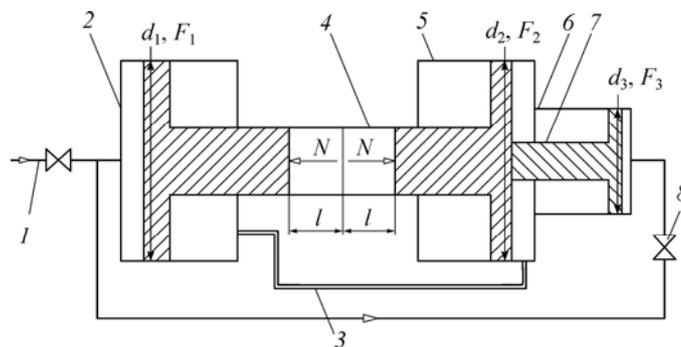


Рис. 1. Расчетная силовая схема.

1 — трасса с толкающим воздухом, 2 — первый мультипликатор, 3 — гидроканал с жидкостью, 4 — ФК, 5 — второй мультипликатор, 6 — третий мультипликатор, 7 — шток третьего мультипликатора, 8 — клапан.

первого мультипликатора и надпоршневое пространство большого поршня второго мультипликатора заполнены жидкостью и соединены гидроканалом 3.

Из условия сохранения объема жидкости следует $V_{ж1} = V_{ж2}$. Здесь $V_{ж1} = F_{ж1} l$ — объем жидкости, вытесняемый за время режима из первого мультипликатора, $V_{ж2} = F_{ж2} l$ — объем жидкости, поступающий за время режима во второй мультипликатор, $F_{ж1} = F_1 - F_\phi$ — площадь поперечного сечения жидкости в первом мультипликаторе, $F_{ж2} = F_2 - F_{шт3}$ — площадь поперечного сечения жидкости во втором мультипликаторе, $F_1, F_2, F_{шт3}, F_\phi$ — площади поперечных сечений большого поршня первого мультипликатора, большого поршня второго мультипликатора, штока 7 третьего мультипликатора и ФК соответственно, l — ход поршневых систем за время режима. Из этого условия получается соотношение

$$F_2/F_1 = 1 - F_\phi/F_1 + F_{шт3}/F_1. \quad (1)$$

Баланс сил, действующих на поршни мультипликаторов со стороны воздуха, жидкости и РТ в ФК, рассматривается для случая равномерного движения поршневой системы (то есть для условий стабилизации параметров РТ в течение режима) и без учета трения поршней по боковой поверхности корпусов. Силу, действующую на поршневую систему первого мультипликатора со стороны РТ в ФК, можно записать следующим образом:

$$N = p_\phi \cdot F_\phi = p_{в1} \cdot F_1 - p_{ж1} (F_1 - F_\phi) \quad (2)$$

Сила, действующая на поршневую систему второго мультипликатора со стороны РТ в ФК, будет иметь вид

$$N = p_\phi \cdot F_\phi = p_{в3} \cdot F_3 + p_{ж2} (F_2 - F_{шт3}). \quad (3)$$

Здесь $p_{в1}, p_{в3}$ — давление воздуха в надпоршневом пространстве первого и третьего мультипликаторов, $p_{ж1}, p_{ж2}$ — давление жидкости в первом и втором мультипликаторах, F_3 — площадь поршня третьего мультипликатора. При допущении $p_{в1} = p_{в3} = p_v$ и $p_{ж1} = p_{ж2} = p_j$ из уравнений (1)–(3) получим связь между давлениями сред в полостях мультипликаторов, давлением РТ в ФК и геометрическими размерами элементов схемы:

$$p_v = \frac{2p_\phi F_\phi / F_1}{1 + F_3 / F_1}, \quad (4)$$

$$p_j = p_v \frac{1 - F_3 / F_1}{2(1 - F_\phi / F_1)}. \quad (5)$$

На рис. 2 и 3 для объема ФК, равного 80 дм^3 , приведены результаты расчетов p_v и p_j по формулам (4) и (5) в зависимости от F_3/F_1 и давления p_ϕ РТ в ФК для двух вариантов геометрических размеров трубы. В варианте 1 характерные размеры $d_\phi = 220 \text{ мм}$, $d_1 = 850 \text{ мм}$, $F_1/F_\phi = 14,9$ такие же, как в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М, поскольку для ИТ-302М они оказались близкими к оптимальным значениям по условиям эксплуатации. На рис. 2 и 3 данные для варианта 1 изображены сплошными линиями. В варианте 2 диаметр ФК, а одновременно и диаметр малых поршней первого и второго мультипликаторов увеличен до $d_\phi = 280 \text{ мм}$ с тем, чтобы уменьшить ход l поршневых систем (в $\sim 1,6$ раза) и, следовательно, уменьшить поперечные размеры установки. Чтобы не пришлось значительно увеличивать диаметры поковок для изготовления корпусов и поршней мультипликаторов, потребовалось уменьшить F_1/F_ϕ до 11,5 $d_1 = 950 \text{ мм}$. На рис. 2 и 3 данные для варианта 2 изображены штриховыми линиями. Диаметр штока третьего мультипликатора в обоих вариантах был принят $d_{шт3} = 150 \text{ мм}$.

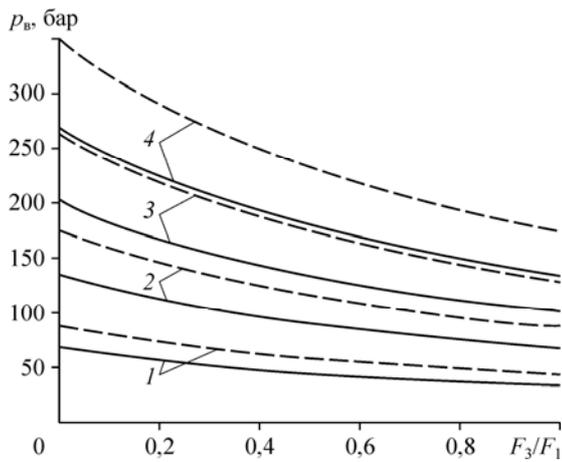


Рис. 2. Давление воздуха в надпоршневом пространстве первого и третьего мультипликаторов.

$p_\phi = 500$ (1), 1000 (2), 1500 (3), 2000 (4) бар.

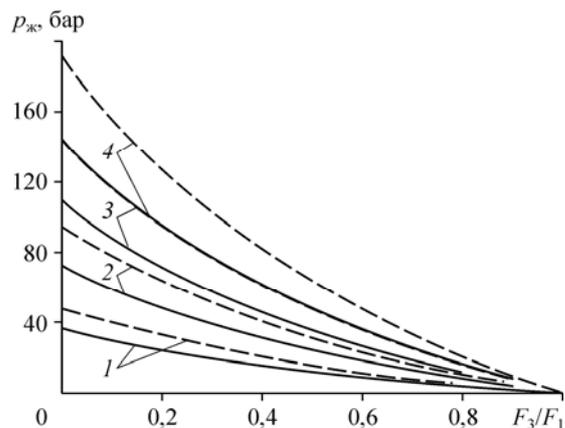
На рис. 2 и 3 значения p_v и $p_{ж}$ при $F_3/F_1 = 0$ относятся к работе трубы так, как если бы третьего мультипликатора не было. Из рис. 2 видно, что в этом случае для $p_v = 150$ –170 бар максимальное давление p_ϕ , которое может быть достигнуто в ФК в режиме стабилизации параметров, составляет не более ~1100 бар. Также видно,

что в отсутствие третьего мультипликатора для достижения в ФК $p_\phi = 2000$ бар требуется давление толкающего воздуха до $p_v \approx 350$ бар. Исходя из баланса сил, действующих на поршневые системы первого и второго мультипликаторов, можно определить, что давление жидкости $p_{ж}$ составляет примерно половину давления p_v . Действием этого давления $p_{ж}$ уравнивается сила $p_\phi F_\phi$, приложенная со стороны ФК к малому поршню второго мультипликатора. Тем самым создаются условия для равномерного движения поршневой системы второго мультипликатора. Из рис. 2 также следует, что увеличение диаметра ФК (с одновременным уменьшением d_1/d_ϕ , см. вариант 2) приводит к увеличению давления p_v , оставляя для варианта 2 значение $p_{ж}/p_v$ тем же самым, что и для варианта 1. В случае отсутствия третьего мультипликатора кинематическая связь при движении навстречу друг другу поршневых систем первого и второго мультипликаторов осуществляется только с помощью несжимаемой жидкости, заполняющей жидкостный тракт мультипликаторов.

Наличие третьего мультипликатора позволяет при $p_v = 150$ –170 бар увеличивать давление в ФК выше $p_\phi \approx 1100$ бар. Так, для $p_\phi = 1500$ бар требуемая величина F_3/F_1 для третьего мультипликатора, как видно из рис. 2, составляет 0,3–0,6 в зависимости от характерных размеров трубы (см. варианты 1 и 2). При $p_\phi = 2000$ бар величина $F_3/F_1 = 0,7$ для варианта 1 и возрастает с увеличением d_ϕ от 220 мм вплоть до $F_3/F_1 = 1$ для варианта 2. Для варианта 1 предельное значение p_ϕ составляет ~2200 бар. При $p_\phi < 1100$ бар нет необходимости в задействовании третьего мультипликатора, поэтому предусмотрена возможность его перекрытия клапаном 8 (рис. 1). Выбор при разработке конструктивных схем импульсной трубы определенных диаметров (d_3 и $d_{шт3}$) третьего мультипликатора определяется принятыми для конструкции размерами d_1 , d_2 , предполагаемыми при эксплуатации трубы диапазоном p_ϕ и при максимальном значении p_v в ресивере толкающего воздуха.

Рис. 3. Давление жидкости в первом и втором мультипликаторах.

Обозначения см. на рис. 2.



С применением третьего мультипликатора в составе оппозитной трубы возникает дополнительная особенность в ее работе. С увеличением площади поперечного сечения F_3 поршня третьего мультипликатора происходит уменьшение требуемого давления $p_{ж}$ (см. рис. 3). Это связано с тем, что с увеличением F_3 все большую роль в уравнивании силы $p_{ф} \cdot F_{ф}$, прикладываемой со стороны РТ к поршневой системе второго мультипликатора, начинает играть сила $p_{в} F_3$, и все меньшую — сила $p_{ж} F_{ж2}$, что и приводит к уменьшению $p_{ж}$. При этом в кинематической связи при движении навстречу друг другу первого и второго мультипликаторов помимо несжимаемой жидкости начинает участвовать и сжимаемый воздух. Это может приводить к необходимости применения специальной системы, следящей за синхронностью движения поршней. В то же время требование синхронного движения поршней не является жестким. Обязательным здесь является только сохранение условия $p_{ф} = \text{const}$ в течение рабочего режима.

Таким образом, применение в схеме импульсной трубы с оппозитно расположенными поршнями дополнительного третьего мультипликатора позволяет при работе с давлением толкающего воздуха в ресивере трубы 150–170 бар увеличить максимальное давление в ФК в опытах со стабилизацией параметров РТ в течение режима приблизительно в два раза: с $p_{ф} = 1100$ бар до $p_{ф} = 2000$ –2200 бар. Для увеличения $p_{ф}$ выше 2000–2200 бар только одного дополнительного третьего мультипликатора недостаточно. Требуется также переход на работу с давлением толкающего воздуха большим, чем 150–170 бар.

Схема импульсной аэродинамической трубы со стабилизацией параметров РТ, разработанная на основе расчетной силовой схемы рис. 1, приведена на рис. 4. Она включает ресивер 1, быстродействующий пневмоклапан 2, изолирующий толкающий газ от надпоршневого пространства 3 поршня 4 первого мультипликатора давления 5. Второй мультипликатор давления 6 содержит поршень 7. Оба поршня 4 и 7 расположены оппозитно друг другу и могут синхронно перемещаться навстречу друг другу. Надпоршневое пространство 3 поршня 4 имеет пневмотрассу с вентилем для сброса давления и пневмотрассу 9 с вентилем для заполнения полости 3 избыточным давлением. Подпоршневое пространство 8 заполнено жидкостью и соединено с надпоршневым пространством 10 поршня 7 гидроканалом 11, содержащим устройство 12 для изменения расхода протекающей по каналу жидкости и обратный клапан 13 для удаления пузырьков газа. Перпендикулярно оси мультипликатора по центру ФК 14 расположены диафрагма 15 и устройство ее управляемого вскрытия (для случая использования химической энергии, на рис. 4 не показано), вторая ФК 16, сопло 17 и коаксиальные электроды 18, подводящие к ФК 14 электрическую энергию от конденсаторной батареи 19. К ФК подходят два пневмоканала 20 и 21 и пневмотрасса 22 с вентилем для заполнения ФК сжатым воздухом. Канал 20 с вентилями предназначен для подсоединения системы 23 заправки ФК реагирующими газами (N_2O , C_3H_8 , H_2 , O_2), азотом, воздухом. Пневмоканал 21 используется для подключения импульсного адиабатического генератора рабочего газа 24. Подпоршневое пространство 25 поршня 7 частично заполнено жидкостью, которая участвует в торможении поршня на конечном участке движения. Здесь же расположены дренированная емкость 26 с крышкой, пневмотрасса 27 с вентилем для сброса давления из полости 25, и подсоединена пневмотрасса 28 с вентилем и манометром для подачи избыточного давления в полость 25 для возвращения поршней 4, 7 мультипликаторов в исходные крайние положения. К крышке корпуса второго мультипликатора по оси присоединен корпус третьего мультипликатора 29, который содержит поршень 30 со штоком 31. Шток 31 через отверстие в крышке второго мультипликатора с системой уплотнений находится в контакте с поршнем 7 второго мультипликатора. Надпоршневое пространство третьего мультипликатора соединено пневмотрассой через пневмоклапан 32 с ресивером 1.

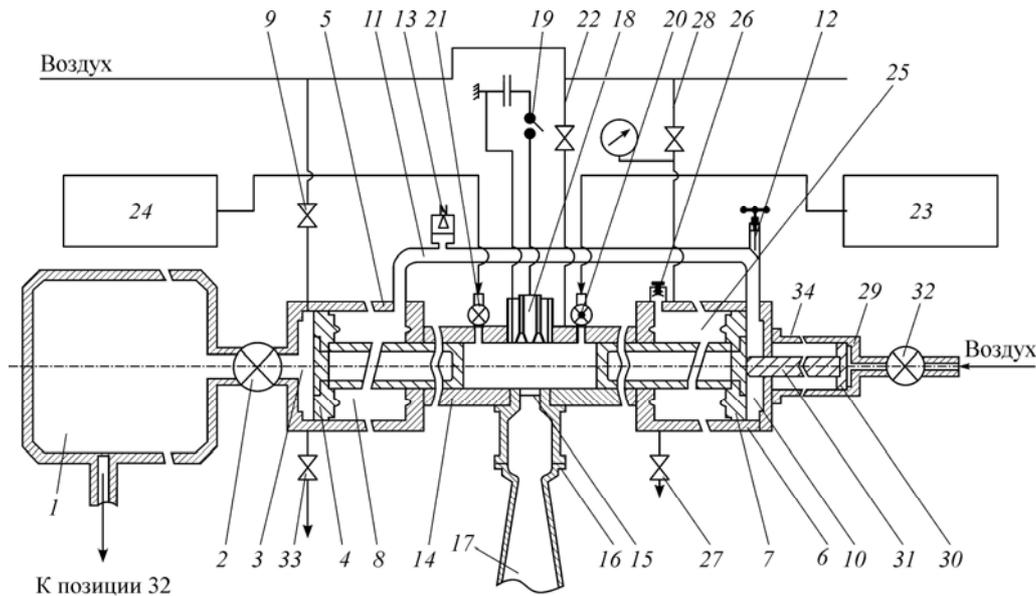


Рис. 4. Схема оппозитной импульсной трубы с дополнительным мультипликатором давления.

- 1 — ресивер с толкающим воздухом, 2 — быстродействующий пневмоклапан, 3 — надпоршневое пространство поршня 4, 4 — поршень первого мультипликатора давления, 5 — первый мультипликатор давления, 6 — второй мультипликатор давления, 7 — поршень второго 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 поршневых систем мультипликаторов в предстартовое состояние, 29 — корпус третьего мультипликатора, 30 — поршень третьего мультипликатора, 31 — шток, 32 — пневмоклапан, 33 — вентиль для сброса давления из полости 3, 34 — дренажное отверстие.

В схеме, аналогично работам [4, 5], предусмотрены различные способы подогрева РТ: адиабатическое сжатие, электродуговой подогрев, химическая энергия различных горючих газов, накачиваемых в ФК, подогрев во внешнем источнике и сочетание этих способов в разных комбинациях.

В связи с многовариантностью рабочих режимов рассмотрим наиболее показательный из них: работу аэродинамической трубы со стабилизацией параметров потока при нагреве РТ за счет электрической дуги и химической энергии. Подготовка трубы к пуску предусматривает выполнение следующих операций. Перед экспериментом газодинамический тракт трубы, включая вторую ФК 16, сопло 17, рабочую часть и выхлопную вакуумную емкость (на рис. 4 не показаны), изолируют от ФК диафрагмой 15 с устройством управляемого вскрытия и откачивают вакуумными насосами до давления в несколько Па. Быстродействующий пневмоклапан 2 закрывается и ресивер 1 заполняется сжатым воздухом до давления p_v . Крышка на емкости 26 и вентиль 27 закрываются, вентиль пневмотрассы 28 и вентиль сброса давления 33 из надпоршневого пространства 3 открываются и в подпоршневое пространство 25 поршня 7 подается избыточное давление. При этом поршни 4, 7, 30 расходятся в крайние положения. Обратный клапан 13

под действием избыточного давления жидкости в гидроканале 11 закрывается. После возвращения поршней 4, 7 в исходное состояние производится сброс давления из полости 25 вентилем 27, крышка емкости 26 открывается, вентили 27, 28, 33 закрываются. Для исключения повышения давления в подпоршневом пространстве при движении поршня 30 предусмотрено его соединение с атмосферой дренажным отверстием 34. Система заправки реагирующими газами 23, состоящая из электромагнитных клапанов, механически соединяется с полостью ФК через пневмоканал 20. ФК 14 поочередно заполняется смесью газов, например, закисью азота N_2O и N_2 , в соотношении, обеспечивающим после разложения N_2O состав смеси $N_2 + O_2$ с объемной долей кислорода 0,21, равной содержанию O_2 в атмосферном воздухе. Аналогично может использоваться химическая энергия других компонент (H_2 , C_3H_8). Затем происходит заполнение воздухом ФК с помощью вентили пневмотрассы 22. После заполнения ФК пневмоканал 20 и пневмотрасса 22 закрываются и система заправки 23 отводится от ФК, разрывая механическую связь с корпусом ФК. Далее производится зарядка конденсаторной батареи 19. При запуске установки происходит разряд конденсаторной батареи 19, температура и давление газа увеличиваются. При достижении температуры 1200–1500 К начинается реакция разложения закиси азота с выделением тепла. Продолжительность реакции разложения составляет от нескольких миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд в зависимости от процентного содержания закиси азота в смеси и сопровождается ростом температуры и давления в ФК. Одновременно с разрядом батареи открываются пневмоклапаны 2, 32 и толкающий газ из ресивера 1 поступает в полость 3 первого мультипликатора давления 5 и в полость 29 перед поршнем третьего мультипликатора. Происходит дополнительное сжатие газа в ФК. При достижении давления в ФК, близком к максимальному, после разложения закиси азота (время реакции конкретной смеси устанавливается заранее в исследованиях) подается сигнал на вскрытие диафрагмы 15. Диафрагма вскрывается и рабочий газ с постоянным расходом вытесняется из ФК.

Работа мультипликаторной группы при запуске установки, включая третий мультипликатор давления, заключается в следующем. При ожидаемом давлении в ФК не более 1100 бар и максимальном давлении толкающего воздуха 150–170 бар третий мультипликатор можно не включать в работу, перекрыв клапан 32. Давления в полости 3 первого мультипликатора 5 вполне достаточно для перемещения двухступенчатых поршней 4 и 7 навстречу друг другу. При давлении толкающего воздуха 150–170 бар и ожидаемом давлении в ФК в диапазоне 1100–2200 бар третий мультипликатор необходимо включить в работу, поскольку суммарного баланса сил, действующего на поршневые группы первого и второго мультипликаторов, после подвода энергии в ФК недостаточно для старта и движения поршней 4 и 7. Участие третьего мультипликатора обеспечивает необходимый баланс сил.

Выводы

1. Разработана схема импульсной аэродинамической трубы с оппозитно расположенными поршнями мультипликаторов давления с включением в схему дополнительного третьего мультипликатора.

2. Включение в схему трубы дополнительного мультипликатора позволяет при максимально возможном давлении толкающего газа 150–170 бар, определяемом стандартной величиной промышленного давления воздуха, используемого для наполнения ресивера трубы, увеличить максимальное давление в ФК в опытах со стабилизацией параметров РТ в два раза: с 1100 бар до 2000–2200 бар.

3. Для увеличения максимального давления в ФК выше 2000–2200 бар только одного дополнительного мультипликатора недостаточно, необходимо одновременно увеличивать давление толкающего воздуха выше 150–170 бар.

Список литературы

1. **Королев А.С., Бошнятов Б.В., Друкер И.Г., Затолока В.В.** Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1978. 80 с.
2. **Топчий М.Е., Харитонов А.М.** Аэродинамические трубы для гиперзвуковых исследований // Прикладная механика и техническая физика. 1994. Т. 35, № 3. С. 66–81.
3. **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.
4. **Маслов А.А., Шумский В.В., Ярославцев М.И.** Импульсная аэродинамическая труба с комбинированным нагревом и стабилизацией параметров // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53, № 6. С. 3–10.
5. **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.

*Статья поступила в редакцию 19 февраля 2015 г.,
после доработки — 29 июня 2015 г.*