

УДК: 533.6.07:536.45

Обеспечение безопасности работы импульсной трубы с комбинированным подогревом рабочего тела в режиме стабилизации

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

Рассмотрены аварийные ситуации, типичные для импульсных труб с электродуговым или комбинированным подогревом рабочего тела при наличии систем стабилизации и управляемого вскрытия диафрагмы в случае, если дуговой разряд в форкамере не происходит и конденсаторная батарея при запуске систем трубы остается в заряженном состоянии. Для предотвращения аварийных ситуаций в конструкцию установок вносятся следующие изменения (за счет введения элементов с обратной связью), дающие разрешение на дальнейшую работу систем установки лишь при наличии роста давления в форкамере за счет теплоподвода: поршень быстросрабатывающего клапана выполнен полым для увеличения объема запирающей полости с целью исключения необходимости сбрасывания давления из запирающей полости; канал высокого давления, связывающий поршень со штоком с полостью форкамеры, заполнен жидкостью и закрыт со стороны форкамеры поршнем; устройство принудительного вскрытия диафрагмы снабжено внешней электрической схемой управления вскрытием диафрагмы.

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

В работах [1–3] обсуждались варианты импульсных аэродинамических труб с расширенными энергетическими и газодинамическими возможностями моделирования условий гиперзвукового полета, появление которых обусловлено естественным развитием гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы ИТ-302М ИТПМ СО РАН [4, 5]. Рассмотрено несколько схем таких установок: схема с линейным расположением форкамеры (ФК) и мультипликатора давления [2], схема с оппозитным расположением мультипликаторов [1], схема с дополнительным третьим мультипликатором [3]. В перечисленных исследованиях был проведен анализ работы этих аэродинамических установок в режиме работы классической импульсной трубы с падающими параметрами, в режиме с использованием химической энергии в качестве дополнительного источника энергии, в режимах адиабатического сжатия и нагрева рабочего тела (РТ) и в некоторых других режимах в условиях стабилизации параметров потока. При использовании химической энергии рассматривается конструкция устройства для управляемого вскрытия диафрагмы. Суть управляемой диафрагмы заключается в возможности задержки ее вскрытия для того, чтобы реакция в ФК прошла полностью. Это время реакции может составлять от одной до нескольких десятков и даже сотен миллисекунд. По истечении указанного времени подается сигнал на вскрытие диафрагмы.

Основной целью работ [1–5] был поиск оптимальных конструкторских решений и разработка газотермодинамики технологических процессов, связанных со стабилизацией параметров и многовариантностью режимов. Вопросы безопасности испытаний в этих исследованиях не рассматривались. Однако опыт эксплуатации трубы ИТ-302М, оснащенной системой стабилизации параметров потока, показал, что в управлении технологическими процессами могут происходить сбои, которые являются предпосылками к аварийным ситуациям.

Возможные аварийные ситуации представляется удобным рассмотреть на примере установки с линейным расположением ФК и мультипликатора и наличием управляемого вскрытия диафрагмы. Установка содержит (см. рис. 1 и 3 в работе [2], на которых еще не были предусмотрены меры, исключающие аварийные ситуации) разрядную ФК с коаксиальными электродами, которая отделена от остального газодинамического тракта трубы диафрагмой с управляемым вскрытием. Поршень мультипликатора состоит из двух ступеней: большой и малой. Малая ступень содержит канал высокого давления, который заканчивается поршнем со штоком, предназначенным для открытия быстродействующего клапана (БК). При открытии БК толкающий газ подается из ресивера в надпоршневое пространство большой ступени поршня мультипликатора давления. Система управления работой БК содержит электромагнитный клапан для сброса из полости давления газа, запирающего поршень БК, манометр и вентиль подачи газа в полость для запираания поршнем отверстия входа газа в надпоршневое пространство большой ступени поршня мультипликатора давления.

Перед запуском трубы в полости БК устанавливается минимальное давление, необходимое для запираания поршнем БК отверстия для подачи толкающего газа в надпоршневое пространство мультипликатора давления. Величина минимального давления может быть различной и связана с начальным давлением газа в ФК и давлением толкающего газа. При запуске установки давление в ФК резко повышается. Это давление через канал высокого давления передается на поршень со штоком, который под воздействием избыточной силы смещает поршень БК, приоткрывая тем самым доступ толкающего газа в полость перед большой ступенью поршня. Давление в полости перед большой ступенью поршня резко увеличивается и окончательно открывает отверстие путем смещения поршня БК в крайнее положение до упора. При этом происходит значительный рост запирающего давления в относительно малой по размерам полости Г между поршнем БК и задней стенкой клапана, который может привести к нарушению режима работы БК, вызвав возвратно-поступательный процесс движения поршня и, как следствие, колебательный режим. Чтобы исключить колебательный режим движения поршня, полость Г через пневмотрассу связана с электромагнитным клапаном, который открывается в момент запуска трубы и сбрасывает избыточное давление в атмосферу.

Поскольку в рассматриваемой схеме импульсной аэродинамической трубы (АДТ) из работы [2] не предусмотрены меры, обеспечивающие безопасность ее работы, то включение электромагнитного клапана для сброса давления из полости Г в момент запуска трубы во всех случаях при отсутствии дугового разряда приведет к аварии. Под действием начального давления РТ в ФК поршень БК сдвинется (на рис. 1 и 3 в работе [2] он сдвигается влево), откроет путь толкающему газу в надпоршневое пространство большой ступени, и поршневая система придет в движение. При прохождении малой ступени поршня мультипликатора мимо электродов (электрический разряд при запуске трубы отсутствовал) произойдет электродуговой разряд между положительным электродом и поршнем, что приведет к разрушению ФК и других систем.

Другие аварийные режимы трубы связаны с преждевременным вскрытием диафрагмы. Например, если после зарядки конденсаторной батареи при нажатии кнопки «пуск» разряд конденсаторной батареи по каким-то техническим причинам не произошел, но проходит сигнал на подрыв управляемой диафрагмы. Диафрагма вскрывается,

давление в ФК падает до вакуума и при этом (в соответствии с кривой Пашена, полученной при уменьшении давления [6]) происходит самопроизвольный разряд батареи со всеми неприятными для конструкции последствиями.

Решение проблемы предотвращения перечисленных аварийных ситуаций достигается тем, что в конструкцию импульсной АДТ с электродуговым или комбинированным подогревом РТ вносятся элементы с обратной связью, дающие разрешение на работу систем установки лишь при наличии роста давления в ФК за счет теплоподвода. Изменения в конструкции при внесении таких элементов заключается в следующем.

1. Поршень БК выполнен полым, в виде стакана, открытая часть которого обращена к полости с запирающим давлением, а закрытая (глухая) часть запирает отверстие подачи толкающего газа в надпоршневое пространство мультипликатора давления. Это изменение значительно увеличивает объем полости Г и при смещении поршня БК начальное запирающее давление в полости Г увеличивается не существенно, что исключает колебательный режим движения поршня и необходимость включения в момент запуска трубы электромагнитного клапана для сброса давления из полости Г.

2. Канал высокого давления, связывающий поршень со штоком с полостью ФК, заполнен жидкостью и закрыт со стороны ФК поршнем. Это изменение исключает при использовании химического подогрева ударную нагрузку на поршень за счет химической реакции реагирующего РТ в длинном тонком канале. При этом уменьшается время открытия БК, так как передача давления от ФК к поршню со штоком по жидкости происходит практически мгновенно.

3. Устройство принудительного вскрытия диафрагмы дополнительно снабжено внешней электрической схемой управления вскрытием диафрагмы и содержит пневмомеханическую блокировку, связанную с ФК, которая дает разрешение на вскрытие диафрагмы только при росте давления в ФК за счет теплоподвода.

На рис. 1 и 2 показаны схема импульсной АДТ и схема устройства запуска дифференциального мультипликатора давления и БК системы стабилизации с изменениями, внесенными по п.п. 1 и 2, обеспечивающими безаварийный режим работы АДТ. На рис. 3 приведено устройство принудительного вскрытия диафрагмы с внешней электрической схемой управления вскрытием диафрагмы, содержащей пневмомеханическую блокировку, как указано в п. 3. Нумерация позиций на рис. 1–3 сквозная.

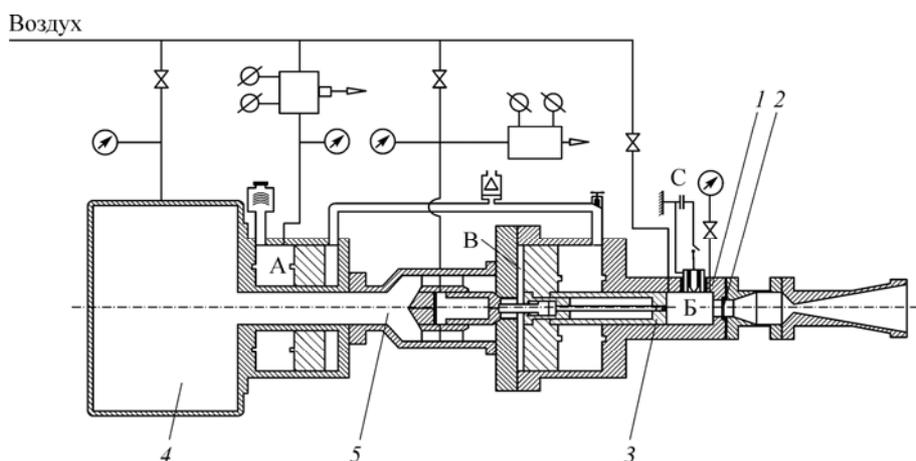


Рис. 1. Импульсная АДТ с электродуговым или комбинированным подогревом РТ со стабилизацией параметров потока.

1 — ФК, 2 — диафрагма с устройством принудительного вскрытия,
3 — двухступенчатый поршень мультипликатора давления, 4 — ресивер с толкающим воздухом,
5 — канал подвода воздуха из ресивера к полости В мультипликатора.

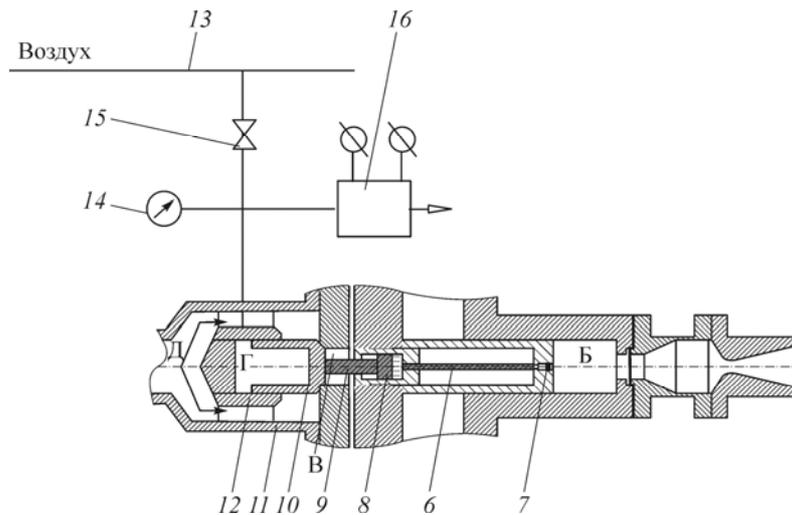


Рис. 2. Схема устройства запуска дифференциального мультипликатора давления и БК системы стабилизации.

6 — канал высокого давления, 7 — поршень, 8 — поршень со штоком, 9 — шток, 10 — поршень БК, 11 — БК, 12 — цилиндр, 13 — пневмотрасса, 14 — манометр, 15 — вентиль, 16 — электромагнитный клапан.

Приведем описание изображенных на рис. 1–3 основных элементов конструкции импульсной АДТ с электродуговым или комбинированным подогревом РТ со стабилизацией параметров потока. 1 — ФК, в состав которой входят коаксиальные электроды конденсаторной батареи С. ФК 1 ограничена с одной стороны диафрагмой 2 с устройством принудительного вскрытия, с другой — торцом малой ступени двухступенчатого поршня 3 мультипликатора давления. Двухступенчатый поршень содержит систему обратной связи, которая состоит из канала высокого давления 6, заполненного жидкостью, и двух поршней: поршень 7 контактирует с полостью Б ФК, а поршень 8 со штоком 9 контактирует с поршнем 10 БК 11. Полый поршень 10 выполнен в виде стакана с глухим дном. Шток 9 в предстартовом состоянии аэродинамической трубы через полость В корпуса мультипликатора давления соприкасается с поршнем 10 БК 11. Поршень 10 размещен в цилиндре 12 соосно с корпусом БК 11 и образует кольцевой канал Д с внешним корпусом. Через кольцевой канал Д толкающий газ из ресивера 4 по сквозному цилиндрическому каналу 5 подводится в надпоршневое пространство В мультипликатора давления. Между торцом цилиндра 12 и полым поршнем 10 образована полость Г, связанная с воздушной пневмотрассой 13, манометром 14, вентилем 15 и электромагнитным клапаном 16.

Устройство принудительного вскрытия диафрагмы 2 дополнительно снабжено внешней электрической схемой управления вскрытием диафрагмы и содержит

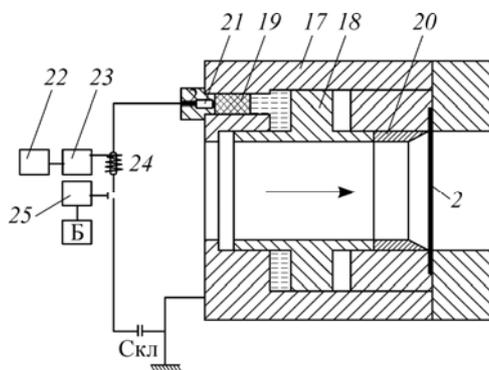


Рис. 3. Устройство принудительного вскрытия диафрагмы с внешней электрической схемой управления вскрытием диафрагмы.

2 — диафрагма, 17 — корпус, 18 — поршень, 19 — поршень, 20 — нож, 21 — пиропатрон, 22 — компьютер, 23 — высоковольтный трансформатор, 24 — ключ, 25 — пневмомеханическая блокировка.

связанную с полостью Б ФК пневмомеханическую блокировку, которая дает разрешение на вскрытие диафрагмы 2 только при теплоподводе и росте давления в ФК. Устройство принудительного вскрытия диафрагмы и сама диафрагма 2 отделяют полость Б ФК от остального газодинамического тракта аэродинамической трубы. Устройство состоит из корпуса 17 с поршнями 18, 19 и жидкостью между ними, при этом поршень 18, обращенный к диафрагме 2, оснащен ножом 20 и приводится в движение поршнем 19 через жидкость после подрыва пиропатрона 21. Нож 20 имеет квадратное сечение с тремя режущими кромками. Четвертая кромка заглублена внутрь ножа и не участвует во вскрытии диафрагмы.

Внешняя электрическая схема управления вскрытием диафрагмы помимо компьютера 22, высоковольтного трансформатора 23, ключа 24 (представляющего собой газоразрядную импульсную лампу типа ИФП) и конденсаторной батареи $C_{кл}$ дополнительно содержит связанную с полостью Б ФК пневмомеханическую блокировку 25, представляющую собой систему обратной связи внешнего управления вскрытием диафрагмы, которая дает разрешение на вскрытие диафрагмы 2 только при теплоподводе и росте давления в ФК. При наличии теплоподвода в ФК и росте давления электрическая цепь управления разрушением диафрагмы замыкается, разрешая прохождение сигнала от компьютера 22 на вскрытие диафрагмы.

Импульсная АДТ с электродуговым или комбинированным подогревом рабочего газа работает следующим образом. Перед экспериментом полость Б ФК изолируется от газодинамического тракта трубы диафрагмой 2 с устройством принудительного вскрытия. В полость Г вентилем подается запирающее давление. Его величина зависит от начального давления в ФК и давления в ресивере с толкающим газом 4. Ресивер с толкающим газом заполняется сжатым воздухом, а ФК — воздухом либо смесью газов. Осуществляется зарядка конденсаторной батареи С.

При запуске АДТ (время разряда конденсаторной батареи ~ 1 мс) происходит увеличение температуры и давления рабочего газа в полости Б ФК. Это давление через поршень 7, через жидкость в канале высокого давления 6 и поршень 8 со штоком 9 воздействует на поршень 10 БК 11 и сдвигает поршень 10 влево, приоткрывая тем самым доступ толкающему газу в надпоршневое пространство В мультипликатора давления. Давление в полости В резко возрастает и окончательно сдвигает поршень 10 БК 11 в крайнее левое положение. Поршневая система мультипликатора давления начинает движение и перемещается вправо в сторону ФК. Поскольку высокое напряжение на положительном электроде конденсаторной батареи С после разряда отсутствует, реализуется штатный режим работы аэродинамической трубы. В случае, если разряд батареи по каким-то причинам не произошел, то роста давления в ФК не будет, не откроется БК 11 системы стабилизации параметров потока, и диафрагма 2 не вскроется из-за разомкнутой цепи управления вскрытием, предотвращая таким путем аварию на установке.

Все рекомендации, изложенные выше по предотвращению аварийных ситуаций в случае отсутствия разряда и нагрева РТ в ФК (при заряженной конденсаторной батарее), основаны на практическом опыте и анализе нештатных ситуаций, имевших место при эксплуатации импульсных установок.

Таким образом, проанализированы типичные предпосылки к аварийным ситуациям при работе импульсной трубы в режиме стабилизации параметров при отсутствии в ФК разряда заряженной конденсаторной батареи из-за сбоев в управлении технологическими процессами. Рассмотрены способы предотвращения аварийных ситуаций за счет внесения в конструкцию импульсной АДТ с электродуговым или комбинированным подогревом РТ элементов с обратной связью, дающих разрешение на работу систем установки лишь при наличии роста давления в ФК за счет теплоподвода.

Список литературы

1. **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.
2. **Маслов А.А., Шумский В.В., Ярославцев М.И.** Высокоэнтальпийная установка кратковременного действия с комбинированным нагревом и стабилизацией параметров. // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 5. С. 535–546.
3. **Шумский В.В., Ярославцев М.И.** Расширение возможностей импульсной аэродинамической трубы с оппозитным мультипликатором давления // Струйные, отрывные и нестационарные течения, XXIV Всеросс. семинар с международным участием, 11–13 ноября 2015 г., Новосибирск. Тезисы докладов под ред. В.М. Фомина, В.И. Запрягаева. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 175–176.
4. **А.с. 1156462 СССР, G01M9/00.** Импульсная аэродинамическая труба / В.А. Дмитриев, Ю.Ф. Трушников, Л.Н. Пузырев, М.И. Ярославцев. 1985. 5 с.
5. **Пузырев Л.Н., Ярославцев М. И.** Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубы // Известия Сибирского отделения АН СССР. Серия техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 135–140.
6. **Капцов Н.А.** Электрические явления в газах и вакууме. М., Л.: Гостехиздат, 1950. 836 с.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2016 г.