

УДК 533.6.07+681.518

Исследование динамических характеристик омического подогревателя аэродинамической трубы*

В.М. Гилев^{1,2}, С.И. Шпак¹

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

²*Новосибирский государственный технический университет*

E-mail: shpak@itam.nsc.ru

Выполнены экспериментальные исследования динамических характеристик омического подогревателя, предназначенного для аэродинамической трубы кратковременного действия. Эксперименты проводились в специально сконструированном для этих целей испытательном стенде. Получены экспериментальные данные по динамическим характеристикам подогревателя.

Ключевые слова: омический подогреватель, информационно-измерительная система, датчики температуры.

Введение

Аэродинамические трубы кратковременного действия достаточно разнообразны по своим конструктивным решениям [1], но почти все оснащены устройствами предварительного подогрева рабочего газа до требуемых температур. Конструкции подогревателей подробно рассматривались в работе [2], где было показано, в частности, что время выхода на равновесный по температуре режим подогревателей непосредственного нагрева воздуха в процессе пуска составляет около 20 секунд, что явно неприемлемо для труб кратковременного действия. Самым простым из подогревателей с предварительным нагревом является омический подогреватель, в котором рабочий газ проходит через теплообменник, конструкции которого предварительно разогреты электрическим током, проходящим через набор спиралей. Затем рабочий газ подается в дополнительный нагреватель (например, адиабатический) и далее в форкамеру для окончательной доводки температуры и давления до необходимых величин при проведении эксперимента. Так как эксперимент в трубах кратковременного действия занимает не более 5 секунд, что равно времени пуска, то к подогревателю предъявляются особые требования по обеспечению таких параметров рабочего газа как его давление и температура. Таким образом, необходимо изучить динамику всего процесса впуска рабочего газа из ресивера через подогреватель в систему трубопроводов и емкостей, составляющих необходимые элементы конструкции аэродинамической трубы, что и является целью настоящей работы.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00426).

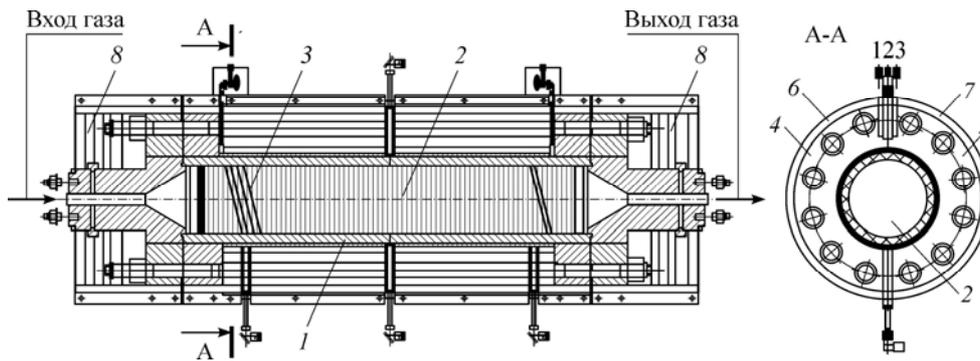


Рис. 1. Омический подогреватель «ЭД 6235.00.000 РР».

1 — цилиндрический корпус, 2 — теплоотдающие вкладыши, 3 — нихромовый нагреватель в кожухе из керамических втулок, 4–7 — набор теплоизолирующих кожухов, 8 — торцевые теплоизоляторы.

Схема исследуемого подогревателя приведена на рис. 1. Внутренний объем корпуса заполнен плоскими вкладышами (2) в количестве 119 шт. с числом отверстий 1519 каждый. По наружной поверхности корпуса (1) выполнена спиральная трехзаходная канавка. В каждый из заходов укладываются фазовые магистрали подогревателя (3), выполненные из нихромовой проволоки диаметром 2 мм, в изоляции, набранной из керамических втулок внешним диаметром 8 мм, внутренним диаметром 4 мм и длиной 10 мм. Электрическая цепь нагревательного элемента является трехфазной, $U \sim 380$ В. В связи с тем, что омический подогреватель расположен вертикально, под спиральной трехзаходной канавкой выполнена сплошная спиральная поддерживающая полка для исключения возможности выхода нихромовой проволоки из канавки и падения ее вниз при нагреве и температурном расширении. Остальные характеристики подогревателя были следующими: температура нагревательного элемента могла достигать 1123 К, температура нагрева корпуса подогревателя — не более 883 К, время нагрева корпуса до этой температуры равнялось ~ 2 ч 30 мин, время остывания корпуса подогревателя от 883 К до температуры окружающей среды составляло более 60 часов, давление воздуха, пропускаемого через омический подогреватель, при температуре корпуса 883 К — не более 14,19 МПа, мощность, потребляемая омическим нагревателем, — 10,7 кВт.

Экспериментальное оборудование и измерительная система

Для исследования динамических характеристик подогревателя и процесса впуска рабочего газа был сконструирован и изготовлен испытательный стенд, схема которого приведена на рис. 2. Рабочий газ предварительно закачивается под заданным давлением в ресивер (1). В процессе пуска сначала открывается быстродействующий клапан (4), который через заданное время (2,5 с) снова закрывается. Во время открытого состояния клапана рабочий газ проходит через подогреватель, предварительно разогретый до максимально возможной температуры для «горячих» пусков, и уходит в приемную емкость, состоящую из трех баллонов — центрального и двух боковых, соединенных системой трубопроводов. После проведения измерений рабочий газ стравливается из всей системы через клапан сброса (8). Измерения характеристик рабочего газа (давлений и температур), поступающего в приемную емкость, осуществлялись датчиками температуры (Т3, Т5–Т8) и датчиками давления (2, 7). Для следующего пуска ресивер снова заполняется воздухом из источника в компрессорной станции (А). Дополнительные конструкции (3, 5, 6, 9) предназначены для обслуживания клапана (4).

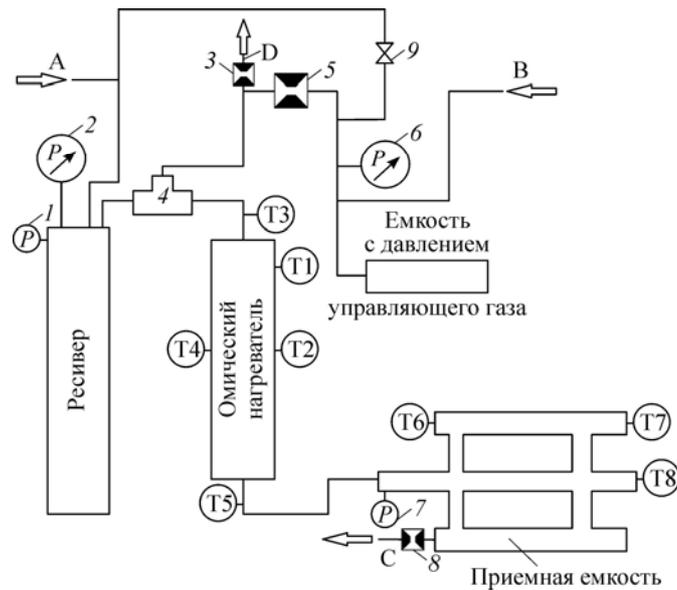


Рис. 2. Схема испытательного стенда.

1 — датчик давления воздуха в ресивере, 2 — манометр давления воздуха в ресивере, 3 — электроклапан сброса управляющего давления пневмоклапана, 4 — пневмоклапан, 5 — дроссель, 6 — манометр управляющего давления воздуха, 7 — датчик давления воздуха в приемной емкости, 8 — электроклапан сброса давления воздуха в приемной емкости, 9 — вентиль; T1 и T2 — датчики температуры (хромель-алюмелевые термопары X-A) на корпусе подогревателя, T4 — датчик температур (термопара X-A) на спирали подогревателя, T3 и T5 — датчики температуры (хромель-копелевые термопары X-K) в трубопроводе, T6–T8 — датчики температуры (термопары X-K) в приемной емкости, А — подача воздуха для заправки ресивера, В — подача воздуха для заправки емкости с управляющим давлением, С — сброс воздуха из приемной емкости, D — сброс управляющего давления пневмоклапана.

Схематически датчики температуры изображены на рис. 3а. Согласно рекомендациям [3] на горячий спай термопары датчиков T7, T8 были одеты экраны (рис. 3б). Расположения датчиков в приемных емкостях показано на рис. 3с.

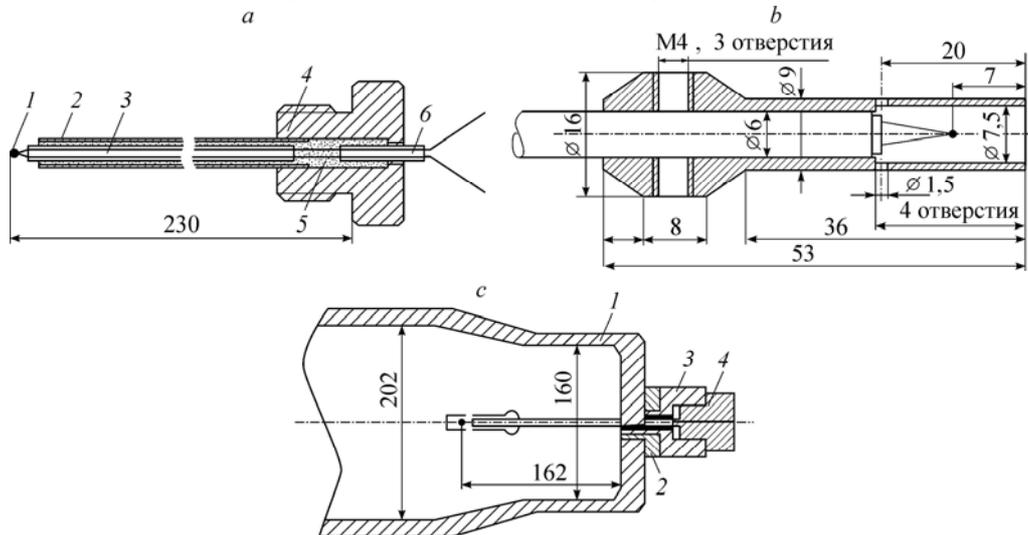


Рис. 3. Схемы датчиков температуры T6–T8 (a) и расположения экрана горячего спая термопары (b), пример расположения датчика температуры в приемной емкости (c).

1 — горячий спай термопары, 2 — трубка стальная, 3 — трубка керамическая двухканальная, 4 — корпус термопары, 5 — герметик керамический высокотемпературный «DoneDeal», 6 — трубка керамическая двухканальная. Размеры приведены в миллиметрах.

Для проведения исследований на стенде на базе информационно-измерительного комплекса [4, 5] была создана специализированная измерительная система, к модулю аналого-цифрового преобразователя которой были подключены датчики температуры. Управление процессом пуска и измерения давлений в ресивере рабочего газа и в приемной емкости проводились с использованием штатной АСУ АТ-303. Для синхронизации систем информационно-измерительного комплекса и АСУ АТ-303 датчик импульса внешнего запуска последней также подключался к модулю аналого-цифрового преобразователя. Результаты экспериментов, как правило, записывались сначала в архив, а затем экспортировались в текстовые файлы для дальнейшей обработки.

Результаты экспериментов

Хорошо известно, что быстрое повышение давления газа в емкости приводит к повышению его температуры за счет процесса адиабатического сжатия. Для того чтобы определить вклад в температуру рабочего газа, подготовленного к эксперименту, собственно подогревателя, были проведены серии пусков с различными давлениями в ресивере с холодным и горячим омическим подогревателем. Давления в ресивере задавались от минимально возможного для данного стенда (1,22 МПа) до максимально допустимого (14,19 МПа). При горячих пусках температура спирали составляла ~ 950 К, а корпус прогревался до 873 К; на время пуска подогрев отключался. Все пуски проводились один раз в день и начальные давления в ресивере для холодных и горячих пусков были, по возможности, близки друг другу. Пуски были проведены при следующих давлениях: 1,22, 2,03, 4,05, 6,08, и 10,13 МПа. Из-за особенностей конструкции пневмоклапана 4 (см. рис. 2) он открывался в различных пусках в разное время от момента подачи сигнала запуска системы АТ-303 на измерение. Поэтому результаты всех экспериментов приводились к одному начальному времени добавлением разности времени начала падения давления в ресивере в пуске с давлением 4,05 МПа и соответствующего времени в пусках при остальных давлениях. Кроме этого, показания датчиков температур приводились к одной начальной температуре (своей для каждого датчика) в серии пусков при различных давлениях добавлением ко всем показаниям разности начальных и средних по серии значений.

На рис. 4 представлены давления, измеренные в ресивере и приемной емкости (падающие и восходящие кривые соответственно). Точками на рисунках отмечено время начала выравнивания давления (режима равновесия) во всех емкостях. Характер поведения

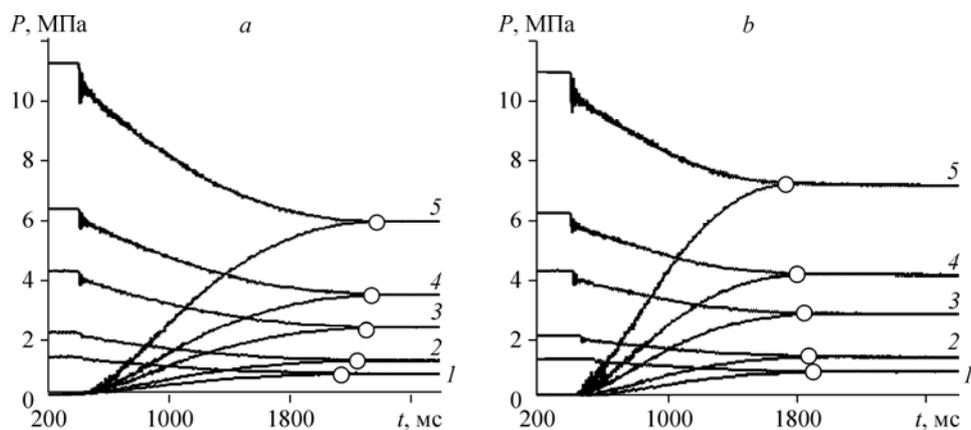


Рис. 4. Давление в ресивере и приемной емкости (падающие и восходящие кривые соответственно) при различных начальных давлениях в ресивере.

a — холодные пуски, *b* — горячие пуски, символы — время достижения равновесия.

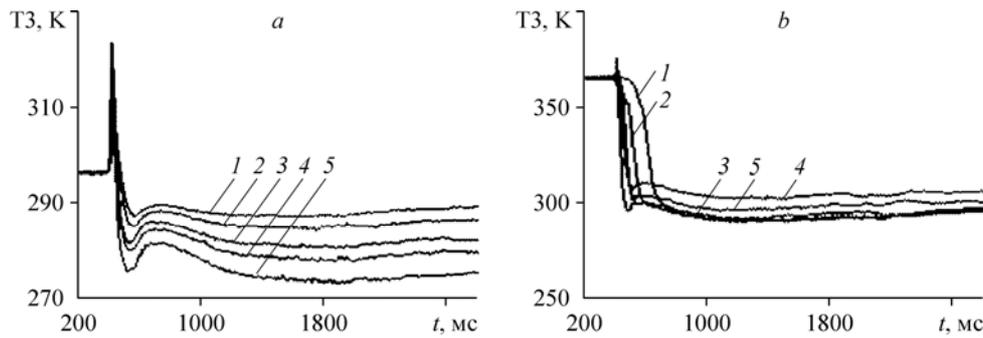


Рис. 5. Температура в трубопроводе перед омическим подогревателем T3 при различных начальных давлениях в ресивере.

a — холодные пуски, *b* — горячие пуски.

давлений достаточно предсказуем и на рисунке видно, что с ростом давления в холодных пусках время выхода на равновесный режим растет, но достаточно быстро стремится к некоторому пределу, а в горячих пусках выход на равновесный режим уменьшается с ростом давления. Начиная с рис. 4 и далее номера кривых представляют пуски с различными давлениями: 1,22 (1), 2,03 (2), 4,05 (3), 6,08 (4) и 10,13 (5) МПа, буквами (*a*) и (*b*) обозначены холодные и горячие пуски соответственно.

Рассмотрим поведение температуры рабочего газа по мере прохождения им всей последовательности емкостей и трубопроводов. В начальный момент времени до открытия клапана 4 (рис. 2) во всей следующей за ним системе трубопроводов и емкостей стэнда давление равнялось атмосферному. При прохождении высокого давления по всей этой системе в каждой из отдельных ее частей сначала происходил нагрев газа из-за адиабатического сжатия, что и показывают приведенные далее результаты экспериментов. На рис. 5 приведены показания датчика температуры T3, расположенного в трубопроводе перед омическим подогревателем, при различных начальных давлениях в ресивере. В случае холодных пусков при ($t \sim 420$ мс) возникает скачок температуры газа в трубопроводе и тем выше, чем больше начальное давление в ресивере. Затем сильное охлаждение рабочего газа в ресивере из-за его расширения при вытекании приводит к соответствующему уменьшению температуры в трубопроводе. Для горячих пусков небольшой заброс температуры (выше общего горячего фона ~ 365 К) из-за предварительного прогрева газа в подогревателе и подводящем трубопроводе происходит, начиная с начального давления в ресивере выше 4 МПа, кроме того, холодный воздух из ресивера также компенсирует излишнее тепло в трубопроводе.

На рис. 6 приведены показания датчика температуры T5, расположенного сразу за омическим подогревателем. Видно, что для холодных пусков начальный скачок температуры

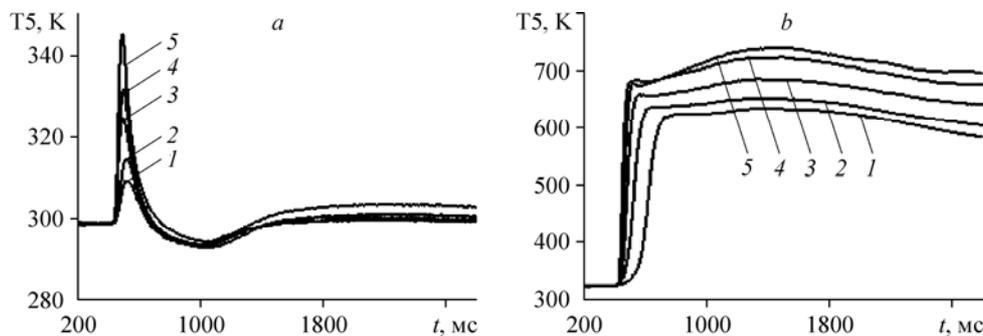


Рис. 6. Температура в трубопроводе после омического подогревателя T5 при различных начальных давлениях в ресивере.

a — холодные пуски, *b* — горячие пуски.

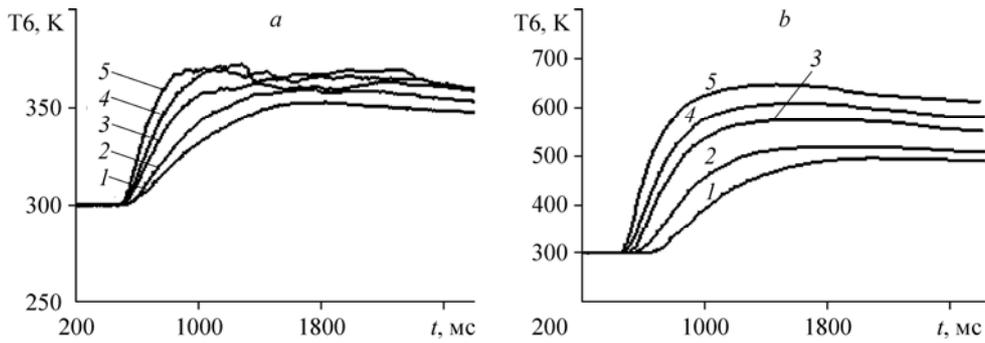


Рис. 7. Температура в приемной емкости Т6 при различных начальных давлениях в ресивере.
a — холодные пуски, *b* — горячие пуски.

еще больше возрастает при увеличении начального давления в ресивере, но из-за большой площади внутренней поверхности теплообменника подогревателя, этот скачок практически не оказывает влияния на температуру рабочего газа на выходе из подогревателя вблизи режима равновесия. Для горячих пусков увеличение начального давления в ресивере приводит к уменьшению времени прогрева рабочего газа и к увеличению его конечной температуры.

На рис. 7 приведены показания датчика температуры Т6, расположенного в начальной части бокового баллона приемной емкости. Для холодных пусков рост температуры объясняется адиабатическими процессами дополнительного поджатия рабочего газа, а его величина определяется начальным давлением в ресивере. Для горячих пусков происходит, наоборот, охлаждение рабочего газа из-за теплоотдачи в стенки приемной емкости, потери температуры составляют порядка 100 К.

Датчики температуры Т7 и Т8, результаты для которых приведены на рис. 8 и 9 соответственно, показывают похожее поведение температуры рабочего газа, только градиенты температуры у них значительно меньше, что определяется наличием экранов.

На рис. 10 приведены общие характеристики полученных результатов: равновесное давление рабочего газа в приемной емкости и его температура в различных частях стэнда в зависимости от начального давления в ресивере. Пунктирной линией представлены результаты холодных пусков, а сплошной — горячих. Рисунок 10*a* показывает достигнутое равновесное значение давления в системе и время его достижения, а рис. 10*b* отражает показания датчиков температуры. Видно, что для нагрева рабочего газа до температур ~ 350–450 К можно обойтись без подогревателя, и что температура рабочего газа в приемной емкости для горячих пусков возрастает с увеличением начального давления в ресивере.

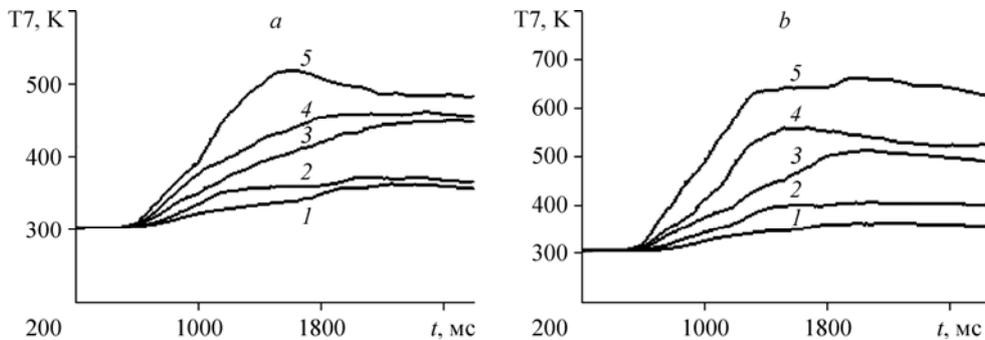


Рис. 8. Температура в приемной емкости Т7 при различных начальных давлениях в ресивере.
a — холодные пуски, *b* — горячие пуски.

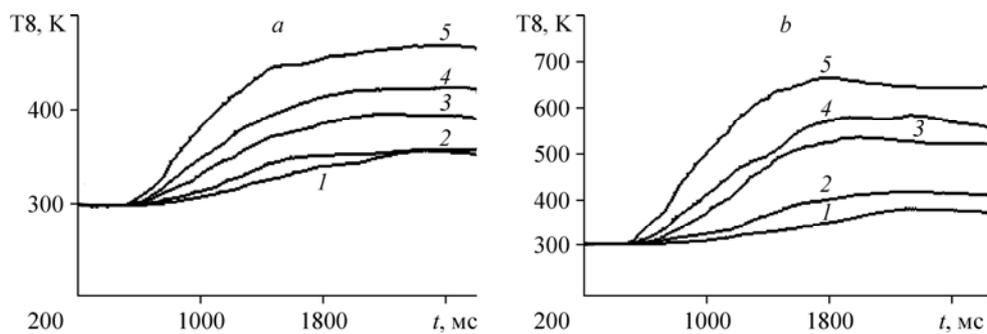


Рис. 9. Температура в приемной емкости Т8 при различных начальных давлениях в ресивере.
a — холодные пуски, *b* — горячие пуски.

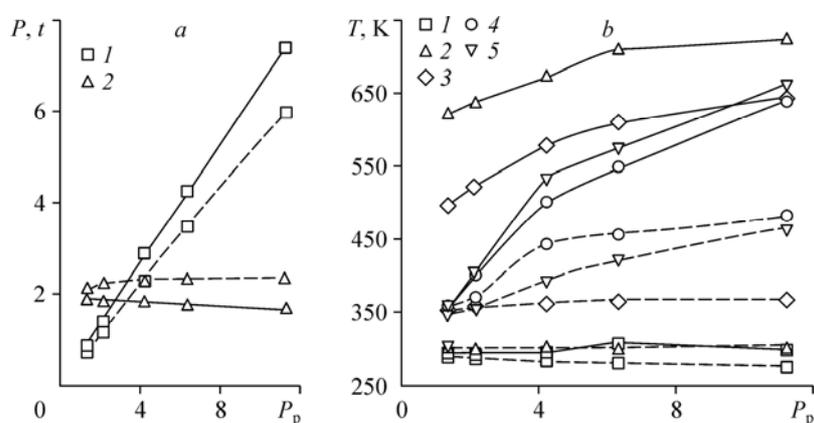


Рис. 10. Давление в приемной емкости и время достижения равновесного состояния (*a*) и показания датчиков температур Т3–Т8 в зависимости от начального давления в ресивере в момент времени достижения равновесия давлений (*b*).

a: 1 — давление (МПа), 2 — время (с); *b*: 1 — Т3, 2 — Т5, 3 — Т6, 4 — Т7, 5 — Т8.

Заключение

Из проведенных динамических испытаний омического подогревателя следуют следующие выводы:

- температура рабочего газа при работе подогревателя возрастает при повышении давления проходящего через него газа;
- для нагрева рабочего газа в пределах 350–450 К можно обойтись процессом адиабатического сжатия без затраты энергии на нагрев подогревателя;
- подбирая начальное давление в ресивере и длительность подачи рабочего газа, можно получить заданные его параметры (давление и температуру) для дальнейшего использования в экспериментах.

Авторы благодарны начальнику установки АТ-303 А.В. Новикову и ушедшему из жизни ведущему специалисту А.Б. Михайлову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

1. **Звегинцев В.И.** Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
2. **Омичские** подогреватели и регенераторы для аэродинамических труб: сб. статей // Тр. ЦАГИ. 1969. Вып. 1115. 98 с.
3. **Репик Е.У., Соседко Ю.П.** Методы и средства измерения температуры торможения газового потока в сложных условиях течения // Уч. записки ЦАГИ. 2008. Т. XXXIX, № 4. С. 60–71
4. **Гаркуша В.В., Гилев В.М., Мишнев А.С., Шпак С.И., Яковлев В.В.** Автоматизированная система управления и сбора данных высокоскоростной аэродинамической трубы кратковременного действия // Междунар. журн. экспериментального образования. 2014. № 11. Ч. 1. С. 25–27.
5. **Гилев В.М., Звегинцев В.И., Шиплюк А.Н., Шпак С.И., Гаркуша В.В., Мишнев А.С., Яковлев В.В.** Автоматизированное управление источником рабочего газа гиперзвуковой аэродинамической трубы // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 11. Ч. 1. С. 49–51.

Статья поступила в редакцию 31 марта 2016 г.