УДК 53.083.72

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УДАРНЫХ ТРУБ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СИ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ

С.М. Гаврилкин, И.Н. Темницкий, Б.В. Юрьев, А.Н. Щипунов, О.В. Авдеенко

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московской обл.
gavrilkin@vniiftri.org, yu@vniiftri.ru, schipunov@vniiftri.ru, avdeenko@vniiftri.ru

В статье описаны исследования, выполненные в лаборатории измерений давлений ФГУП «ВНИИФТРИ» по разработке экспериментального образца эталона единицы импульсного давления. Представлены экспериментальные данные по исследованию метрологических характеристик ударной трубы [1] как составной части эталона. На основании экспериментальных данных выявлены основные влияющие факторы и предложены способы их минимизации.

Ключевые слова: ударная труба, ударная волна, отраженная ударная волна, импульсное давление, неопределенность.

Введение

Измерение высоких давлений в неравновесных условиях, где давление быстро изменяется с течением времени, имеет место во многих областях промышленности, включая аэрокосмическую, атомную, химическую, автомобильную и другие, чьи производственные процессы требуют точного мониторинга давления. В настоящее время многие средства измерения высокого давления, предназначенные для регистрации динамических процессов, калибруются в статических условиях [2]. Такое положение сложилось из-за отсутствия стандартизованных процедур калибровки и эталонов, воспроизводящих высокие динамические давления.

Ударная труба с источником высокого давления в виде сжатого газа является устройством, которое позволяет получать однократные импульсы давления в виде ступеньки с прямым передним фронтом. Передний фронт ударной волны можно считать идеальным в диапазоне давлений до 5 МПа для азота и воздуха и до 20 МПа для инертных газов. Эти ограничения по давлению для молекулярных газов связаны с диссоциацией молекул азота и кислорода при высоких температурах, возникающей в ударных волнах при сжатии газа. При более высоких давлениях, а следовательно, и температурах, влияние на форму и ширину фронта будет оказывать ионизация атомов. Ширина фронта ударной волны в идеальном случае не превышает двух длин свободного пробега молекул газа в исходном состоянии перед ударной волной, т. е. длительность переднего фронта импульса давления меньше микросекунды. Длительность переднего фронта импульса давления при других методах генерации импульсов, таких как метод копра и быстродействующий клапан, находится в диапазоне от нескольких миллисекунд до десятков

и сотен миллисекунд.

Описание экспериментального образца

Экспериментальный образец ударной трубы был изготовлен на основе промышленных труб для гидравлических систем. Конструкция ударной трубы рассчитана на воспроизведение однократного импульса давления до 10 МПа с длительностью участка постоянного давления 5 мс в проходящей ударной волне и 2 мс в отраженной ударной волне. Экспериментальный образец ударной трубы предполагается использовать для определения переходных характеристик быстродействующих датчиков импульсного давления.

На рис. 1 показана функциональная схема ударной трубы. Ударная труба состоит из двух камер, изготовленных из труб с внутренним диаметром 80 мм. Первая камера, камера высокого давления (КВД), отделена от второй камеры, канала низкого давления (КНД), мембранным узлом, который позволяет создавать различные начальные давления в каждой из камер ударной трубы.

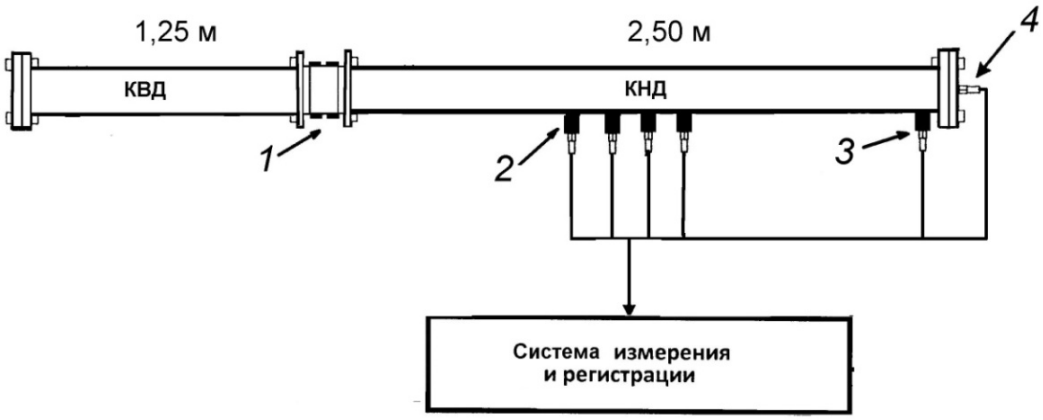

Рис. 1. Ударная труба: *1* – мембранный узел; *2*, *3* и *4* – места установки датчиков в канале низкого давления

Возможности использования ударной трубы для калибровки СИ импульсного давления изучались на примере тензорезистивных датчиков ХТ-190М и HKS375 (фирмы Kulite, США) с преобразователем сигнала ПС-1 и пьезоэлектрических датчиков 113В26 (фирмы PCB Piezotronics, США) с преобразователем сигнала 482А21.

Для регистрации сигналов с датчиков давления использовали цифровой осциллограф NI PXI-5922, а интервал времени τ прохождения

фронта ударной волны на известной базе между двумя датчиками измеряли с помощью осциллографа Tektronix TDS 2024.

В качестве разрывных мембран применялись пленки марки ПЭТ-Э ГОСТ 24234-80 толщиной от 10 до 750 мкм. Эти пленки позволили с хорошей воспроизводимостью получать амплитуду давления за фронтом ударной волны в диапазоне от 10 кПа до 2500 кПа. Для получения более высоких давлений в ударной волне использовали мембраны из алюминия толщиной от 1,2 до 3,5 мм. Однако оказалось, что чистоты алюминия 99,5 % недостаточно для воспроизводимости механизма разрушения мембраны. Попадание кусков мембраны после разрушения в поток газа изменяло форму и амплитуду импульса давления, поэтому на данном этапе выполнения работ исследования с давлениями выше 2,5 МПа не проводились.

Теория ударных волн

На рис. 2 показана схема распространения ударных волн и волн разрежения в ударной трубе после разрыва мембраны. Цифрами указаны зоны существования постоянного давления. Давления в зонах 2 и 5 одинаковы, а различаются только температуры. В зоне 2 находится ударно-сжатый газ с высокой температурой, а в зоне 5 – газ, вытекающий из камеры высокого давления, с низкой температурой. На рис. 1 показано, что места установки датчиков в канале низкого давления соответствуют наибольшей длительности постоянного давления в зонах 2–5 за проходящей ударной волной и в зоне 3 – за отраженной ударной волной.

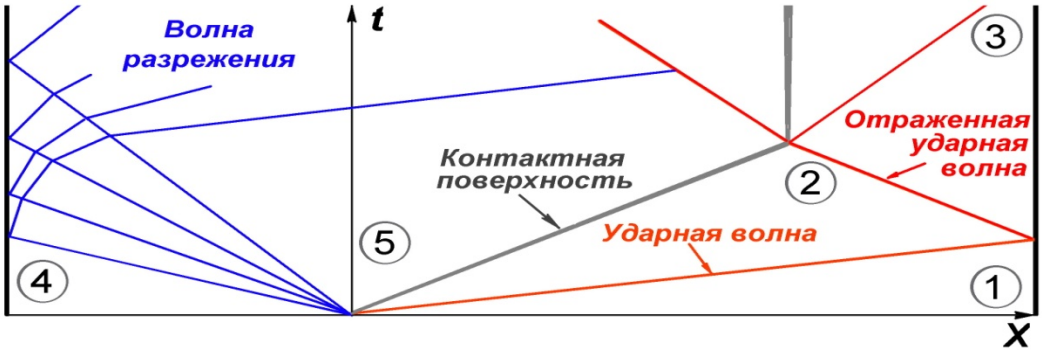

Рис. 2. Схема распространения ударных волн и волн разрежения в ударной трубе после разрыва мембраны

Генерация ударной волны происходит при разрушении мембраны в мембранном узле, разделяющей газ, заполняющий при высоком давлении КВД, и газ в КНД. Мембрана разрушается при подаче избыточного давления P_4 в КВД и достижении на мембране определенного перепада давлений ($P_4 - P_1$), зависящего от материала, толщины и бездефектности мембраны. При

этом в КНД формируется ударная волна, распространяющаяся с постоянной скоростью V. По газу, заполняющему КВД, в обратную сторону распространяется волна разрежения. Между ударной волной и контактной поверхностью, движущейся вместе с газом со скоростью U, образуется «пробка» ударно сжатого газа с давлением P_2, длина «пробки» нарастает по мере распространения ударной волны. Достигнув торцевого фланца КНД, ударная волна отражается от него и движется в обратную сторону с постоянной скоростью $V_{отр}$, оставляя за собой область покоящегося газа с давлением P_3. При этом давление за отраженной волной P_3 возрастает в несколько раз по сравнению с давлением P_2 за падающей ударной волной.

Значения давления P_2 на фронте сформировавшейся (проходящей) ударной волны и давления P_3 в отраженной ударной волне, а также соотношение для оценки числа Маха M получены из уравнений сохранения массы, импульса и энергии газа на фронте ударной волны [1]:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{2\gamma_1 M^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1}. \quad (1)$$

$$P_3 = P_1 \cdot \frac{2\gamma_1(3\gamma_1 - 1)M^4 - (7\gamma_1 - 1)(\gamma_1 - 1)M^2 + 2(\gamma_1 - 1)^2}{(\gamma_1^2 - 1)M^2 + 2(\gamma_1 + 1)}. \quad (2)$$

$$P_4 = P_1 \cdot \frac{2\gamma_1 M^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1} \cdot \left(\frac{c_1}{c_4}\right) \cdot \left(\frac{M^2 - 1}{M}\right)\right)^{-\frac{2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}}. \quad (3)$$

$$M = \frac{V}{c_1}, \quad (4)$$

где c_1 и c_4 – скорости звука в газах КНД и КВД соответственно, а γ_1 и γ_4 – показатели адиабаты газов КНД и КВД.

Скорость звука в газе в зависимости от температуры T_0 определяется по формуле

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{\mu}}, \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T_0 – абсолютная температура газа, μ – молекулярная масса газа.

Температура T_0 и давление P_1 измеряются в КНД перед разрушением мембраны.

Для определения скорости V ударной волны измеряется время τ прохода волной базового расстояния L между двумя индикаторами, размещенными в боковой стенке ударной трубы.

$$V = \frac{L}{\tau}. \tag{6}$$

Рассмотрим основные составляющие погрешности воспроизведения амплитуды импульсного давления в ударных трубах, исходя из системы уравнений (1–6) для идеального газа.

Относительная погрешность числа Маха M для ударной волны, определяемая погрешностями измерения температуры газа в КНД, измерения расстояния между датчиками и измерения временного интервала прохождения ударной волны базового расстояния между датчиками, равна:

$$\frac{\delta M}{M} = \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \tau}{\tau} + \frac{\delta T_0}{2T_0}. \tag{7}$$

Относительные погрешности определения давлений в проходящей ударной волне и отраженной ударной волне определяются из формул (1) и (2) и соответственно равны:

$$\frac{\delta P_2}{P_2} = \frac{4\gamma_1 M^2}{2\gamma_1 M^2 - (\gamma_1 - 1)} \cdot \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta P_1}{P_1}. \tag{8}$$

$$\frac{\delta P_3}{P_3} = \frac{4M^2(M^4\gamma(\gamma-1)(3\gamma-1) + 4M^2\gamma(3\gamma-1) - (7\gamma-1)(\gamma-1) - (\gamma-1)^3)}{(2M^4\gamma(3\gamma-1) - M^2(7\gamma-1)(\gamma-1) + 2(\gamma-1)^2)((\gamma-1)M^2+2)^2} \cdot \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta P_1}{P_1}. \tag{9}$$

Расчет показал, что в диапазоне давлений до 10 МПа относительные погрешности определения давления в ударной волне, полученные по формулам (7) и (8), меньше 0,6 %, а относительные погрешности определения давления в отраженной ударной волне, полученные по формулам (7) и (9), меньше 1 %. Основной вклад в вышеуказанные погрешности вносит определение момента прохождения фронта ударной волны через индикаторы при измерении времени прохода волной базового расстояния.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов $\alpha_2 = \dfrac{4\gamma_1 M^2}{2\gamma_1 M^2 - (\gamma_1 - 1)}$ и $\alpha_3 = \dfrac{4M^2(M^4\gamma(\gamma-1)(3\gamma-1)+4M^2\gamma(3\gamma-1)-(7\gamma-1)(\gamma-1)-(\gamma-1)^3)}{(2M^4\gamma(3\gamma-1)-M^2(7\gamma-1)(\gamma-1)+2(\gamma-1)^2)((\gamma-1)M^2+2)^2}$ при члене $\dfrac{\delta M}{M}$ в формулах (8) и (9) от показателя адиабаты газа и числа Маха.

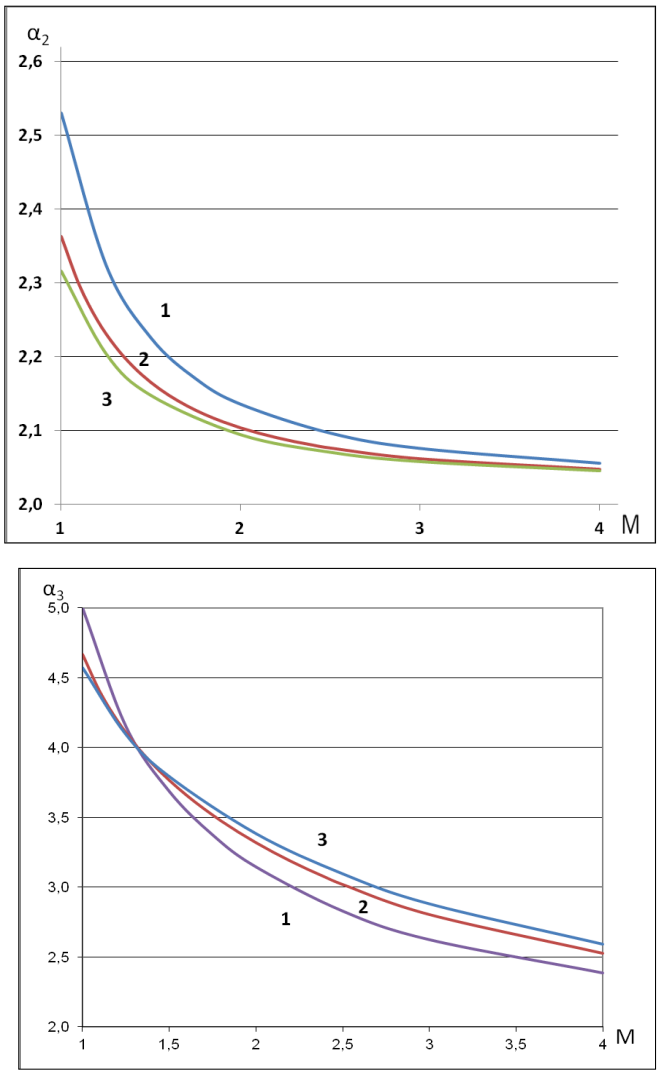

Рис. 3. Зависимости коэффициентов α_2 (слева) и α_3 (справа) при члене $\dfrac{\delta M}{M}$ в формулах (8) и (9) от показателя адиабаты газа и числа Маха (*1* – одноатомный газ, *2* – двухатомный газ, *3* – многоатомный газ)

Из представленных на рис. 3 результатов следует, что зависимость относительной погрешности от показателя адиабаты является слабой, и при расчетах относительной погрешности определения давлений P_2 и P_3 в диапазоне чисел Маха, реализуемых на ударных трубах описываемого типа, можно пользоваться упрощенными формулами:

$$\frac{\delta P_2}{P_2} = \alpha_2 \cdot \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta P_1}{P_1} \quad (\alpha_2 = 2...2{,}5 \text{ в зависимости от M}). \qquad (10)$$

$$\frac{\delta P_3}{P_3} = \alpha_3 \cdot \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta P_1}{P_1} \quad (\alpha_3 = 2...4{,}5 \text{ в зависимости от M}). \qquad (11)$$

Экспериментальные исследования

На рис. 4 и 5 показаны профили давлений за проходящей и отраженной ударными волнами. Расчетные значения импульсного давления, основанные на измерении скорости стационарной ударной волны и полученные по уравнениям (1) и (2), совпадают со значениями давления, полученными с помощью датчиков импульсного давления. Из-за колебаний амплитуды давления при измерении датчиками, измеренное импульсное давление определялось, как среднее арифметическое значение в интервале 0,5 мс, взятом через 0,1 мс после прохождения фронта ударной волны.

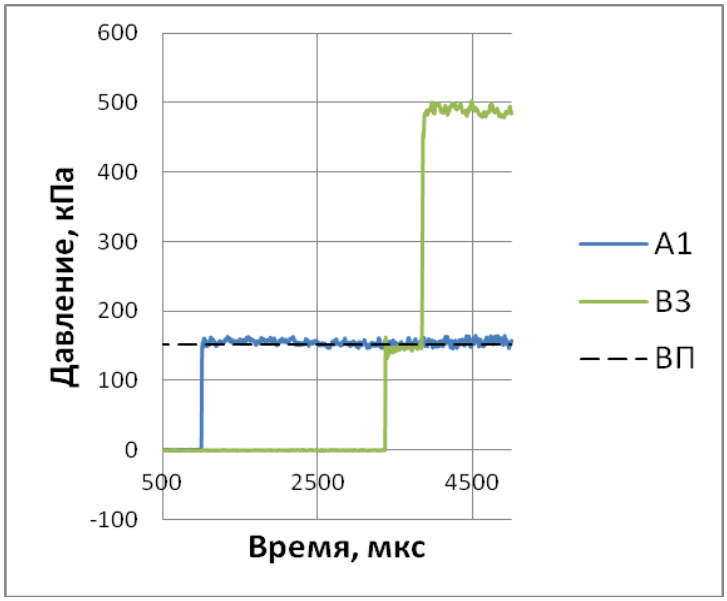

Рис. 4. Давление за проходящей ударной волной: ВП – расчетное значение; A1 – датчик 113В26 (место установки 2 по рис. 1); B3 – датчик 113В26 (место установки 3 по рис. 1)

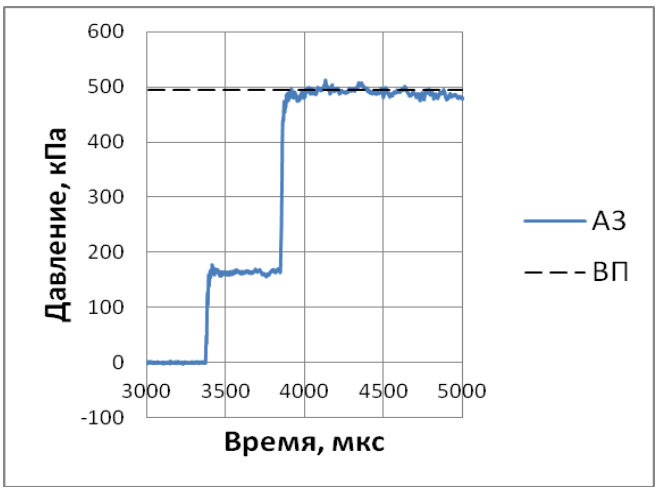

Рис. 5. Давление за отраженной ударной волной: ВП – расчетное значение;
А3 – датчик 113В26 (место установки 3 по рис. 1)

Рассчитанное по экспериментальным данным в диапазоне давлений до 2,5 МПа относительное среднеквадратическое отклонение измеренного значения импульсного давления от расчетного значения давления равно 1,8 %. Изменение интервала при усреднении данных не повлияло на полученное значение среднеквадратического отклонения.

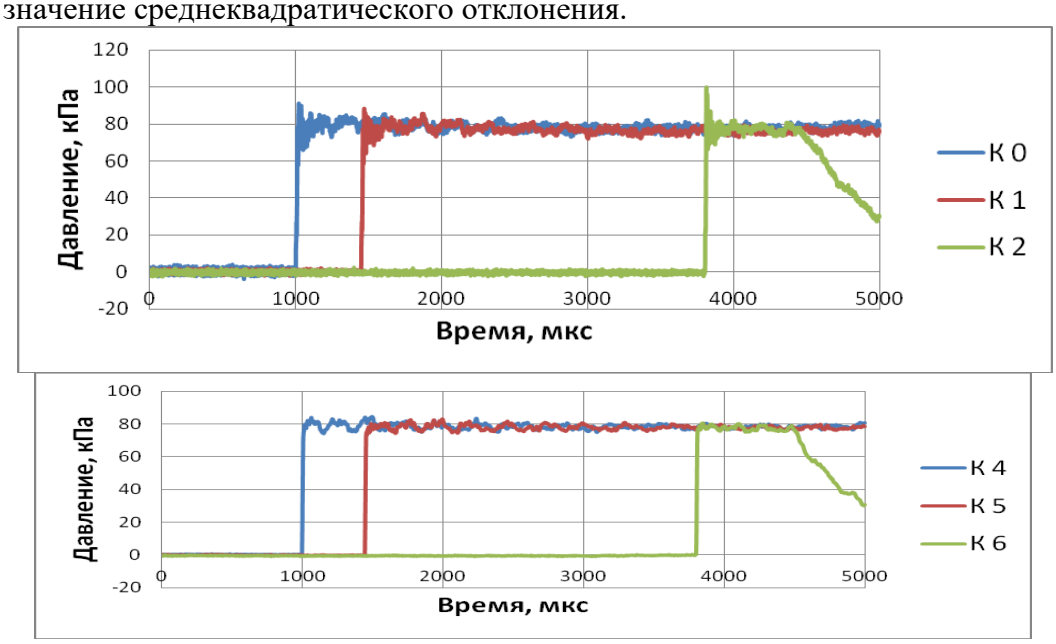

Рис. 6. Профиль давления за проходящей ударной волной с открытым торцом ударной трубы:
датчики ХТ190М (места установки датчиков 2 – К0 и К1, 3 – К2 по рис. 1);
датчики 113В26 (места установки датчиков 2 – К4 и К5, 3 – К6 по рис.1)

Рассмотрим, какие еще влияющие факторы действуют при воспроизведении единицы импульсного давления. На рис. 6 представлены профили давления, полученные двумя типами датчиков. Датчики на ударной трубе устанавливались на всем пути следования стационарной ударной волны: от места формирования и до выхода из ударной трубы. Профили давления, полученные тензорезистивными и пьезоэлектрическими датчиками, установленными попарно в трех сечениях ударной трубы, в целом совпадают. Видимые на рисунках различия в профилях давления связаны с конструкцией чувствительных элементов датчиков. Оба типа датчиков показали периодическое изменение амплитуды давления за проходящей ударной волной. В месте формирования стационарной волны амплитуда этих колебаний в 2–3 больше, чем в месте выхода ударной волны из трубы. При увеличении давления в ударной волне до 500 кПа разница в амплитуде колебаний исчезает. Это связано с тем, что при формировании сильных ударных волн место формирования ударной волны с увеличением давления перемещается ближе к мембранному узлу.

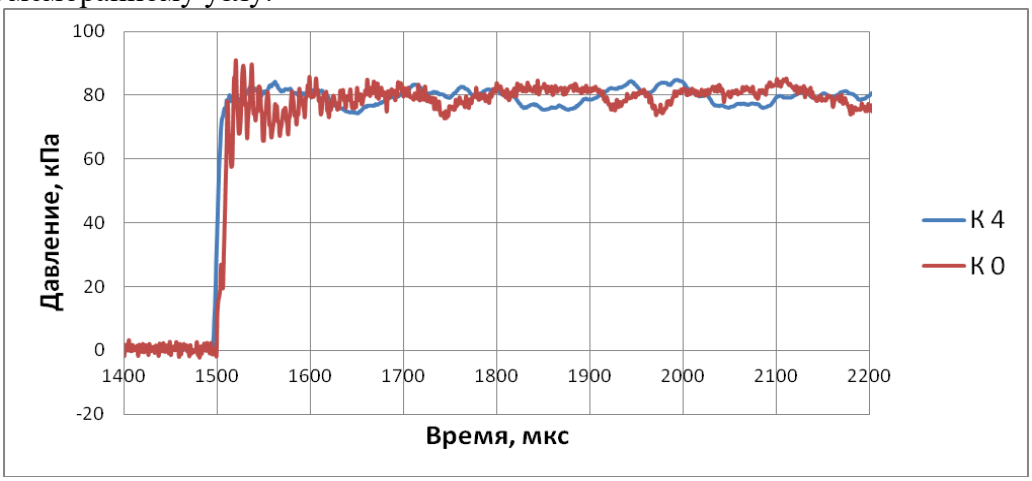

Рис. 7. Профиль давления за проходящей ударной волной. К0 – датчик ХТ190М (место установки 1 по рис. 1); К4 – датчик 113В26 (место установки 1 по рис. 1)

На рис. 7 видно, что тензорезистивные датчики ХТ190М имеют вторую резонансную частоту ~130 кГц, связанную с имеющимся в конструкции датчика «мертвым» объемом (объем внутри датчика между входным отверстием датчика и чувствительным элементом). Резонансная частота мембраны чувствительного элемента этих датчиков больше 500 кГц.

Кварцевые пьезоэлементы датчиков 113В26 находятся сразу за стальной мембраной, поэтому эти датчики имеют только одну резонансную частоту и более удобны для наших исследований. Колебания амплитуды давления за ударным фронтом, показанные на рис. 7, вызваны поперечными волнами, образующимися на стадии формирования стационарной ударной волны

после разрыва мембраны. Частота этих колебаний давления зависит от диаметра ударной трубы, амплитуды давления в ударной волне и состава газа. Для исследуемой ударной трубы эта частота лежит в диапазоне 5–20 кГц.

Несовпадение профилей давления поперечных волн, полученных с симметрично установленных на ударной трубе датчиков, свидетельствует о несимметричности и неоднородности течений за фронтом ударной волны.

Пример разрушенной мембраны показан на рис. 8. Все отработанные мембраны имеют такую же форму. Мембраны разрушены только в центральной части, поэтому часть площади мембраны является помехой течению газа при формировании ударной волны.

Рис. 8. Вид мембраны после разрушения

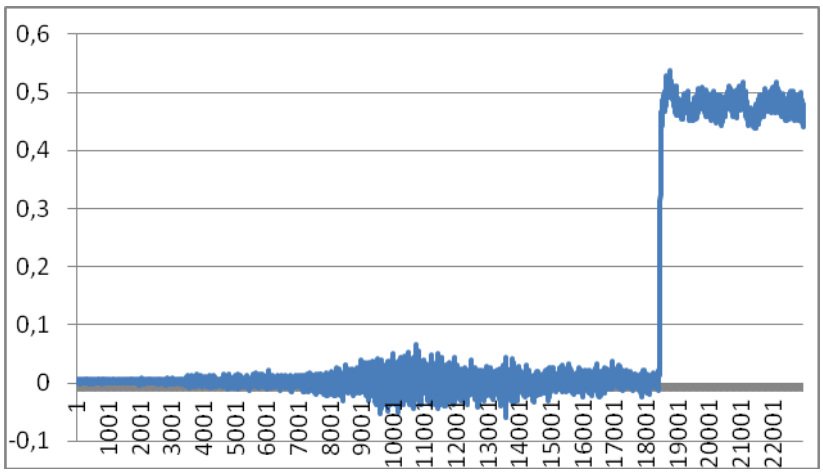

Рис. 9. Профиль сигнала датчика давления с предвестником

Для увеличения эффективной площади мембраны и минимизации влияния механизма разрыва мембраны на давление в ударной волне была разработана новая конструкция мембранного узла и КВД.

При давлениях в проходящей ударной волне больше 500 кПа на профилях давления, регистрируемых датчиками, виден предвестник. Предвестник показан на рис. 9. Этот сигнал с датчиков давления связан с вибрацией в месте крепления датчиков. Вибрация в стенках трубы возникает при воздействии на поверхность трубы сильной ударной волны и распространяется по материалу трубы со скоростью звука в стали, т.е. быстрее, чем ударная волна в газе.

Для снижения влияния вибрации на датчик требуется разработка специальных гнезд крепления датчиков из материалов с отличной от стали акустической жесткостью или изготовление КНД в виде нескольких акустически развязанных секций.

Заключение

При исследовании метрологических характеристик ударной трубы были выявлены два основных влияющих фактора, связанные с конструкцией ударной трубы и материалом мембраны:

1. Особенности механизма разрыва мембраны, которые задают амплитуду периодического изменения давления за фронтом ударной волны.

2. Вибрация стенок ударной трубы под действием формирующейся ударной волны, которая передается к местам крепления датчиков.

Метрологические характеристики ударной трубы, полученные на основе экспериментальных данных, представлены в таблице.

Таблица

Метрологические характеристики ударной трубы

Наименование характеристики	Значение
Диапазон воспроизводимого импульсного давления, кПа	10 ... 2500
Погрешность воспроизведения единицы импульсного давления, %, не более	± 5
Относительное среднее квадратическое отклонение измеренного импульсного давления от расчетного давления, %, не более	± 2
Диапазон давлений в камере высокого давления, МПа, не более	10
Диапазон длительностей импульса давления: проходящая ударная волна отраженная ударная волна	 $5 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-3}$
Крутизна нарастания переднего фронта воспроизводимого импульсного давления, мкс, не более	0,5

Работа выполнена в рамках НИР «Проведение исследований в области измерений давления по разработке экспериментального образца измерительной установки воспроизведения высоких импульсных давлений с улучшением метрологических характеристик Государственного первичного эталона единицы давления».

Литература

1. Гейдон А., Герл И. Ударные трубы в химической физике высоких температур. – М.: Мир, 1966.
2. Боровков И.Т., Кузнецов Д.И., Секоян С.С., Щипунов А.Н., Асланян А.Э., Гаврилкин С.М. Создание Государственного первичного эталона единицы давления в диапазоне 10 – 1600 МПа и единицы эффективной площади поршневых пар грузопоршневых манометров в диапазоне 1 – 0,005 см^2// Измер. техника, 2014, №11, с. 7-10.