

УДК 539.3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСКРЫТИЯ ЛЕПЕСТКОВЫХ РАЗРЫВНЫХ ДИАФРАГМ ЛЕГКОГАЗОВЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

© Сергей Иванович Герасимов^{1,2}, Владимир Иванович Ерофеев²,
Иван Игоревич Каньгин¹, Николай Васильевич Лапичев¹

¹Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

s.i.gerasimov@mail.ru

³Институт проблем машиностроения, Нижний Новгород, Россия

erf04@sinn.ru

Аннотация. Предложена методика расчета давления раскрытия лепестковых диафрагм, служащих исполнительными элементами узлов форсирования легкогазовых баллистических установок. Проведено сравнение расчетных данных с данными экспериментов, выполненных на газодинамическом стенде.

Ключевые слова: лепестковая диафрагма, баллистическая установка, давление раскрытия.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF DISCLOSURE PETAL RUPTURE DIAPHRAGMS LIGHT GAS BALLISTIC INSTALLATIONS

© S.I. Gerasimov^{1,2}, V.I. Erofeev², I.I. Kanigin¹, N.V. Lapichev¹

¹Sarovski Physico-Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Russia

s.i.gerasimov@mail.ru

²Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia.

erf04@sinn.ru

Abstract. The methods of calculating the pressure of the disclosure aperture radar, officials of the executive elements of the nodes of forcing legmagasabb ballistic installations. The comparison of calculated data with experimental data performed on a gas-dynamic stand.

Keywords: blade diaphragm, ballistic installation, opening pressure.

Введение

Достоверное знание давления форсирования метаемого объекта (МО) в стволе легкогазовой баллистической установки (ЛГУ) позволяет:

- с достаточной точностью прогнозировать величины давления в форкамере и нагрузок, действующих на метаемый объект;
- исключить несанкционированное срабатывание узла форсирования при заполнении ЛГУ рабочим газом.

Исполнительным элементом в узлах форсирования ЛГУ, как правило, является лепестковая разрывная диафрагма, механизм работы которой рассмотрен в ряде работ [1–4] и трактуется в части учета изменений прочностных характеристик материала диафрагмы вследствие коротких времен ее нагружения весьма неоднозначно.

Методика расчета давления раскрытия диафрагмы с надрезами в статической постановке

Используемые в ЛГУ диафрагмы (рис. 1) представляют собой диски с отношением H/D

$= 0,01-0,08$, с одной стороны которых выполнены 4 надреза под углом 45° друг к другу. Диафрагмы, как правило, изготавливаются из нержавеющей листовой стали 12Х18Н10Т ($\sigma_b = 620-640$ МПа, $\sigma_m = 300$ МПа), выбор которой обусловлен ее высокой пластичностью (исключение обрыва лепестков) и прочностью (возможность получения на тонких диафрагмах высоких давлений форсирования). Сведения об использовании нержавеющей сталей для диафрагм содержатся и в иностранных источниках [5, 6].

На рис. 1 представлена расчетная схема. Диафрагма показана в исходном состоянии и в фазе раскрытия, характеризующегося появлением щели в зоне схождения лепестков. Диафрагма диаметром D и толщиной H разделена надрезами шириной b_0 и толщиной перемычек δ_0 на 8 лепестков. L – длина лепестка; d_0 и d – диаметры площадки в центре диафрагмы в начальном и конечном состоянии; α – угол разворота лепестка; φ – угол полураствора лепестка; ψ – угол развала лепестка.

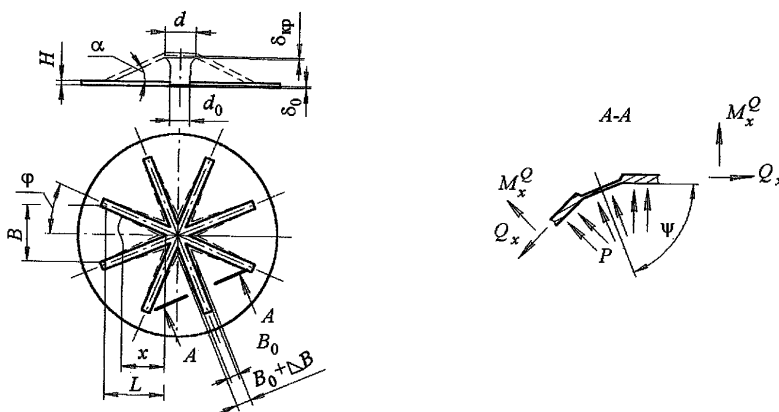


Рис. 1. Расчетная схема диафрагмы с надрезами.

Под действием давления P происходит разворот лепестка, которому препятствуют связи с соседними лепестками. Изгибающий момент в сечении, отстоящем на расстоянии x

от начала лепестка, может быть вычислен как $M_x^p = \frac{x^3}{3} P \operatorname{tg} \varphi$.

Парирующий момент связей перемычек определяется следующим образом. Так как согласно [6] соотношение между напряжениями σ и относительными деформациями ε в зоне надреза в тангенциальном направлении в пластической области может быть принято в виде

$$\sigma = k \varepsilon^n, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность напряжения, а n – экспонента, характеризующая жесткость материала диафрагмы, для сечения x относительная

деформация определяется из выражения $\varepsilon_x = \frac{\Delta b x}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0} \left(1 - \frac{x}{L}\right)$.

Здесь Δb и $\Delta b x$ – приращение ширины надреза в начале лепестка и на расстоянии x от него в момент раскрытия диафрагмы.

Момент от пары сил Q в сечении x

$$M_x^Q = \frac{1}{3} k \delta_0 x^2 \frac{\cos \psi}{\cos \varphi} \left(\frac{\Delta b}{b_0}\right)^n \left[2 + \left(1 - \frac{x}{L}\right)^n\right].$$

Условие равновесия изогнутого лепестка может быть представлено в виде

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{3EJ} \left\{ x^3 P \operatorname{tg} \varphi - \kappa \delta_0 x^2 \frac{\cos \psi}{\cos \varphi} \left(\frac{\Delta b}{b_0} \right)^n \left[2 + \left(1 - \frac{x}{L} \right)^n \right] \right\}. \quad (2)$$

Интегрируя дважды при граничных условиях:

$$\begin{aligned} x = L & \quad \frac{du}{dx} = 0 \\ x = 0 & \quad u = L \sin \alpha \end{aligned}$$

и разрешая относительно P , получим

$$P_{\text{разр}} = \frac{12EJ \sin \alpha}{L^4 \operatorname{tg} \varphi} + \frac{12\kappa \delta_0 \left(\frac{\Delta b}{b_0} \right)^n \cos \psi \left[\frac{2}{4} + 0,167 \frac{\Gamma(n+i)}{i=1} \right]}{L \sin \varphi}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что для восьмилепестковой диафрагмы из стали 12Х18Н10Т $\varphi = 22^\circ 30'$ и $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и, учитывая то, что $\kappa \left(\frac{\Delta b}{b_0} \right)^n = \kappa \varepsilon_{\max}^n = \sigma_{\text{в}}$, уравнение (3) может быть приведено к виду

$$P_{\text{разр}} = 6 \cdot 10^6 \sin \alpha \frac{J}{L^4} + 6,7 \sigma_{\text{в}} \frac{\delta_0}{L} \cos \psi$$

при условии, что диаграмма σ – ε может быть описана зависимостью (1) с полученными авторами данной работы коэффициентами $K = 6,8 \cdot 10^2$ МПа и $n = 0,26$ (для сравнения, в работе [5] для нержавеющей стали марки 304 получены коэффициенты $K = 6,5 \cdot 10^2$ МПа и $n = 0,262$).

Далее полагая, что угол разворота лепестка α влияет на величину первого члена уравнения (4) лишь в диапазоне $0 < \alpha < \alpha^{\text{пл}}$, где $\alpha^{\text{пл}}$ – угол разворота лепестка, соответствующий образованию пластического шарнира в зоне заделки, найдем выражение для $\alpha^{\text{пл}}$

$$\alpha^{\text{пл}} = \int \frac{M^{\text{пл}}}{EJ} dx + c, \quad \text{где } M^{\text{пл}} = \sigma_{\text{т}} W_{\text{пл}} = \sigma_{\text{т}} \frac{BH^2}{4}.$$

Интегрируя при граничных условиях $x = L$, $\alpha = 0$, получим

$$\alpha^{\text{пл}} = \frac{\sigma_{\text{т}} L}{EH} = 2,86 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma_{\text{т}} L}{H}. \quad (5)$$

С учетом того, что величина $\alpha^{\text{пл}}$ не превышает 2 – 3° , а в момент времени раскрытия диафрагмы $\alpha p \gg \alpha^{\text{пл}}$ (рис. 2), давление ее разрушения может быть определено из соотношения

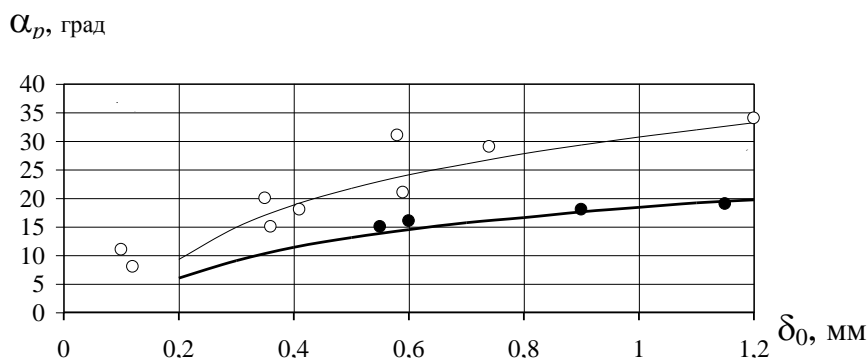


Рис. 2. Зависимости угла разворота лепестка в момент разрыва перемычки α_p от ее толщины δ_0 : • – эксперимент; — расчет (диафрагма ЛГУ калибра 50 мм); ○ – эксперимент; - - расчет (диафрагма ЛГУ калибра 23 мм).

$$P_{\text{разр}} = 6 \cdot 10^6 \frac{J}{L^4} \sin \left(2,86 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma_T L}{H} \right) + 6,7 \sigma_B \frac{\delta_0}{L} \cos \psi . \quad (6)$$

Угол развала лепестка ψ может быть определен из геометрии прогиба диафрагмы. При нагружении диафрагмы давлением P разворот лепестков сопровождается деформацией центральной площадки (рис. 1). Согласно [7]

$$\ln \left(\frac{\delta_0}{\delta_p} \right) = \left| -2 \ln \left(\frac{d}{d_0} \right) \right| \quad (7)$$

откуда

$$d = d_0 \sqrt{\frac{\delta_0}{\delta_p}} = 78,6 d_0 \sqrt{\delta_0} , \quad (8)$$

где d и d_0 – диаметры площадки на момент разрыва и в исходном состоянии; δ_p и δ_0 – толщины перемычек в зоне надрезов на момент разрыва и в исходном состоянии.

Экспериментальные зависимости $\frac{d_0}{d} = f(\delta_0)$, полученные авторами для двух типов диафрагм из стали 12X18Н10Т, отличающихся по H в 1,5 раза и по b_0 в 1,3 раз, в диапазоне $\frac{\delta_0}{H} = 0,1 - 0,8$ показывают (рис. 3), что для указанного диапазона величина δ_p практически постоянна и составляет $\delta_p = 1,62 \cdot 10^{-4}$ м.

Учитывая, что для восьмилепестковой диафрагмы d_0 и b_0 геометрически связаны соотношением $d_0 = 2,6b_0$, а угол развала лепестка ψ с углом разворота α соотношением

$$\psi = 90^\circ - \arcsin(0,38 \sin \alpha) , \quad (9)$$

где, в свою очередь,

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{d - d_0}{2L} \right) \quad (10)$$

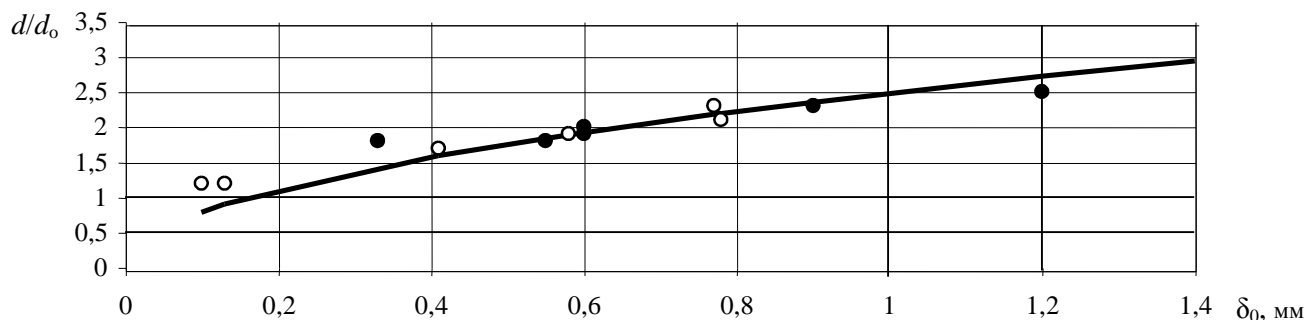


Рис. 3. Зависимость относительного увеличения диаметра площадки d/d_0 в центре диафрагмы в момент раскрытия от толщины перемычки δ_0 : • – эксперимент (диафрагма ЛГУ калибра 50 мм); о – эксперимент (диафрагма ЛГУ калибра 23 мм); — – расчет по формуле (8).

получим, используя формулу (6), зависимость давления разрыва диафрагмы из стали 12X18H10T от ее геометрических и прочностных параметров

$$P_{\text{разр}} = 6 \cdot 10^6 \frac{J}{L^4} \sin \left(2,86 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma_T L}{H} \right) + 2,6 \frac{\sigma_\epsilon \delta_0}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1,3b_0(78,6\sqrt{\delta_0} - 1)}{L} \right)^2}, \quad (11)$$

где $P_{\text{разр}}$ – давление разрыва диафрагмы, соответствующее давлению форсирования метаемого объекта в ЛГУ; $J = \frac{BH^3}{12}$ – момент инерции сечения в корневой части лепестка; B – ширина лепестка в корневой части; L – длина лепестка; H – толщина диафрагмы; δ_0 – толщина перемычки в надрезе; b_0 – ширина надреза; σ_ϵ и σ_T – пределы прочности и текучести материала диафрагмы.

Режим работы диафрагмы в ЛГУ

Общеизвестно, что механические свойства материала зависят от скорости деформации $\dot{\epsilon}$. При разрыве диафрагмы с надрезами в ЛГУ максимальные скорости деформаций $\dot{\epsilon}$ в процессе растяжения реализуются в центральной площадке и могут быть определены как

$$\dot{\epsilon} = 0,77 \frac{L}{b_0} \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt}. \quad (12)$$

Величины α и $\frac{d\alpha}{dt}$ есть результат решения уравнения вращательного движения лепестка. Представленное в [8] уравнение дополнено моментом, препятствующим изгибу лепестка за счет связей перемычек $M_{\text{св}}$, который не был учтен.

Таким образом, уравнение вращательного движения лепестка может быть записано в виде

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{M_\alpha - M_c - M_{\text{св}}}{J}, \quad (13)$$

где $M_\alpha = 0,17L^2BP(t)\cos\alpha(t)$ – момент, обусловленный давлением газа на диафрагму;

$M_c = 0,25\sigma_T BH^2$ – момент сопротивления изгибу лепестка в пластической области;

$M_{св} = 0,36L^2\delta_0\sigma_B \sin \alpha(t)$ – момент связей, полученный из второго слагаемого правой части уравнения (2) при $x = L$; $\varphi = 22^\circ 30'$; $J = 0,08\rho BHL^3$ – момент инерции лепестка.

Отсюда:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{2P(t)\cos\alpha(t)}{\rho HL} - \frac{3\sigma_T H}{\rho L^3} - \frac{4,28\sigma_B\delta_0 \sin\alpha(t)}{\rho HLB} \quad (14)$$

при заданном законе нагружения $P(t)$ и начальных условиях

$$\begin{cases} t_0 = t \left[p(t) = 1,5\sigma_T \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right]; \\ \alpha|_{t=t_0} = 0; \\ \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t=t_0} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Уравнение (14) решается с использованием соотношений (8) и (10) до момента времени $t = t_k$, которому соответствует величина $\alpha = \alpha_p$, определяемая из зависимости

$$\alpha_p = \arccos \left[1 - \frac{1,3b_0(78,6\sqrt{\delta_0} - 1)}{L} \right]. \quad (16)$$

Введение уравнений (12) и (14) в программу расчета внутрибаллистических параметров выстрела из ЛГУ позволяет определить $P(t)$, $\alpha(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$, характеризующих поведение диафрагмы при выстреле. На рис. 4 и 5 представлены расчетные зависимости $P(t)$, $\alpha(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$ для одной из диафрагм применительно к опытам на ЛГУ-200. Данная легкогазовая баллистическая установка имеет максимальную степень сжатия ≈ 200 .

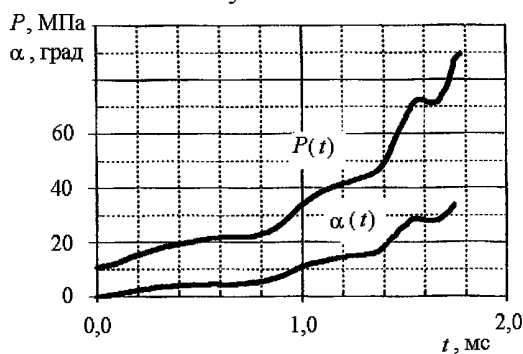


Рис. 4. Зависимости давления P , действующего на диафрагму, и угла разворота лепестка α от времени

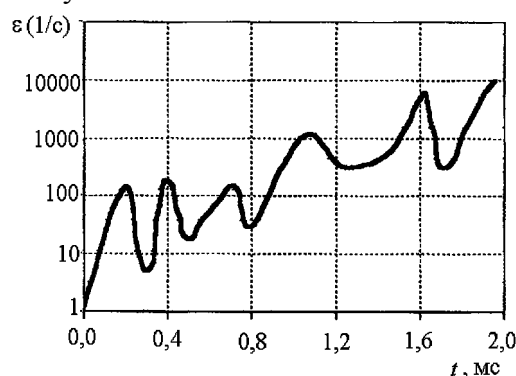


Рис. 5. Зависимость скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ центральной площадки диафрагмы от времени

К моменту времени $t = t_k$, соответствующему достижению $\alpha = \alpha_p$, давление газа P , действующее на диафрагму с погрешностью 3 % совпало с полученными экспериментальными значениями.

Проведенное авторами работы [9] исследование сопротивления стали 12X18H10T

пластическому деформированию при скоростях $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^3$ 1/с свидетельствует о слабой зависимости σ_B от $\dot{\epsilon}$ для данной стали в указанном диапазоне $\dot{\epsilon}$. Так при $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^3$ 1/с наблюдается увеличение σ_B лишь на 6%. А именно второй член уравнения (11), где присутствует σ_B , является определяющим при расчете $P_{\text{разр}}$ диафрагмы.

Полученная зависимость $\dot{\epsilon}(t)$ (рис. 5) дает представление о том, что в зоне упругости при отгибании лепестка ($\alpha < 3^\circ$) скорости деформаций центральной площадки диафрагмы не превышают $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^2$ 1/с, и лишь на конечной стадии прогиба диафрагмы, характеризующейся развитыми пластическими деформациями, $\dot{\epsilon}$ могут достигать значений $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$ 1/с. Согласно же [10] для стали 12X18H10T за пределами упругости модуль упрочнения материала практически не зависит от режима нагружения и скорости деформации. Следовательно, конечная стадия нагружения диафрагмы не оказывает влияния на режим ее раскрытия, и для определения ВВП выстрела из ЛГУ со степенью сжатия до 200 может быть использован расчет давления разрыва диафрагмы узла форсирования в статической постановке.

Результаты испытаний диафрагм

Целью экспериментальных исследований явилось получение данных о величине разрушающего давления для партии диафрагм, отличающихся геометрией (диаметрами D и толщинами H и δ_0) с последующим сопоставлением результатов, полученных при испытаниях в пневмостатике и на газодинамическом стенде, между собой и с результатами расчетов по методике, изложенной выше.

Отработка диафрагм в пневмостатических условиях проведена в диапазоне рабочих давлений 0–90 МПа. Максимальная погрешность регистрации давления разрыва диафрагмы не превышала 6%.

Для динамических испытаний диафрагм разработан газодинамический стенд, выполненный на базе баллистического агрегата ЛГУ-200 и имитирующий их натурное нагружение (рис. 6)

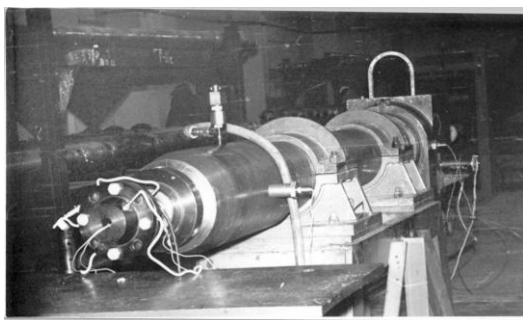


Рис. 6. Газодинамический стенд для отработки диафрагм.

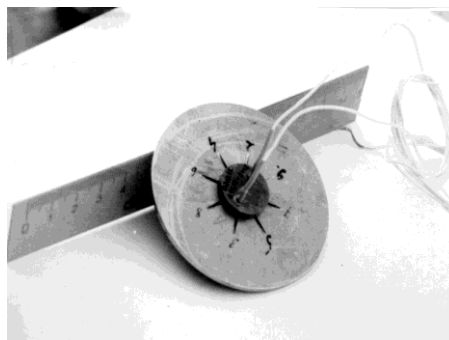


Рис. 7. Диафрагма с датчиком регистрации момента начала разрыва перемычки в зоне схождения лепестков.

Баллистический ствол заменен переходником, внутренний цилиндрико-конический канал которого повторял геометрию канала форкамеры ЛГУ, а на срезе размещался узел форсирования с испытываемой диафрагмой, оснащенный датчиками давления и датчиком, установленным на испытываемой диафрагме в зоне схождения лепестков (рис. 7).

Рабочий цикл стенда идентичен выстрелу из ЛГУ. При выстреле движущийся под действием пороховых газов поршень генерирует в легком газе серию ударных волн, которые,

достигая диафрагмы, отражаются от нее. Если давление в отраженной волне больше давления разрушения диафрагмы $p_{отр} > p_{разр}$, происходит раскрытие последней, начало которого $t_{разр}$ регистрирует датчик.

Регистрация давления в отраженной от диафрагмы волне $p_{отр}$ производилась двумя датчиками давления, установленными перед диафрагмой на минимально возможном расстоянии ℓ . Время запаздывания записи давления $t_{зап}$ определялось согласно [11]

$$t_{зап} = \frac{\ell}{[(\gamma - 1)p_1 + p_0] \sqrt{\frac{2}{\rho_0 [(\gamma - 1)p_1 + (\gamma - 1)p_0]}}}, \quad (17)$$

где ℓ – расстояние от датчика до диафрагмы; γ – отношение удельных теплоемкостей c_p/c_v рабочего газа; ρ_0 – начальная плотность газа; p_0 и p_1 – давление перед и за фронтом падающей ударной волны (определяется при расчете внутрибаллистических параметров выстрела).

Времена запаздывания $t_{зап}$ для водорода и гелия в экспериментах составили соответственно: $t_{зап}^{H_2} = 27,2$ мкс, $t_{зап}^{He} = 28,5$ мкс.

Разрешающая способность контактного датчика, регистрирующего момент времени раскрытия диафрагмы, имела величину менее 2 мкс.

Данное обстоятельство позволяет определить давление разрыва диафрагмы наложением на зависимости $P-t$, прописываемые датчиками давления, установленными перед диафрагмой, момента времени ее раскрытия, регистрируемого датчиком, размещенным на обратной стороне диафрагмы в зоне схождения лепестков (рис. 8). Датчик давления, устанавливаемый за диафрагмой, служит дублирующим отметчиком времени ее раскрытия.

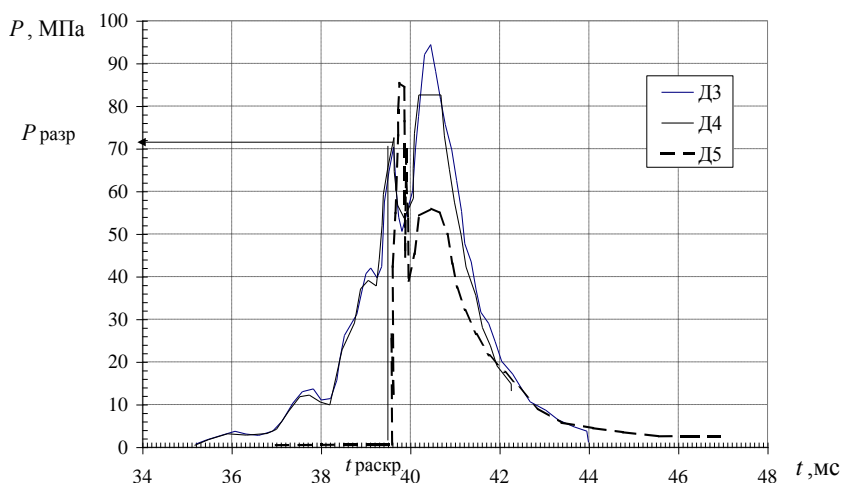


Рис. 8. Определение давления раскрытия диафрагмы в опыте на газодинамическом стенде: Д3, Д4 – запись давления датчиками, стоящими перед диафрагмой; Д5 – запись давления датчиком, стоящим за диафрагмой.

Погрешность измерения давления, включающая в себя погрешность датчика и регистратора, имела величину не более 7 %.

Несмотря на то, что при статических испытаниях градиент нарастания давления во времени составил ≈ 10 МПа/с, а при испытаниях на газодинамическом стенде его величина равнялась $\approx (3-5) \times 10^4$ МПа/с, получено хорошее согласование результатов по давлению раскрытия диафрагмы между собой, а также с результатами расчетов по методике, изложенной выше (рис. 9).

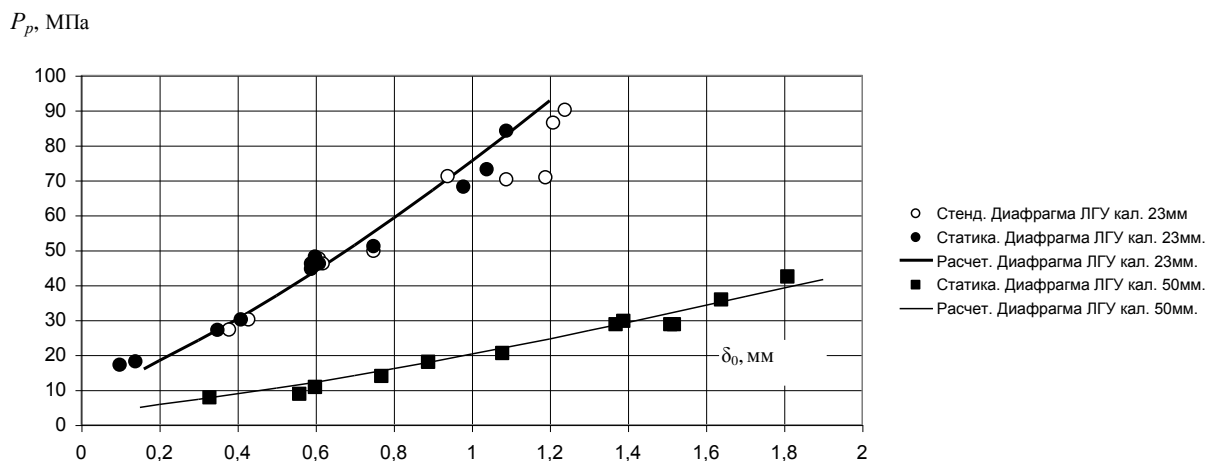


Рис. 9. Результаты испытаний диафрагм для ЛГУ калибра 23 и 50 мм и их сопоставление с результатами расчетов.

Заметим, что такие важные вопросы, как формирование дульной ударной волны при выстреле из легкогазовой пушки и компьютерная визуализация этого процесса, изучались авторами ранее [12, 13].

*Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда
(грант № 14-19-01637).*

Список литературы

1. Болкисев С.А., Васильев В.И., Данилов А.И. Результаты экспериментального исследования прочности диафрагм при давлении разрыва до 2600 кг/см^2 // Сб. трудов Ленинградского механического института. – Ленинград, 1978. – С. 15-23.
2. Барышев М.С., Глазков А.И. О влиянии процесса раскрытия диафрагмы на внутрибаллистические характеристики легкогазовых пушек // Вопросы высокоскоростного метания : сб. научн. трудов. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та. 1987. – С. 183-192.
3. Христенко Ю.Ф. Исследование динамики нагружения на давление прорыва диафрагмы легкогазовой установки // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : сб. докладов II Всероссийской научной конференции / Томский гос. ун-т. – Томск, 2000. – С. 211-220.
4. Мансон Д.Е., Мей Р.П. Исследование внутренней баллистики двухступенчатой легкогазовой пушки с помощью интерферометра для измерения скорости // Ракетная техника и космонавтика. – 1976. – Т.14, № 2. – С.131-141.
5. Основные результаты экспериментов на ударных трубах / Под ред. А. Ферри. – М.: Госатомиздат, 1963. – 442 с.

6. *Чен С.К.* Время растяжения металлических диафрагм с надрезами // Ракетная техника и космонавтика. – 1974. – Т.12, № 8. – С.123-132.
7. *Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И.* Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. – 1945. – Т.11, № 6. – С. 583-593.
8. *Киреев В.Т.* О движении ударной волны при открытии диафрагмы в ударной трубе // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. – 1962. – № 6. – С. 34-42.
9. *Попов Н.Н., Поздов В.Н., Поляков Л.В.* Сопротивление коррозионностойких сталей 12Х18Н10Т и А-43УП пластическому деформированию при различных скоростях деформаций // Проблемы прочности. –1988. – № 7. – С.62-66.
10. *Иванов А.Г., Киселев Ю.Г., Коршунов А.И., Новиков С.А., Попов Н.Н., Рыжанский В.А., Цыпкин В.И.* Влияние предыстории нагружения на механические свойства стали при одноосном растяжении // Прикладная механика и техническая физика. – 1982. – № 6. – С.98-103.
11. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. –704 с.
12. *Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Клунина Е.А., Номаконова В.Н., Сальников А.В., Сперанский А.В.* Расчетно-экспериментальные исследования параметров дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки МТ-18М // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 4 (300). – С.25-31.
13. *Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Каныгин И.И., Герасимова Р.В., Сальников А.В.* Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки // Научная визуализация. – 2014. – Т. 6, – № 2. – С.92-103.