

3. Васин Р. А., Ленский В. С., Ленский Э. В. Динамические зависимости между напряжениями и деформациями.— В кн.: Проблемы динамики упругопластических сред. М.: Мнр, 1975.
4. Пашков П. О. О методике эксперимента при обработке металлов ударными волнами.— В кн.: Высокоскоростная деформация. М.: Наука, 1971.
5. Борисевич В. К., Солодянкин С. Н. и др. Повышение прочностных характеристик листовых деталей путем их взрывного формообразования с оптимизацией параметров технологического процесса.— Проблемы прочности, 1980, № 9.
6. Hoggat C. B., Recht R. F. Stress-strain data obtained at high rate using an expanding ring.— Experimental Mechanics, 1969, vol. 9, N 10.
7. Рыжанский В. А., Минеев В. Н. и др. Экспериментальное исследование взрывного расширения тонких колец из отожженного алюминиевого сплава.— ФГВ, 1976, № 1.
8. Попов Н. Н., Стрекин В. П. и др. Методика получения диаграмм растяжения при испытаниях на маятниковых копрах.— Физ.-хим. механика материалов, 1980, № 5.
8. Кашаев Ю. Г., Новиков С. А. и др. Определение температурной зависимости механических свойств металлов с использованием взрывного нагружения и импульсного электрического нагрева.— Проблемы прочности, 1981, № 2.
10. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
11. Степанов Г. В. Модель механического поведения металлических материалов при действии нагрузок импульсного характера.— Проблемы прочности, 1978, № 5.

УДК 620.178.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Л. Н. Александров, А. Г. Иванов, В. Н. Минеев,
В. И. Цылкин, А. Т. Шитов
(Москва)*

Проведенные к настоящему времени исследования оболочек, подвергнутых внутреннему взрывному нагружению, выявили основные закономерности их поведения. Упругая и упругопластическая реакция тонкостенных оболочек, заполненных водой, определялась в работах [1, 2], а оболочек, заполненных воздухом при нормальных условиях, — в [3—7].

В данной работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований, посвященных выяснению закономерностей поведения сферических оболочек различной толщины в области пластических деформаций (вплоть до разрушения) при их однократном внутреннем взрывном нагружении.

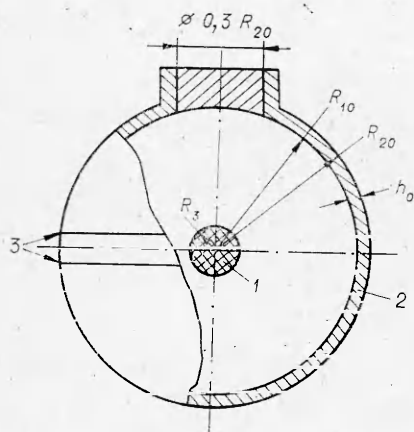
Исследовалось поведение сферических оболочек массой M с внутренним и наружным радиусами соответственно R_{10} и R_{20} и толщиной стенок h_0 (фиг. 1), заполненных нормальной воздушной атмосферой, при взрыве внутри них заряда ВВ I . Оболочки 2 изготовлены из стали 35 и отожжены для снятия остаточных напряжений в зоне сварных швов. Механические свойства материала оболочек проконтролированы испытаниями образцов-свидетелей ($\sigma_b = 0,55$ ГПа, $\sigma_{s(0,2)} = 0,30$ ГПа, $\delta = 20\%$)*.

В опытах использовались оболочки с одинаковым внутренним радиусом $R_{10} = 153$ мм и различной толщиной стенок, а также геометрически подобные оболочки, уменьшенные в 4 раза.

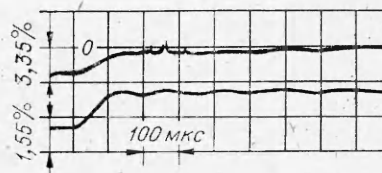
Сферические заряды взрывчатого вещества ТГ 5/5 (состав: 50% вес. тротил + 50% гексоген, плотность $1,65 \cdot 10^{-3}$ кг/см³) радиусом \bar{R}_z , массой m , располагаемые в центре оболочек, инициировались из центра. Каждая оболочка подвергалась взрывному нагружению только один раз.

В эксперименте тензодатчиками 3 (фиг. 1) по методу [8] регистрировалась деформация оболочки во времени $\varepsilon(t)$. Типичная осциллограмма $\varepsilon(t)$ приведена на фиг. 2 (опыт 7). Обработкой экспериментальных зависимостей $\varepsilon(t)$ определялись следующие величины: v^* — максимальная ско-

* σ_b , σ_s , ε_0 — соответственно временное сопротивление, предел текучести и относительное удлинение.



Ф и г. 1



Ф и г. 2

рость смещения стенок оболочек дифференцированием зависимости $\epsilon(t)$; ϵ^* — максимальная деформация материала на момент остановки или разрушения стенок оболочек ($\epsilon^* = \Delta R_2^*/R_{20}$, где $\Delta R_2^* = R_2^* - R_{20}$, R_{20} — начальное значение наружного радиуса оболочки, R_2^* — максимальное значение радиуса в

процессе деформирования); t^* — интервал времени от начала нагружения до момента достижения максимальной деформации.

Оцененная погрешность определения указанных величин составляла: $v^* \sim \pm 10\%$, ϵ^* и $t^* \sim \pm 5\%$ (для неразрушавшихся оболочек). Размеры оболочек и результаты экспериментов приведены в таблице.

Для оболочек с относительной толщиной стенок $h_0/R_{20} = 1,67$ и $8,1\%$ в ряде опытов определялась также и максимальная скорость их движения к центру при $t > t^*$, что позволило, как и в [6], оценить величину динамического предела текучести, оказавшегося равным $\sigma_s \sim 0,5$ ГПа.

Из обработки данных настоящей работы и работы [2] следует, что динамический модуль упрочнения Ст. 35 сравнительно мал. Поэтому при относительно небольших пластических деформациях ($\epsilon^* < 5\%$), имевших место в опытах, при пренебрежении упругим участком материал оболочки принят жестко-пластическим с $\sigma_s = 0,5$ ГПа.

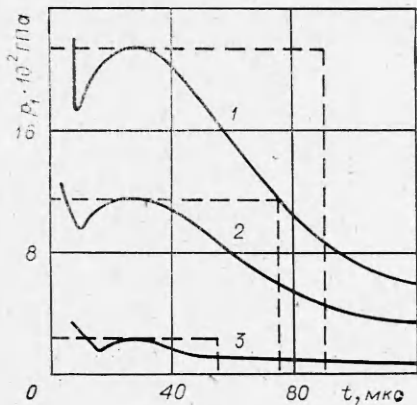
Считается также, что на относительно небольших расстояниях от внутренней поверхности оболочки до заряда $2,5 < R_{10}/R_3 < 7$ силовое воздействие взрыва определяется характером отражения ПВ от стенки оболочки. При этом предполагается, что относительное действие опережающей ударной волны в воздухе мало по сравнению с действием ПВ.

Очевидно, в близкой зоне взрыва, когда масса вовлеченного в движение воздуха существенно меньше массы ПВ, это допущение будет достаточно справедливым.

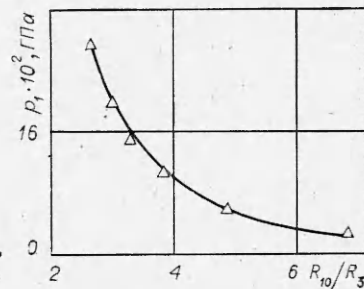
С учетом сказанного при оценке силового воздействия ПВ на оболочку реальный импульс давления сложной формы (фиг. 3, $R_{10}/R_3 = 3; 3,8; 6,8$ — кривые 1—3 соответственно) заменен эффективным, имеющим постоянную амплитуду, равную максимальному давлению отражения

Номер опыта	R_{20} , мм	δ , %	m, г	\bar{s} , 10^{-3}	i , $10^5 \frac{HC}{M^2}$	η	ϵ^* , %		v^* , м/с		t^* , мкс	
							эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
1	155,6	1,67	61	10	0,011	0,17	0,5	0,17	20	8,9	80	65
2			79	13	0,014	0,32	0,7	0,58	22	22	90	83
3			105	17,4	0,019	0,47	1,8 (p)*	1,5	29	42	150	112
4	166,5	8,1	460	13,6	0,082	0,24	0,7	0,32	21	19	100	97
5			576	17	0,103	0,38	1,2	0,94	25	37	140	123
6			700	20,7	0,124	0,46	1,9	1,9	34	54	160	147
7			945	28	0,168	0,59	3,2 (p)*	4,5	60	94	120	199
8	41,5	8,1	10,5	19,8	0,030	0,46	1,6	1,6	—	47	—	35
9			14,85	28,1	0,043	0,61	5 (p)*	4,6	65	90	50	51

(p)* — оболочка в процессе нагружения разрушилась.



Ф и г. 3



Ф и г. 4

ПВ от оболочки, т. е. $p_1 \tau = i$, где τ — длительность эффективного импульса; p_1 — его амплитуда; i — величина удельного нагружающего импульса.

Значения p_1 при отражении ПВ определены по результатам численного расчета формы импульса давления на внутренней поверхности оболочки, выполненного на ЭВМ по методике [9]. В расчете использованы уравнения состояния: ТГ 5/5 — из работы [10], воздуха — из работы [11]. Максимальное давление отражения в зависимости от относительного расстояния R_{10}/R_3 приведено на фиг. 4. Так же как и в работе [12], зависимость удовлетворительно аппроксимируется выражением

$$(1) \quad p_1 = A(R_{10}/R_3)^b,$$

где $A = 3,2$ ГПа; $b = -2,53$ в диапазоне $2,5 < R_{10}/R_3 < 7$.

Точность аппроксимации видна на фиг. 4, где сплошной кривой нанесена зависимость (1), а отдельными точками — результаты численного расчета p_1 .

Величина удельного нагружающего импульса определялась по соотношению

$$(2) \quad i = ni_0, \text{ где } i_0 = \frac{32}{27} \frac{mq^{0,5}}{4\pi R_{10}^2}$$

поток импульса ПВ через единицу площади на расстоянии R_{10} от центра сферического заряда ВВ массой m при калорийности ВВ q ; n — коэффициент, учитывающий эффективность отражения ПВ от стенки [13].

На примере отражения слоя материала с акустическим импедансом $(\rho c)_{\text{ПВ}}$, имеющего скорость $u_{\text{ПВ}}$, от слоя материала с импедансом ρc можно показать, что в акустическом приближении

$$n = 2/((\rho c)_{\text{ПВ}}/\rho c + 1).$$

При $\rho c \gg (\rho c)_{\text{ПВ}}$, что справедливо при значительном расширении ПВ, $n \approx 2$.

Итак, зависимости (1), (2) при $n = 2$ аналитически описывают эффективный импульс давления в близкой зоне взрыва при $2,5 \leq R_{10}/R_3 \leq 7$ и определяют τ .

Динамика сферической тонкостенной оболочки, имеющей радиус $R(t)$, толщину стенки $h(t)$, плотность материала ρ , нагруженной давлением $p_1(t)$, описывается уравнением [3] $\rho h \dot{R} = p_1(t) - 2\sigma_s h/R$.

Имея в виду использование этого уравнения для области малых изменений значений R , упростим его.

Выражая R и h через деформацию $\varepsilon = \Delta R_2/R_{20}$, начальное значение радиуса R_{20} и толщину h_0 и пренебрегая малыми более высокого порядка, получим

$$(1 - 2\varepsilon)\rho h_0 \dot{R} = p_1(t) - (2\sigma_s h_0/R_0)(1 - 3\varepsilon), \text{ где } R_0 = (R_{10} + R_{20})/2.$$

Для малых значений деформации ($\varepsilon < 5\%$), пренебрегая величинами 2ε и 3ε по сравнению с единицей, получим линейное уравнение, описывающее движение плоской пластины с удельной массой $m_0 = \rho h_0$, нагруженной давлением $p = p_1(t) - p_2$, где $p_2 = 2\sigma_s h_0 / R_0$ — давление сопротивления движению пластины.

С учетом параметров эффективного нагружающего импульса для анализа окончательно получим

$$(3) \quad m_0 \ddot{R} = p,$$

где
$$p = \begin{cases} p_1 - p_2 & 0 \leq t \leq \tau, \\ -p_2 & t > \tau \quad (p_2 = 0 \text{ при } \dot{R} = 0); \end{cases}$$

при $t = 0 \quad \dot{R} = 0, \quad R = R_0$.

Экстремальные характеристики процесса деформирования могут быть получены после интегрирования уравнения (3):

$$R^* = \frac{i^2}{2m_0 p_2} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right) + R_0,$$

$$v^* = \frac{i}{m_0} \left(1 - \frac{p_2}{p_1} \right), \quad t^* = \frac{p_1}{p_2} \tau = \frac{i}{p_2},$$

или, вводя $\eta = 1 - p_2/p_1$, получим

$$(4) \quad \varepsilon^* = (i^2 / (2m_0 p_2 R_{20})) \eta;$$

$$(5) \quad v^* = (i/m_0) \eta;$$

$$(6) \quad t^* = [1/(1 - \eta)] \tau.$$

Если $p_1 \gg p_2$ (при прочих равных условиях), то $\eta \rightarrow 1$ и выражения (4) — (6) принимают вид

$$\varepsilon^* = i^2 / (2m_0 p_2 R_{20}), \quad v^* = i/m_0, \quad t^* = i/p_2.$$

В этом случае имеет место режим чисто импульсного нагружения и временные характеристики импульса незначительны.

Если же $p_1 \rightarrow p_2$, то $\eta \rightarrow 0$, а вместе с ним (при $i = \text{const}$) $\varepsilon^* \rightarrow 0$, $v^* \rightarrow 0$, $t^* \rightarrow \tau$.

При этом экстремальные характеристики деформирования существенно зависят от величины относительного давления импульса p_1/p_2 или от его относительной длительности τ/t^* .

Используя формулы (1), (2), (4), а также очевидные соотношения, связывающие массу оболочки и заряда с их геометрией, после ряда простых преобразований можно получить выражение

$$\varepsilon^* = \frac{\left(\frac{64}{27}\right)^2 q \rho}{2A \sqrt{\rho_{\text{ВВ}}}} \left(\frac{3\rho}{\rho_{\text{ВВ}}}\right)^{\frac{b}{3}} \delta^{1+\frac{b}{3}} (1-\delta)^{-(2+b)} \left(1-\delta+\frac{1}{3}\delta^2\right)^{1+\frac{b}{3}} \xi^{2+\frac{b}{3}} \times$$

$$\times \left[\frac{A}{2\sigma_s} \left(\frac{3\rho}{\rho_{\text{ВВ}}}\right)^{-\frac{b}{3}} \delta^{-(1+\frac{b}{3})} (1-\delta)^b \left(1-\frac{\delta}{2}\right) \left(1-\delta+\frac{\delta^2}{3}\right)^{-\frac{b}{3}} \xi^{-\frac{b}{3}} - 1 \right].$$

Для тонких оболочек ($\delta \ll 1$) после упрощений получим уравнение

$$(7) \quad \varepsilon^* = \left(\frac{32}{27}\right)^2 \frac{q \rho}{\sigma_s} \xi^2 \left[1 - \frac{2\sigma_s}{A} \left(\frac{3\rho}{\rho_{\text{ВВ}}}\right)^{\frac{b}{3}} \delta^{1+\frac{b}{3}} \xi^{\frac{b}{3}} \right],$$

описывающее максимальную деформацию оболочки в зависимости от безразмерных параметров $\xi = m/M$, $\delta = h_0/R_{20}$, характеризующих относительную массу и относительную толщину оболочки; $q\rho/A$, $\rho/\rho_{\text{ВВ}}$, A/σ_s , характеризующих физические параметры использованных материалов.

В частности, для Ст. 35 при $\rho = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/см³, $\sigma_s = 0,50$ ГПа, $\rho_{\text{ВВ}} = 1,65 \cdot 10^{-3}$ кг/см³, $q = 4,77 \cdot 10^3$ кДж/кг (ТГ 5/5), $A = 3,2$ ГПа, $b = -2,53$ формула (7) принимает вид

$$(8) \quad \epsilon^* = 1,05 \cdot 10^2 \xi^2 [1 - 3,3 \cdot 10^{-2} \delta^{0,157} \xi^{-0,843}].$$

Значения ϵ^* , v^* , t^* , вычисленные по формулам (8), (5), (6), сопоставлены с результатами эксперимента в таблице, где приведены значения η , соответствующие условиям нагружения.

На фиг. 5 представлены расчетные зависимости ϵ^* от параметра ξ при разных значениях относительной толщины δ (1,67% — 1, 8,1% — 2). Там же для сравнения приведены экспериментальные значения ϵ^* . Точки, обведенные кружком, соответствуют разрушению оболочки. Сравнение расчета с экспериментом обнаруживает удовлетворительное, с точностью 10–20%, совпадение результатов при значениях $\xi \geq 13 \cdot 10^{-3}$.

В области деформаций, близких к упругим, точность описания выходит за пределы 20%. Это, по-видимому, объясняется тем, что в рассмотренной схеме расчета взята жестко-пластическая модель материала со значением предела текучести, не зависящим от скорости деформации, а также пренебрегающая начальным упругим участком. Возможность изменения предела текучести при изменении скорости деформирования экспериментально показана в работе [14]. Не принята также во внимание высокоинтенсивная часть импульса, отвечающая ударной волне в воздухе. Все сказанное в совокупности приводит к занижению расчетных значений ϵ^* по сравнению с экспериментальными в области малых значений ξ .

Несколько выходят за пределы оцениваемой точности результаты опыта 7. Разница с расчетом в опыте 7 объясняется преждевременным разрушением оболочки, еще не достигшей максимальных деформаций, соответствующих приведенному в таблице режиму нагружения. Это видно из сопоставления с опытом 9, имевшим одинаковые с опытом 7 исходные параметры $\xi \approx 28 \cdot 10^{-3}$ и $\delta = 8,1\%$.

Рассмотренная схема расчета также удовлетворительно описывает кинематические характеристики процесса v^* и t^* (см. таблицу).

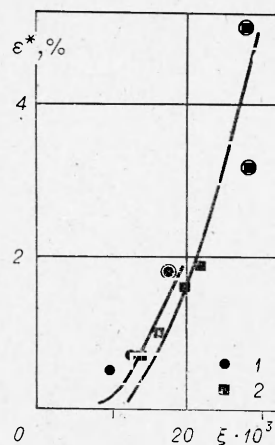
Отметим, что из расчета и эксперимента следует значение удельной массы $\xi \approx 9 \cdot 10^{-3}$, слабо зависящее от относительной толщины δ , при котором имеет место резкий перегиб зависимости $\epsilon^*(\xi)$. Области $\xi < 9 \cdot 10^{-3}$, имеющей особый практический интерес, отвечают малые пластические деформации, близкие к упругим. При $\xi > 9 \cdot 10^{-3}$ с ростом нагружения происходит быстрое увеличение деформации, вплоть до разрушения при $\epsilon^* \sim 2\text{--}3\%$, зависящей от относительной толщины оболочки.

Таким образом, в работе приведены экспериментальные результаты и показана возможность использования простой физической модели для удовлетворительного аналитического описания параметров пластического деформирования сферических оболочек из мягкой стали при внутреннем симметричном нагружении взрывом заряда ТГ 5/5.

Поступила 26 VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Proctor J. E. Containment of explosions in waterfilled right-circular cylinders. — J. Exp. Mech., 1970, vol. 10, N 11.
2. Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении. — Атомная энергия, 1976, т. 41, вып. 5.
3. Baker W. E., Allen F. J. The response of elastic spherical shells to spherically symmetric internal blast loading. — In: Proc. Third U. S. Nat. Congr. Appl. Mech., Providence, 1958. N. Y. 1958.
4. Демчук А. Ф. Один метод расчета взрывных камер. — ПМТФ, 1968, № 5.
5. Baker W. E. The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading. — J. Appl. Mech., 1960, vol. 27, N 1.
6. Иванов А. Г., Новиков С. А., Сеницын В. А. Исследование поведения замкнутых



Ф и г. 5

- стальных оболочек при взрыве внутри них зарядов взрывчатого вещества.— ПМТФ, 1968, № 6.
7. Бодренко С. И., Глушак Б. Л., Новиков С. А., Синицын В. А., Чеверикин А. М. Расчетно-экспериментальное исследование поведения замкнутой сферической оболочки при взрыве в ее полости сферического заряда взрывчатого вещества.— В кн.: Тезисы докл. II Всесоюз. симп. по импульсным давлениям. М., 1976.
 8. Шитов А. Т., Минеев В. Н. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций.— ФГВ, 1976, № 2.
 9. Баталов В. А., Свидинский В. А., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа VII для решения одномерных газодинамических и упругопластических задач в механике сплошной среды.— В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. Вып. 1(1), М.: ЦНИИатоминформ, 1978.
 10. Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ.— ПМТФ, 1969, № 4.
 11. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
 12. Ahrens J. Thomas, Kovach B. Explosive gas blast: the expansion of detonation products in vacuum.— J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, N 2.
 13. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
 14. Forrestal M. J. and Sagartz M. Elastic-plastic response of 304 stainless steel beams to impulse loads.— J. Appl. Mech., 1978, vol. 45, p. 685.

УДК 539.4

РАЗРУШЕНИЕ И ВЯЗКОСТЬ СВИНЦА ПРИ ОТКОЛЕ

*В. К. Голубев, С. А. Новиков, Ю. С. Соболев,
Н. А. Юкина*

(Москва)

Исследования откольного разрушения свинца при интенсивных взрывных и ударных нагрузках проводились в работах [1—4]. Налицо существенное (более чем на порядок) превышение динамической прочности материала, реализующейся при отколе, по сравнению с прочностью в квазистатических условиях одноосного растяжения и кручения [5, 6]. Это хорошо согласуется с наблюдаемой в [1] тенденцией к увеличению отношения прочности, реализующейся при отколе, к статической прочности при повышении пластичности материала.

Предварительные результаты исследования откольного разрушения свинца в температурном диапазоне —196—300°С приводились в [3], где определены критические уровни нагружения, соответствующие макроскопическому разрушению материала. В данной работе проведены дополнительные эксперименты с целью определения уровней нагружения, соответствующих зарождению в материале откольных микроразрушений, детальный металлографический анализ образцов с целью определения характера разрушения, а также расчетные оценки вязкости свинца в условиях откольного разрушения. Схема проведения экспериментов приводилась в [7], метод металлографического анализа использовался для определения характера откольного разрушения сталей в широком температурном диапазоне [8].

Образцы из свинца С2 толщиной 4 мм и диаметром 40 мм крепились к медному экрану толщиной 12 мм. Импульсное механическое нагружение образцов осуществлялось ударом по медному экрану алюминиевой пластины толщиной 4 мм. Известной скорости удара ставилось в соответствие расчетно оцененное значение давления в нагружающем импульсе сжатия, отражение которого от свободной поверхности образца в виде импульса растяжения и приводило к откольному разрушению свинца. Для создания условий отражения в свинец импульса растяжения с отрицательным давлением менее 0,6 ГПа к свинцовому образцу поджималась пластина из фторопласта-4. Используемые для расчетных оценок известные ударные адиабаты материалов в виде линейных D — u -соотношений приводились, например, в [4, 7]. Характерное время нагружения ориентировочно оценивалось в 1,3—1,5 мкс. Правомерность используемого оценочного расчета условий нагружения подтверждена экспериментально при помощи манганинового датчика давления [9]. Результаты регистрации нагружающего импульса сжатия манганиновым датчиком давления показали, что расчетные оценки не выходят за пределы погрешности дат-