

Определение энергопоглощающей способности твёрдых огнеупорных ячеистых материалов (твёрдых пен)

Казанцев А.Г.², Первухин Л.Б.^{1,†}, Капустин Р.Д.^{1,‡}, Николаенко П.А.¹,
Смолянин С.С.²

[†]bitrub@mail.ru; [‡]kapustin-roman@mail.com

¹ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН),
ул. Академика Осипяна 8, 142432 Черноголовка, МО

²«Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии
машиностроения» (ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»), ул. Шарикоподшипниковская 4, 115088, Москва

В статье приведены результаты исследований с помощью аналитических методов и методами компьютерного моделирования напряженно деформированного состояния металлической пустотелой оболочки при взрыве изнутри, а также с нанесенным на ее внутреннюю поверхность защитным слоем из твердого ячеистого алюмосиликатного материала ВБФ-650. Проведены экспериментальные исследования с целью определения напряжений и деформаций в оболочке для оценки энергопоглощающей способности пористого материала. Результаты экспериментов показали хорошее соответствие с расчетами.

Ключевые слова: взрыв, твердый пористый материал.

Research of energy dissipation ability of solid heat-resistant cellular materials (solid foams)

A.G. Kazantsev², L.B. Pervukhin¹, R.D. Kapustin¹, P.A. Nikolaenko¹,
S.S. Smolyanin²

¹Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS
Akademika Osipyana St. 8, 142432, Chernogolovka

²Central Research Institute for Machinery Industry (TsNIITMash), Sharikopodshibnikovskaya St. 4, 115088, Moscow

The effect of solid foam lining on the deformation modes in the metallic shell was explored. In the analytical calculations and computer modeling the stress-strain behaviour in the metallic shell was analysed in the presence (a) or absence (b) of a protective foamy layer made of solid aluminosilicate refractory foam (VBF-650 brand). Computer simulations were carried for 3D model by the scheme of finite elements. In the experiments, we could estimate the tangential and axial plastic deformations and the extent of foam densification. Experimental results were found to be reasonably agree with the calculated one.

Keywords: explosion, solid cellular material.

1. Введение

Из опубликованных в настоящее время литературных данных известно, что наиболее эффективно применять гетерогенные среды (ГС) типа водовоздушных пен и пузырьковых сред для локализации действия взрыва с целью обеспечения безопасности и экологической чистоты взрывных технологий. К основным недостаткам широко используемых для демпфирования ударных волн газожидкостных сред следует отнести их термодинамическую неустойчивость и необходимость специального оборудования для создания этих сред на месте проведения взрывных работ [1].

В связи с этим было предложено исследовать эффективность гашения энергии взрыва твердыми негорючими ячеистыми материалами.

Цель работы – определить эффективность гашения энергии взрыва твердыми ячеистыми материалами (твёрдыми пенами).

В экспериментальных исследованиях применялся для гашения ударных волн твердый огнеупорный алюмосиликатный ячеистый материал ВБФ-650 производства ЗАО НПКФ «МаВР» (рис.1). Он был выбран потому, что обладая малой плотностью (650-700 кг/м³) и высокой пористостью (до 70%), имеет прочность до 4 МПа, кроме того он не горит и обладает огнеупорностью до 1600°C.

Плотность и пористость материала существенно зависят от весового соотношения наполнителя и связующего, возможности свободного расширения (вспучивания) смеси при затвердевании. В нашем случае средние линейные размеры пор составляли около 2-3 мм. При

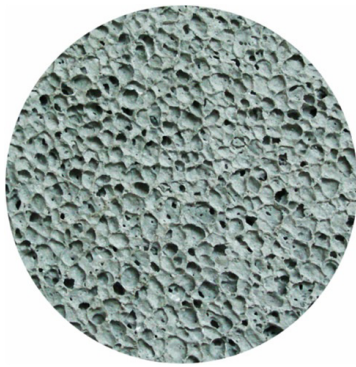


Рис. 1. Твердый огнеупорный ячеистый материал марки ВБФ-650 (D образца=70 мм).

плотности 650-700 кг/м³ прочность на сжатие составляет от 2 до 4 МПа.

Экспериментальное определение эффективности гашения энергии взрыва путём простого помещения заряда взрывчатого вещества (ВВ) в центр образца из ячеистого материала без подкрепляющей оболочки невозможно, поскольку в данном случае материал подвергается раскалыванию без разрушения всех ячеек (пор). Определение эффективности энергопоглощения материала возможно только в том случае, когда энергия, выделяемая при подрыве заряда ВВ, затрачивается на хрупкое разрушение всех межпоровых перегородок керамического ячеистого материала. В связи с этим, исследования эффективности гашения энергии взрыва твёрдыми пенами проводились на образцах, представляющих собой металлические оболочки с энергопоглощающим слоем из твёрдого ячеистого материала марки ВБФ-650 (рис.2). Методика экспериментов предусматривала исследование напряжённо-деформированного состояния металлических оболочек экспериментальных образцов.

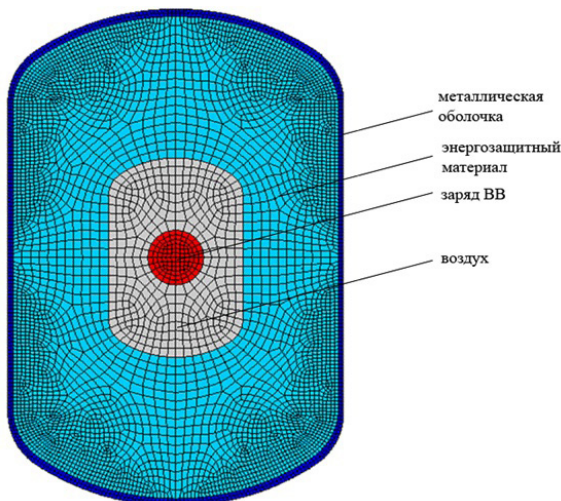


Рис. 2. Расчетно-экспериментальная модель.

Металлическая оболочка экспериментальных образцов представляла собой короткий цилиндр с эллиптическими днищами. Высота оболочки 0,8 м, диаметр – 0,53 м, толщина стенки – 8 мм, материал оболочки – сталь марки 09Г2С.

2. Расчет НДС

При аналитическом расчёте максимальные напряжения в оболочке определялись по методике Мальцева В.А.[2, 3] на основе зависимости

$$\sigma_H = \frac{0,28\rho_0}{R^2\delta} \sqrt{\frac{r_3^3 r_0^3 Q E \left[1 + \left(\frac{R}{r_3} - 1 \right)^3 \frac{\rho_B}{\rho_0} \right]}{(1-\mu)\rho}}, \quad (1)$$

где: σ_H – напряжения, обусловленные воздействием на оболочку воздушной ударной волны, R – радиус оболочки, δ – толщина оболочки, r_0 – радиус активной части заряда, $\alpha=10$ – коэффициент, учитывающий предельное расширение продуктов детонации, Q – удельное энергосодержание используемого ВВ, E – модуль упругости материала оболочки, ρ_0 – плотность ВВ, ρ_B – плотность воздуха, μ – коэффициент Пуассона материала оболочки.

Результаты расчётов показали (рис.8), что металл оболочки с данными массо-габаритными характеристиками должен подвергаться пластической деформации ($\sigma \geq 300$ МПа) при подрыве заряда ВВ массой более 300 г, а при подрыве заряда тротила массой более 400 г превышает предел прочности металла оболочки, и она должна разрушиться. Расчет производился для сферической оболочки, следствием чего является совпадение линий «верх» и «бок».

3. Компьютерное моделирование

В программе конечноэлементного анализа LS-DYNA был произведён расчет напряжённо-деформированного

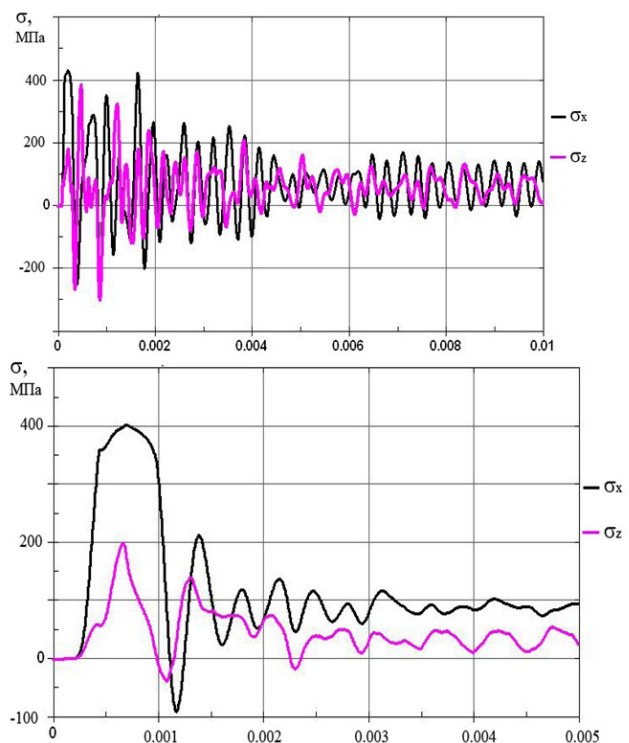


Рис. 3. Напряжения в пустотелой оболочке и оболочке с защитой из ВБФ-650 (расчет в LS-DYNA).

состояния металлической оболочки экспериментального образца, как изготовленного с использованием энергопоглощающего материала, так и пустотелого.

Расчёт выполнялся при величине заряда ВВ от 200 г до 1100 г ТНТ. На основе полученных данных установлена зависимость максимальных пластических деформаций от величины заряда, определены поля напряжений и деформаций в оболочке, величина действующего на стенки контейнера давления, характер изменения этих величин во времени [4,5].

Результаты расчета показали, что в оболочке после подрыва возникают затухающие колебания (рис.3).

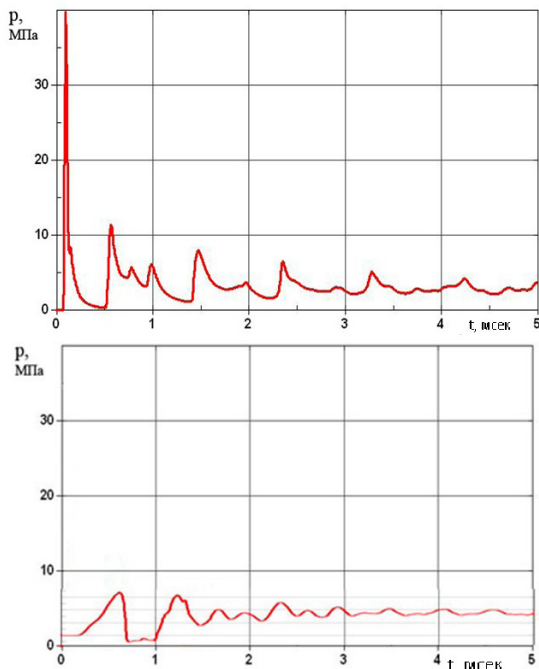


Рис. 4. Изменение во времени давления на стенку контейнера при подрыве (расчет в LS-DYNA).
Верх. – заряд ВВ массой $m=600$ г пустотелая оболочка.
Нижн. – заряд ВВ массой $m=900$ г с энергопоглощающим материалом.

При подрыве в пустотелом контейнере наблюдается несколько пиков максимальных напряжений, процесс затухает практически после 0,008 сек. При применении защитного материала напряжения максимальны при первом нагружении, затухание колебаний происходит существенно быстрее, чем без защиты, за 0,002 сек, за счет демпфирующих свойств энергопоглощающего материала.

Характер изменения давления, действующего на стенку контейнера в зоне напротив заряда в пустотелом контейнере, и в контейнере с энергопоглощающим материалом показан на рис.4. Анализ представленных диаграмм показывает, что при использовании энергопоглощающего материала первый максимальный импульс давления более растянут по времени, величина давления существенно ниже, чем в контейнере без защиты.

При значениях массы заряда ВВ более 400 г для пустотелой оболочки и более 700 г для оболочки с энергопоглощающим материалом образуются пластические деформации (рис.9). В пустотелой оболочке наиболее

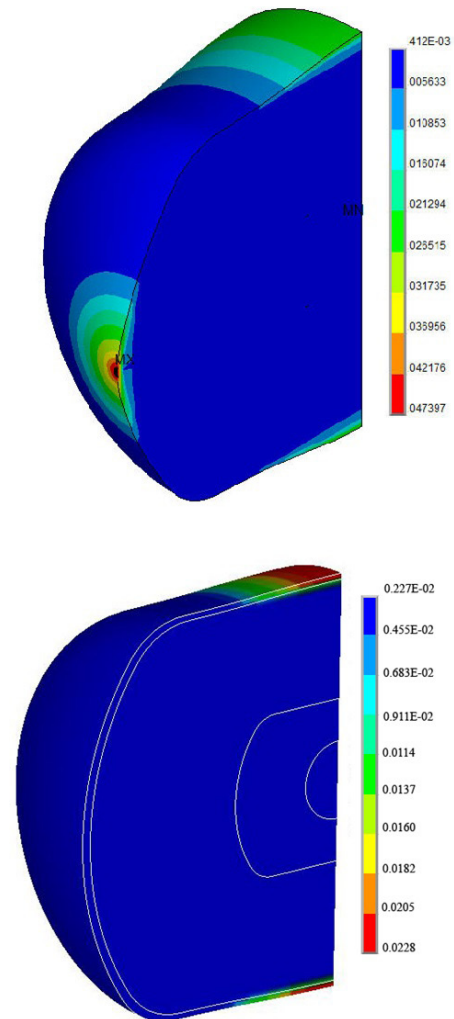


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформаций (в относительных единицах) в оболочке контейнера после подрыва.
Верх. – заряд ВВ массой $m=600$ г пустотелая оболочка.
Нижн. – заряд ВВ массой $m=900$ г с энергопоглощающим материалом.

нагруженными зонами являются центральные части дний. При использовании энергозащитного материала величина пластических деформаций максимальна в центральной цилиндрической части контейнера напротив заряда (рис.5).

В пустотелом контейнере по результатам расчёта и компьютерного моделирования пластические деформации существенно выше, чем с наполнителем (при одинаковой величине заряда).

4. Экспериментальные исследования

Эксперименты, как и расчёты, проводились в двух вариантах изготовления экспериментальных образцов – с внутренней защитой из пористого алюмосиликатного бетона типа ВБФ-650 и без внутренней защиты (пустотелого).

Как видно на рис.6, энергопоглощающий материал располагался на внутренней поверхности металлической оболочки, толщина слоя составляет около 125 мм.

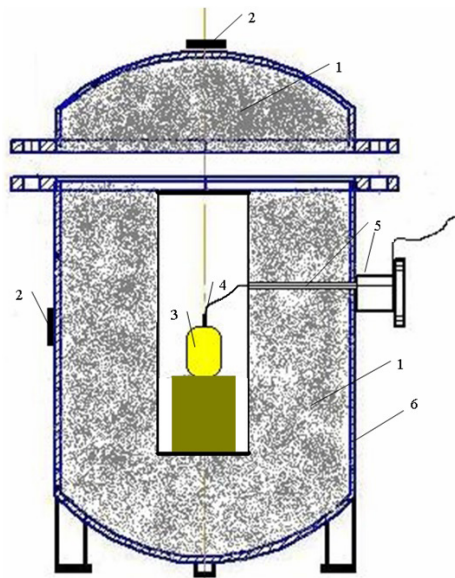


Рис. 6. Схема эксперимента.

- 1 – ячейистый материал ВБФ-650;
- 2 – тензодатчики;
- 3 – заряд ВВ (тротил);
- 4 – электродетонатор;
- 5 – камера для электродетонатора и отверстие для вывода проводов или вывода детонационного шнура;
- 6 – металлическая оболочка образца.

Была проведена серия экспериментов по подрыву исследования напряжённо-деформированного состояния вышеуказанных образцов.

На рис.7 представлены фотографии испытанных образцов. В результате воздействия взрыва, толщина защитного слоя из материала ВБФ-650 уменьшается с 125 мм до 30-40 мм.

В ячейистом материале ВБФ-650 разрушаются межпоровые перегородки и после проведения эксперимента на внутренней поверхности металлической оболочки экспериментального образца образуется слой спрессованного порошка.

Напряжённо-деформированное состояние оболочки определялось с помощью метода тензометрирования по следующей методике.

Измерения деформации оболочки контейнера проводились по мостовой шестипроводной схеме. Температурной компенсации сопротивления тензодатчика не проводилось. Датчики плёночного типа на металлической основе приваривались к изделию контактной сваркой.



Рис. 7. Фотографии образцов после взрыва.

В экспериментах использовалась экранированная витая пара, а сопротивление медных жил заранее промерялось с точностью 0,05 Ом и учитывалось при подборе сопротивлений моста. Измерения проводились при следующих параметрах: питание моста осуществлялось переменным напряжением $U \sim 2.0 - 2.5v$, $F = 5Kгц$. Сигналы записывались на жёсткий диск персонального компьютера. При проведении анализа записанных сигналов применялась программа ZetLab. В результате аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) фиксировался сигнал, пропорциональный линейной деформации быстро протекающего процесса.

Калибровка тензорезисторов и мостов проводилась с применением балки равного сопротивления. На балку приваривался тензорезистор, аналогичный измери-

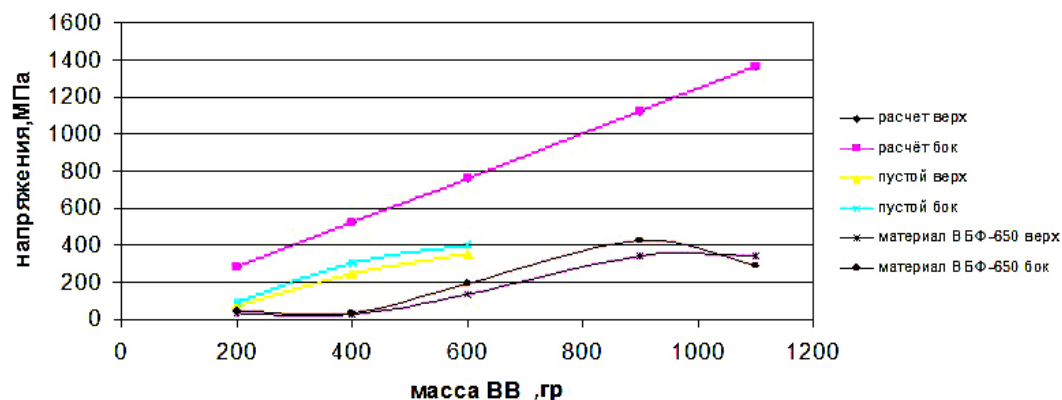


Рис. 8. Зависимость напряжений в металлической оболочке экспериментальных образцов от массы заряда ВВ.

тельному. На свободный конец балки навешивался груз $P=20\text{ кг}$. Сигнал от моста с использованием шести проводной линии поступал на один из каналов АЦП. Таким образом мы могли получить зависимость $U_{\text{тн}}(P)$ в статическом режиме. Результаты (рис.8) измерения деформаций пересчитывали в напряжения из условия работы оболочки контейнера в упругой области.

Выявлено, что при подрыве заряда тротила массой 600 г в образце без энергопоглощающего материала напряжения в оболочке практически соответствуют напряжениям, полученным при подрыве заряда тротила массой 900 г в образце с энергопоглощающим материалом. Напряжения в оболочке при подрыве 200 г и 400 г тротила в образце с энергопоглощающим материалом незначительны и практически идентичны, при этом после увеличения заряда ВВ до 600 г тротила они резко возрастают. Таким образом, энергопоглощающий слой в экспериментальном образце, представляющий собой твёрдый ячеистый материал марки ВБФ-650 в случае схлопывания всех пор, способен полностью поглощать энергию, которая выделяется при подрыве заряда тротила массой 300-350 г, т.е. порядка 1,3-1,5 МДж.

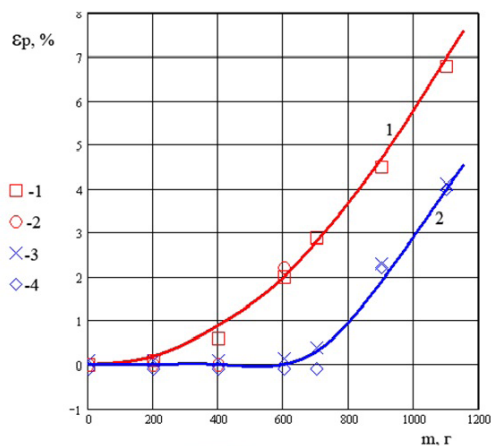


Рис. 9. Зависимость пластических деформаций от массы заряда при подрыве пустотелого контейнера (кривая 1) и контейнера с энергопоглощающим материалом (кривая 2). Точки: пустотелый контейнер: 1 - расчет; 2 - эксперимент; контейнер с энергопоглощающим материалом: 3 - расчет; 4 - эксперимент.

Общий объем вспученного материала в экспериментальных образцах составлял порядка $0,14\text{ м}^3$. Таким образом, можно вычислить удельное объемное энергопоглощение материала ВБФ-650, Q_v .

$$Q_v = \frac{Q_{\text{п}}}{V} \quad (2)$$

$$Q_v = 1,4/0,14 = 10\text{ МДж/м}^3 = 10\text{ Дж/см}^3.$$

Где: Q_v – удельное объемное энергопоглощение материала ВБФ-650; $Q_{\text{п}}$ – количество энергии, поглощаемое материалом ВБФ-650 при подрыве заряда ВВ в экспериментальных образцах; V – объем материала ВБФ-650 в экспериментальных образцах.

5. Заключение

В результате проведенных исследований разработана методика экспериментального определения энергопоглощающей способности твердых ячеистых материалов путём их помещения в замкнутую металлическую оболочку по изменению её деформации.

Зависимости интенсивности максимальных пластических деформаций в цилиндрической части обечайки от массы заряда, полученные расчетным путем, а также по данным испытаний при подрыве пустотелого контейнера и контейнера с энергозащитным материалом приведены на рис.9. Результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем соответствии.

Таким образом, использованные методики расчета НДС взрывного контейнера и компьютерного моделирования позволяют адекватно описать воздействие взрывной волны на стенку контейнера и подтверждается результатами экспериментов, что позволяет проектировать в дальнейшем взрывные камеры и взрывозащитные контейнеры для любых целей без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований.

Экспериментально установлено, что удельное объемное энергопоглощение твердого ячеистого материала типа ВБФ-650 плотностью 650 кг/м^3 составляет 10 Дж/см^3 или 1 см^3 поглощает энергию, выделяемую при подрыве $\approx 2,4\text{ г}$ тротила.

Литература

1. B.I. Palamarchuk, A.N. Manchenko, A.V. Cherkashin, A.T. Malskhov, V.A. Kuleshov. Geotechnical mechanics. **81**, (2009). (in Russian) [Б.И. Паламарчук, А.Н. Манченко, А.В. Черкашин, А.Т. Малахов, В.А. Кулешов. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. **81**, 2009.]
2. Ju.A. Konon, L.P. Pervukhin, A.D. Chudnovskii. Explosion welding. Ed. by V.M. Kudinova. M.: Mashinostroenie. (1987) 216 p. (in Russian) [Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский. Сварка взрывом. Под. ред. В.М. Кудинова. М.: Машиностроение. 1987. 216 с.]
3. A.G. Kazantsev, A.D. Chudnovskii, S.S. Smol'yanin, L.B. Pervukhin, P.A. Nikolaenko. Inorganic Materials. Springer. **4**(15), 1717 (2011). (in Russian) [А.Г. Казанцев, А.Д. Чудновский, С.С. Смольянин, Л.Б. Первухин, П.А. Николаенко. Заводская лаборатория. **12**, 37 (2010).]
4. A.G. Kazantsev, S.S. Smol'yanin, L.B. Pervukhin, P.A. Nikolaenko, R.D. Kapustin. J. Heavy machinery. **8**, 27 (2011). (in Russian) [А.Г. Казанцев, С.С. Смольянин, Л.Б. Первухин, П.А. Николаенко, Р.Д. Капустин. Тяжелое машиностроение. **8**, 27 (2011).]
5. A.G. Kazantsev, A.I. Danilov, S.S. Smol'yanin, M.J. Kahadze, N.N. Aleksandrov. Zavoskaya laboratoriya, **1**, 45 (2013). (in Russian) [А.Г. Казанцев, А.И. Данилов, С.С. Смольянин, М.Ж. Кахадзе, Н.Н. Александров. Заводская лаборатория. **1**, 45 (2013).]