

УДК 539.319 + 534.134

МОДИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЗРЫВНЫХ КАМЕР И ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Ю. П. Мещеряков*, Б. С. Злобин*, А. А. Штерцер*,**

* Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

** Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: director@sibexplo.com, zlobin.boris@mail.ru, asterzer@mail.ru

Предложена модификация взрывной камеры, предназначенной для исследования детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения. Приведены примеры конструкций взрывных камер, удовлетворяющих необходимым условиям. Путем численного моделирования получена зависимость степени неоднородности напряженного состояния оболочки взрывной камеры от отношения радиуса оболочки к ее толщине.

Ключевые слова: взрывная камера, синхротронное излучение, численное моделирование, эквивалентные напряжения.

DOI: 10.15372/PMTF20210619

Введение. В настоящее время для исследования быстропротекающих процессов, таких как детонация заряда взрывчатого вещества (ВВ), конденсация углерода за фронтом детонационной волны, выброс облака микрочастиц при выходе ударной волны на свободную поверхность металлов и др., применяется метод импульсной рентгенографии с использованием синхротронного излучения (СИ) [1–4]. В рамках мегапроекта СКИФ (Сибирский кольцевой источник фотонов) предусмотрено строительство циклического ускорителя, разгоняющего электроны до скорости, соответствующей энергии 3 ГэВ. В этом устройстве импульсы СИ с энергией фотонов, приблизительно равной 10 кэВ (мягкое рентгеновское излучение), длительностью, приблизительно равной 1 нс, и минимальным интервалом повторения 125 нс генерируются при прохождении пучка электронов через поворотный магнит [1]. Прототипом СКИФ является циклический ускоритель, разработанный в Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН) для проведения экспериментальных работ с использованием СИ. В комплексе с этим ускорителем применяются специальные взрывные камеры (ВК), оснащенные юстировочным устройством для регулирования пространственного положения корпуса. Юстировочное устройство позволяет точно регулировать положение исследуемого объекта относительно входящего в ВК из коллиматора пучка СИ с сечением, имеющим размеры $0,1 \times 20,0$ мм [3].

Помимо регулирования пространственного положения корпуса конструкция ВК должна обеспечивать минимальное сейсмическое воздействие на окружающие высокоточные

приборы и оборудование и предотвращать выброс газообразных продуктов детонации из камеры при подрыве заряда ВВ. При проектировании таких ВК необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние корпуса (оболочки), который устанавливается на основание, позволяющее регулировать его положение.

В настоящей работе рассмотрены некоторые конструктивные особенности ВК, предназначенных для проведения исследований с применением импульсной рентгенографии, и выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния оболочки таких ВК.

1. Особенности конструкции ВК, предназначенной для проведения исследований методом импульсной рентгенографии. Ранее при исследовании быстротекающих процессов использовались портативные импульсные рентгеновские аппараты, которые можно перемещать относительно неподвижного корпуса ВК для наведения пучка рентгеновского излучения на исследуемый объект. Эти аппараты генерируют импульсы в диапазоне жесткого рентгеновского излучения с энергией γ -квантов в диапазоне $100 \div 2300$ кэВ [5, 6]. На рис. 1 показана ВК с защитными экранами и специальными окнами, рассчитанная на заряд ВВ массой 2 кг в тротиловом эквиваленте и позволяющая проводить рентгеноимпульсную съемку быстротекающих процессов тремя портативными аппаратами.

В экспериментах с использованием СИ не источник излучения ориентируется относительно объекта исследования, а, наоборот, экспериментальная сборка вместе с ВК ориентируется относительно пучка СИ, выходящего из коллиматора. Сначала осуществляются визуальная настройка и контроль положения исследуемого объекта внутри открытой камеры относительно пучка СИ. Юстировка проводится после завершения установки экспериментальной сборки при закрытой ВК. Сложность точной настройки обусловлена небольшими размерами пучка излучения ($0,1 \times 20,0$ мм). Разработанная для подобных исследований установка состоит из юстировочного устройства и закрепленной на нем ВК, рассчитанной на заряд ВВ массой 50 г в тротиловом эквиваленте (рис. 2). В настоящее время такая установка, снабженная двухуровневой системой резиновых амортизаторов, расположенных между корпусом камеры и основанием, используется в ИЯФ СО РАН. Данная конструк-

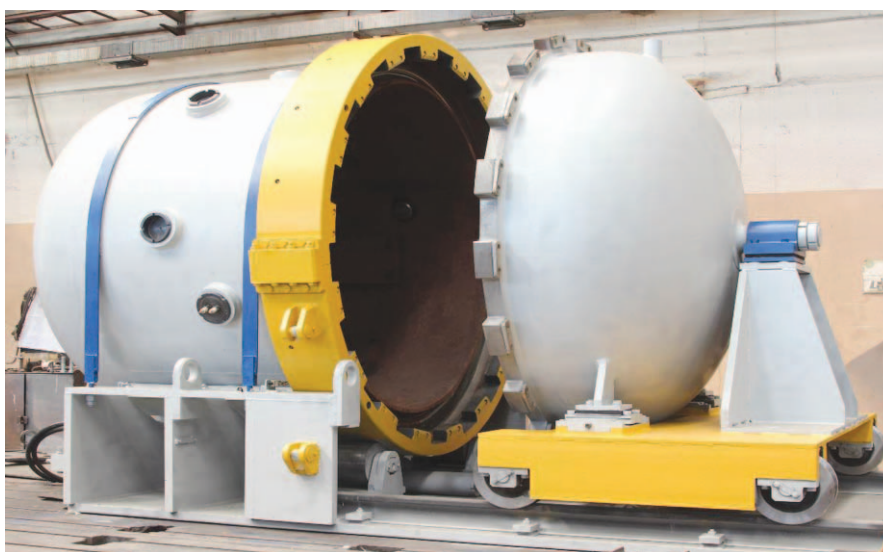


Рис. 1. ВК, рассчитанная на заряд ВВ массой 2 кг в тротиловом эквиваленте и позволяющая проводить исследования с использованием портативных импульсных рентгеновских аппаратов



Рис. 2. Установка, предназначенная для проведения рентгенографических исследований взрывных процессов с использованием СИ

ция позволяет существенно уменьшить сейсмическое воздействие взрыва на приборы и оборудование, находящиеся в одном помещении с камерой. Также конструкция установки позволяет проводить точную настройку положения сборки относительно пучка СИ путем перемещения корпуса камеры в пространстве. КВ монтируется на подвижной платформе, которая опирается на четыре винтовые регулировочные стойки, расположенные на неподвижном основании. Подвижная платформа представляет собой подвижную плиту с механизмом горизонтального перемещения, на которой установлено ложе с закрепленной на нем ВК. Ложе соединено с подвижной плитой платформы вертикальным стержнем, представляющим собой ось вращения, что позволяет поворачивать ложе совместно с корпусом ВК вокруг вертикальной оси. Для повышения точности регулирования положения ВК вертикальная ось вращения установки должна находиться максимально близко к окну, через которое пучок СИ входит в камеру. Кроме того, при настройке корпус ВК можно поворачивать вокруг оси, совпадающей с направлением пучка. Также устройство позволяет перемещать корпус камеры в продольном направлении и поворачивать его вокруг оси, расположенной в горизонтальной плоскости перпендикулярно направлению распространения пучка излучения.

В исследованиях, которые планируется проводить с использованием СКИФ, предполагается применять ВК, рассчитанную на заряд ВВ массой 2 кг в тротиловом эквиваленте. Дополнительные трудности проектирования такой камеры состоят в том, что для наведения с высокой точностью пучка СИ на объект исследования конструкция юстировочного устройства должна обеспечивать перемещение в разных направлениях корпуса ВК массой приблизительно 14 т. Вариант такой ВК показан на рис. 3.

Сложность и стоимость оборудования, используемого при исследовании взрывных процессов, постоянно возрастают, что обусловлено ужесточением требований к его техническим характеристикам. Одним из таких требований является надежная герметизация ВК.

Прорывы газообразных продуктов детонации обычно происходят через уплотнительный узел разъема камеры. Работы по его усовершенствованию проводятся постоянно, поскольку любое изменение конструкции, вызванное изменением массы заряда или другими

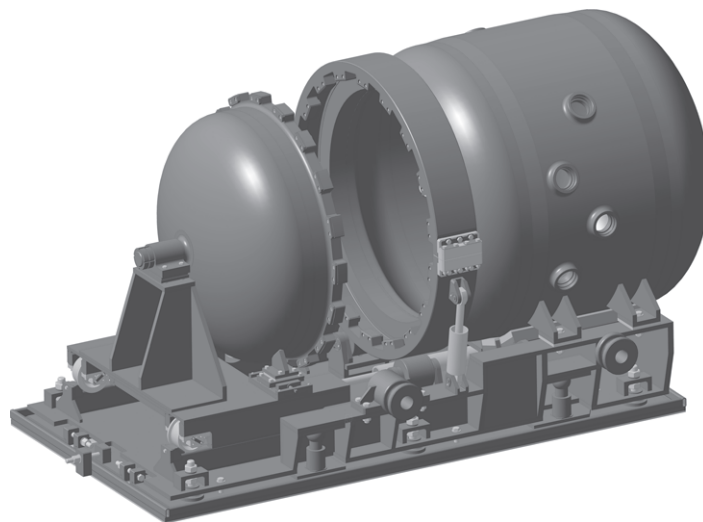


Рис. 3. ВК, рассчитанная на заряд ВВ массой 2 кг в тротиловом эквиваленте и позволяющая проводить рентгенографические исследования с использованием СИ

причинами, может привести к разгерметизации ВК. Для использования ВК при проведении исследований взрывных процессов разработана конструкция разъема, обеспечивающая надежную герметизацию [7].

Важным элементом ВК является система эвакуации из нее газообразных продуктов детонации ВВ. Для этого используются газовыпускные клапаны различной конструкции. Основным недостатком большинства конструкций является необходимость периодической очистки каналов клапанов от твердых компонентов продуктов детонации. Этот процесс достаточно трудоемкий, поскольку часто требует разборки узлов установки. Использование усовершенствованного газовыпускного клапана [8] позволяет упростить обслуживание ВК и повысить эксплуатационную надежность установки в целом, особенно в тех случаях, когда из полости камеры необходимо удалять большие объемы газообразных продуктов детонации ВВ.

При проведении экспериментов с подрывом ВВ в атмосфере с заданным газовым составом или в вакууме на камеру устанавливаются вакуумные клапаны с предохранительной мембраной. Использование предохранительной мембраны из полиэтиленовой пленки толщиной $0,1 \div 0,5$ мм позволяет поддерживать необходимую атмосферу в объеме камеры до момента подрыва заряда ВВ. Толщина пленки подбирается в зависимости от диаметра клапана и степени вакуумирования.

При взрыве заряда ВВ большой массы мембрана, как правило, разрушается, открывается механический затвор и происходит продувка камеры. При проведении экспериментальных работ с зарядами ВВ небольшой массы возникают проблемы, обусловленные тем, что на этапе вакуумирования мембрана должна выдерживать необходимый перепад давления между объемом камеры и атмосферой. Однако на этапе подрыва заряда ВВ давления в ударной волне, а также избыточного давления газообразных продуктов детонации может быть недостаточно для разрушения мембраны. Для таких случаев разработано устройство, обеспечивающее механическое вскрытие мембраны перед продувкой камеры с помощью встроенного ножа [9]. Описанные выше устройства позволяют надежно герметизировать ВК и создавать внутри нее необходимую для экспериментов атмосферу или вакуум. При разработке конструкции ВК, представленной на рис. 3, используются технические решения, предложенные в [7–9].

Важным этапом проектирования является выбор массы оболочки ВК. Для обеспечения надежности и точности работы юстировочного устройства целесообразно минимизировать массу ВК, т. е. выбрать минимально возможную толщину оболочки при заданных размерах и массе заряда ВВ. Однако, как показывают приведенные ниже результаты численных расчетов, при увеличении отношения радиуса оболочки к ее толщине возрастает степень неоднородности напряженного состояния оболочки ВК. Кроме того, увеличивается амплитуда колебаний оболочки, что может привести к повреждениям юстировочного механизма. При оптимизации массы ВК необходимо учитывать эти факторы. Не рекомендуется использовать оболочки с отношением радиуса к толщине $K > 16$.

2. Численное моделирование. ВК, показанные на рис. 1–3, имеют корпус, состоящий из цилиндрической и двух эллиптических частей [10]. При взрывном нагружении таких ВК в элементах оболочки возникают существенно неоднородные напряженные состояния. При этом максимальные эквивалентные напряжения локализуются в полюсах корпуса (оболочки), в то время как минимальные — в срединной части ВК. Степень неоднородности напряженного состояния описывается коэффициентом “концентрации” напряжений S , определяемым как отношение максимального значения напряжений к минимальному и зависящим от геометрических параметров элементов корпуса ВК. Одним из способов уменьшения значения S и получения более равномерного распределения напряжений во всех элементах оболочки является использование оболочек с оптимальным отношением радиуса оболочки ВК к ее толщине. Минимизация величины S позволяет уменьшить сейсмическое воздействие ВК и увеличить ее ресурс без увеличения массогабаритных параметров.

Для определения оптимальных отношений толщины оболочки ВК к ее радиусу создана математическая модель, в которой используются динамические двумерные уравнения линейной упругости, описывающие напряженно-деформированное состояние в случае осевой симметрии. С помощью численного метода конечных элементов проведены расчеты и получена зависимость величины S от отношения радиуса оболочки ВК к ее толщине K . Исследованы ВК с различными соотношениями толщины и радиуса (рис. 4).

Для характеристик материала выбирались значения, соответствующие сталям: модуль Юнга $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³. Вектор смещения $\mathbf{D}$ и компоненты тензора напряжений σ_{zz} , σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{rz} в начальный

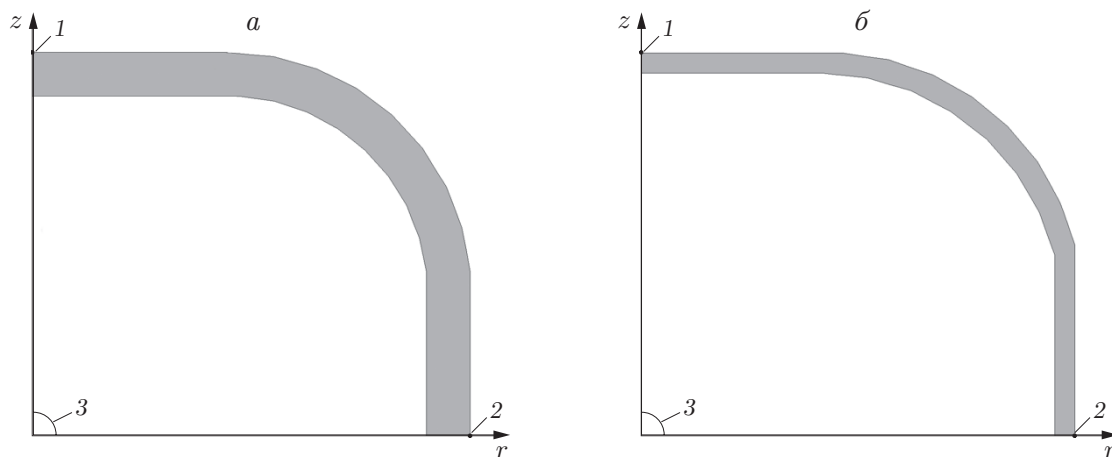


Рис. 4. Толстостенная (а) и тонкостенная (б) оболочки ВК:

1 — полюс, в котором эквивалентные напряжения максимальны, 2 — середина цилиндрической обечайки, где эквивалентные напряжения минимальны, 3 — заряд ВВ

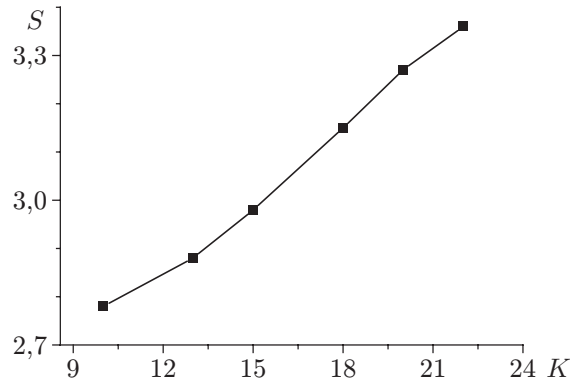


Рис. 5. Зависимость коэффициента “концентрации” напряжений в оболочке ВК S от отношения радиуса цилиндрической обечайки к ее толщине K

момент времени задавались равными нулю. На торцах оболочки ставились граничные условия симметрии, на внешней поверхности оболочки давление P полагалось равным нулю. Зависимость безразмерной величины S от безразмерной величины K не зависит от конкретных значений размерных параметров камеры. На внутренней поверхности оболочки задавалось давление $P = 32$ МПа при $t \leq 10$ мкс и давление $P = 0$ при $t > 10$ мкс, что соответствует нагрузке при взрыве заряда ВВ массой 0,2 кг в тротиловом эквиваленте. Толщина оболочки варьировалась в диапазоне от 18 до 40 мм. Внешний радиус оболочки равен 0,4 м, расстояние от геометрического центра оболочки до полюса — 0,19 м. Указанные габариты камеры, величина и длительность импульса соответствуют оболочке камеры ВК-02, описанной в [11] и предназначенной для локализации заряда ВВ массой 0,2 кг в тротиловом эквиваленте. Длина цилиндрической обечайки составляла 300 мм, толщина оболочки — 30 мм.

В рамках теории линейной упругости нестационарное осесимметричное напряженно-деформированное состояние описывается системой уравнений [12]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, & \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \sigma_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right), & \sigma_{rr} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, & \sigma_{\theta\theta} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{D} + 2\mu \frac{u}{r}, \end{aligned}$$

где u , w — компоненты вектора смещения $\mathbf{D}$. Постоянные Ламе λ и μ связаны с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν соотношениями

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Численные расчеты выполнены с использованием одного из вариантов метода конечных элементов [13] для уравнений линейной теории упругости.

3. Обсуждение результатов. На рис. 5 приведена расчетная зависимость коэффициента “концентрации” напряжений в оболочке ВК S от отношения радиуса цилиндрической обечайки ВК к ее толщине K . Видно, что зависимость S от K имеет нелинейный характер. На кривой этой зависимости можно выделить три участка с различным углом наклона. Также на рис. 5 видно, что функция $S(K)$ является монотонно возрастающей. Следовательно, с увеличением параметра K и уменьшением толщины оболочки

усиливается эффект “раскачки”, что приводит, в частности, к увеличению сейсмического воздействия взрыва. В предельных случаях для толстостенной и тонкостенной оболочек изменение безразмерного параметра K оказывает менее существенное влияние на эффект “раскачки” [14] (или “эффект бича” [15, 16]), чем в остальных случаях.

Коэффициент “концентрации” напряжений в полюсах имеет наименьшее значение при наименьших значениях параметра K , что можно объяснить большей жесткостью толстостенных оболочек по сравнению с тонкостенными. Также следует отметить, что в наиболее часто реализующихся на практике случаях, а именно при $10 < K < 16$, значение S находится в диапазоне $2,7 < S < 2,9$.

Численные расчеты напряженно-деформированного состояния оболочек ВК позволяют оптимизировать массогабаритные характеристики ВК, описанных в п. 1.

Заключение. Приведены варианты технических решений, позволяющие проектировать и изготавливать специализированные установки для проведения исследований быстропротекающих процессов с использованием синхротронного излучения, в которых взрывные камеры оборудованы юстировочным устройством. Для установки КВ-02 численно определена степень неоднородности напряженного состояния оболочки в зависимости от отношения радиуса цилиндрической части корпуса к ее толщине K . Установлено, что с уменьшением толщины оболочки эффект “раскачки” оказывает более существенное влияние на интенсивность напряжений в полюсах. Минимальные “концентрации” напряжений в полюсе соответствуют минимальным значениям K , при которых жесткость оболочки максимальна. В случаях, соответствующих реальным взрывным камерам, значение коэффициента “концентрации” напряжений вследствие изгибных колебаний оболочки находится в диапазоне $2,7 < S < 2,9$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Титов В. М., Прууэл Э. Р., Тен К. А. и др.** Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 6. С. 3–15.
2. **Тен К. А., Прууэл Э. Р., Кашкаров А. О. и др.** Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами синхротронного излучения // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 5. С. 103–111. DOI: 10.15372/FGV20180514.
3. **Tolochko B. P., Kosov A. V., Evdokov O. V., et al.** The synchrotron radiation beamline 8-b at VEPP-4 collider for SAXS, WAXS and micro tomography investigation of fast processes at extreme condition of high temperature and pressure with nanosecond time resolution // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 427–433. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.072.
4. **Прууэл Э. Р., Тен К. А., Толочко Б. П. и др.** Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов // Докл. АН. 2013. Т. 448, № 1. С. 38–42. DOI: 10.7868/S086956521301012X.
5. **Пальчиков Е. И.** Портативные импульсные рентгеновские установки для регистрации быстропротекающих процессов. 1. Принципы построения // Юж.-Сиб. науч. вестн. 2018. № 4. С. 202–210. DOI: 10.25699/SSSB.2018.24.23160.
6. **Пальчиков Е. И.** Портативные импульсные рентгеновские установки для регистрации быстропротекающих процессов. 2. Обзор устройств основных производителей // Юж.-Сиб. науч. вестн. 2018. № 4. С. 211–223. DOI: 10.25699/SSSB.2018.24.23161.
7. **Пат. 2630150 РФ, МПК В 21 D 26/08.** Уплотнительный узел разъема камеры для обработки материалов энергией взрыва / А. А. Мещеряков, Н. П. Ермилов, Б. С. Злобин, Ю. П. Мещеряков. Опубл. 05.09.2017, Бюл. № 25.

8. Пат. 2702600 РФ, МПК F 16 K 24/00. Газовыпускной клапан камеры для обработки материалов энергией взрыва / Б. С. Злобин, Ю. В. Скорняков, Н. П. Ермилов, А. А. Мещеряков. Оpubл. 09.10.2019, Бюл. № 28.
9. Пат. 2732623 РФ, МПК F 16 K 17/16, F 16 K 17/40. Вакуумный клапан с регулируемой мембраной / Н. П. Ермилов, Б. С. Злобин, Ю. В. Скорняков, В. В. Киселев. Оpubл. 21.09.2020, Бюл. № 27.
10. Shtertser A., Stoyanovskii O., Zlobin B., et al. Designing and manufacturing of explosion chambers for scientific research and explosive working of materials // Arch. Metall. Materials. 2014. V. 59, iss. 4. P. 1619–1624. DOI: 10.2478/amm-2014-0275.
11. Мещеряков Ю. П., Пикаревский А. А., Стояновский О. И. Расчет максимальных напряжений в полюсах взрывной камеры для сварки взрывом при условиях реального нагружения // Изв. Волг. гос. техн. ун-та. 2010. № 5. С. 56–65.
12. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. Киев: Наук. думка, 1972.
13. Мещеряков Ю. П. Численное моделирование процесса резки облученных тепловыделяющих сборок // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 134–140.
14. Абакумов А. И., Егунов В. В., Иванов А. Г. и др. Расчетно-экспериментальное исследование деформации оболочек взрывных камер // ПМТФ. 1984. № 3. С. 127–130.
15. Корнев В. М., Адищев В. В., Митрофанов А. Н., Грехов В. А. Экспериментальное исследование и анализ колебаний оболочки взрывной камеры // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 155–157.
16. Адищев В. В., Корнев В. М. К расчету оболочек взрывных камер // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 108–114.

*Поступила в редакцию 5/XI 2020 г.,
после доработки — 5/XI 2020 г.
Принята к публикации 25/I 2021 г.*
