

DOI: 10.18721/JEST.25305
УДК 533.6.011.72

М.В. Сильников

ЗАО «Научно-производственное объединение Специальных материалов»,
Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В статье представлены пути и методы использования газонаполненных релаксационных систем для обеспечения безопасного применения импульсных высокоэнергетических технологий. Рассмотрены акустические характеристики релаксационных систем, ожидаемые пределы изменения перепада давления при отражении ударных волн на жесткой стенке в двухфазных средах. Описаны реальные возможности регулирования параметров взрывных волн при детонации зарядов взрывчатых веществ в различных средах, динамическое поведение ударных волн в релаксационных системах. Показаны различные схемы и методы преобразования подводных взрывных нагрузок. Приведены примеры использования структурированных релаксационных систем для защиты от внешних, вибрационных и колебательных воздействий. Приведена актуальность описания закономерностей эволюции ударно-волновых процессов в газах, жидкостях и газожидкостных системах с единых позиций и выявление критериев подобия взаимодействия ударных волн с биологическими объектами и конструкциями.

Ключевые слова: релаксационные системы, обеспечение безопасности, импульсные высокоэнергетические технологии, ударные волны, ударно-волновые процессы, газожидкостные системы, двухфазные среды, детонация, взрывные волны, параметры, динамика.

Ссылка при цитировании:

Сильников М.В. Применение релаксационных систем для обеспечения безопасности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 71–85. DOI: 10.18721/JEST.25305

M.V. Silnikov

Special Materials Corp., St. Petersburg, Russia

APPLICATION OF RELAXATION SYSTEMS FOR SECURITY

The article presents ways and methods of using gas-filled relaxation systems to ensure safe use of pulsed high-energy technologies. The acoustic characteristics of relaxation systems, the expected limits of the pressure drop during the reflection of shock waves on a rigid wall in two-phase media are considered. The real possibilities of controlling the parameters of explosive waves during detonation of explosive charges in various media, the dynamic behavior of shock waves in relaxation systems are described. Various schemes and methods for converting underwater explosive loads are shown. Examples of using structured relaxation systems to protect against external, vibrational and vibrational influences are given. The relevance of describing the laws of evolution of shock-wave processes in gases, liquids and gas-liquid systems from a single perspective and identifying criteria for similarity of interaction of shock waves with biological objects and structures is given.

Keywords: relaxation systems, safety, pulsed high-energy technologies, shock waves, shock wave processes, gas-liquid systems, two-phase media, detonation, blast waves, parameters, dynamics.

Citation:

M.V. Silnikov, Application of relaxation systems for security, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 71–85. DOI: 10.18721/JEST.25305

Введение. Интенсивное развитие технологических процессов резки, сварки и обработки материалов взрывом существенно расширило область применения конденсированных взрывчатых веществ в промышленности. При этом значительно возрос объем технологических работ, которые приходится проводить не на специально оборудованных полигонах и во взрывных камерах, а в городских условиях и цеховых помещениях, в пожаро-взрывоопасной обстановке при ликвидации последствий аварий на нефтегазопроводном транспорте и в условиях радиационных загрязнений.

Семейство портативных переносных локализаторов взрыва типа «Фонтан» на основе релаксационных систем в эластичных оболочках (испытаны и серийно изготовлены в НПО Спецматериалов г. Санкт-Петербург) успешно применено для изоляции и последующей ликвидации взрывоопасных предметов в интересах МВД, МЧС и МО России.

Наличие в России организаций, имеющих опыт изготовления и использования удлиненных кумулятивных зарядов (УКЗ), в сочетании с простыми средствами локализации и опытом их применения, создает предпосылки быстрого внедрения, упрощения и удешевления ликвидационных и утилизационных мероприятий на отработавших положенный срок энергетических и транспортных объектах. Требуется специальный анализ вопроса о разумной комбинации экологически чистых импульсных технологий с традиционными способами на разных стадиях разделки и утилизации.

Центральной проблемой при решении задач импульсной разделки и разрезки демонтируемых конструкций является комплексное обеспечение экологической чистоты и пожаро-

взрывобезопасности технологических процессов с использованием энергии взрыва в воздушной атмосфере или под водой. Основными из негативных побочных факторов, сопровождающих использование взрывных технологий, являются [1, 2]:

взрывные воздушные волны, опасные для обслуживающего персонала и конструктивных элементов оборудования, соседнего с местом проведения взрывных работ;

огненные шары от продуктов не полного взрывного превращения, способные стать очагами вторичного возгорания вблизи места взрыва;

пылеобразование и выбросы пыли от разрушаемых взрывом конструкций;

гидроударные волны, приводящие к поражению ихтиофауны при подводных взрывных работах и повреждению близлежащих конструкций;

вероятность возбуждения неконтролируемых процессов горения и детонации при ведении работ во взрывоопасной атмосфере.

Для ослабления и трансформации ударных волн до безопасного уровня по фугасным нагрузкам, подавления огненных шаров и пылевых выбросов во всех перечисленных случаях актуальной является проблема создания эффективных и простых в исполнении способов комплексной локализации действия взрыва. Подобные способы должны быть простыми в технической реализации, обладать мобильностью и не снижать эффективности самих технологических процессов резки, сварки и обработки взрывом. В частности, в технологиях с использованием УКЗ методы локализации не должны препятствовать образованию кумулятивных струй при резке взрывом.

Возникающие при этом проблемы носят междисциплинарный характер и лежат на стыке различных областей науки, прежде всего, физики взрыва, гидродинамики, сварки и родственных технологий. Комплексное изучение ударно-волновых процессов и обобщение полученных результатов потребовало развития методов аналогии и подобия, а также эффективных физических и математических моделей, которые выявляют общие закономерности и определяют безразмерные параметры, позволяющие целенаправленно управлять ударно-волновыми нагрузками при взрыве в релаксационных (газожидкостных) средах с различной структурой и термодинамическими свойствами.

В связи с использованием на практике широкого ассортимента релаксационных сред, актуальным оказалось описание закономерностей эволюции ударно-волновых процессов в газах, жидкостях и газожидкостных системах с единых позиций и выявление критериев подобия взаимодействия ударных волн с биологическими объектами и конструкциями. Такой синтез знаний об эволюции и динамике ударно-волновых процессов необходим и для решения обратных задач взрыво-технической экспертизы аварий и несанкционированных взрывов с целью определения (по данным поражения окружающих объектов) характеристик и энергии источников взрыва.

Акустические характеристики релаксационных систем

Рассмотрим вопрос о повышении сжимаемости сплошной жидкости (например, воды) за счет ее капсуляции в эластичной сжимаемой оболочке. Решение такой задачи известно, и в качестве примера возьмем систему вода + пузырьки воздуха в непроницаемой оболочке (для простоты в трубе) с податливыми стенками [3–8]. Скорость звука в такой системе можно определить по соотношению

$$C^2 = [\beta \rho_g + (1-\beta) \rho_f]^{-1} \left[\frac{\beta}{P_0} + \frac{1-\beta}{\rho_f C_f^2} + \frac{2\theta r}{Et} \right]^{-1}.$$

Здесь β – объемная доля пузырьков газа в жидкости; ρ_g – плотность газа; ρ_f – плотность жидкости; P_0 – давление; E – модуль упругости материала оболочки (стенки трубы); θ – коэффициент, характеризующий условия закрепления оболочки ($\theta = 1 \dots 0,5$ для трубы, закрепленной с одного конца и $\theta = 1 - \mu^2$ для трубы, защемленной с обоих концов); μ – коэффициент Пуассона; t – толщина стенки оболочки (трубы); r – радиус оболочки (трубы).

Параметрическая зависимость $C = f(\beta)$ представлена линией 1 на рис. 1 для практически интересной релаксационной системы жидкость + пузырьки воздуха при $P_0 = 0,1$ МПа и величине параметра $2\theta r/t = 10$. Линия 1 рассчитана для скорости звука в объеме несжимаемой жидкости ($C_f > \infty$), помещенной в несжимаемую оболочку ($E > \infty$). Линия 2 получена для воды ($C_f = 1450 \dots 1500$ м/с) при $E \rightarrow \infty$. Линия 3 получена для воды в стальной трубе при $E = 200$ ГПа. Линия 4 получена для воды в оболочке из эластичного материала с $E = 1$ ГПа. Как видно при $\beta \leq 10^{-2}$ скорость звука D регулируется упругостью материала стенок оболочки. При объемной доле газовых включений в жидкости $\beta \geq 10^{-2}$ или точнее $\beta \geq \Delta P_1 / \rho_f C_f^2$ сжимаемость конструкции (оболочка–жидкость–газовые поры) не зависит от свойств наполнителя и материала стенок оболочки. Здесь: $\Delta P_1 = P_1 - P_0$ – амплитуда возмущения давления при давлении за фронтом P_1 . Как следует из графика на рис. 1 высокая сжимаемость передающей среды может быть достигнута не только за счет внесения газовых включений в воду, но и при $\beta \leq 10^{-2}$ за счет капсуляции воды в эластичную оболочку с $E < 10$ ГПа. При этом оказывается, что равновесная скорость звука в газожидкостной системе может быть заметно ниже скорости звука в отдельных компонентах системы, т. е. в газе и жидкости. Имеются однозначные экспериментальные подтверждения этого уникального свойства, отражающего повышенную сжимаемость многих релаксационных систем.

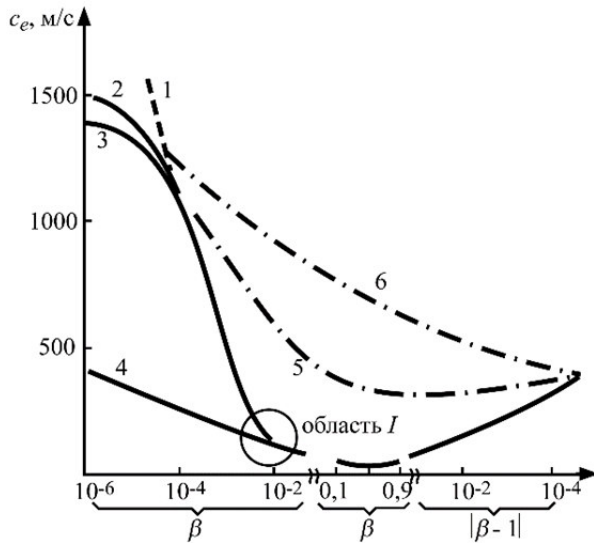


Рис. 1. Зависимость равновесной скорости звука в двухфазной среде от давления и сжимаемости стенок [5–10]: линия 1 – $P_0 = 0,1$ МПа для несжимаемой жидкости; линия 2 – $P_0 = 0,1$ МПа для воды в трубе с несжимаемыми стенками; линия 3 – $P_0 = 0,1$ МПа для воды в стальной трубе; линия 4 – $P_0 = 0,1$ МПа для воды в полимерной оболочке; линия 5 – $P_0 = 1$ МПа и линия 6 – $P_0 = 10$ МПа для воды в трубе с несжимаемыми стенками

Fig. 1. The dependence of the equilibrium speed of sound in a two-phase medium on the pressure and compressibility of the walls [5 ... 10]: line 1 – $P_0 = 0.1$ MPa for an incompressible fluid; line 2 – $P_0 = 0.1$ MPa for water in a pipe with incompressible walls; line 3 – $P_0 = 0.1$ MPa for water in a steel pipe; line 4 – $P_0 = 0.1$ MPa for water in a polymer shell; line 5 – $P_0 = 1$ MPa and line 6 – $P_0 = 10$ MPa for water in a pipe with incompressible walls

Ожидаемые пределы изменения перепада давления при отражении ударных волн на жесткой стенке в двухфазных средах

Необходимость предсказания уровней давления за отраженными ударными волнами на неподвижных жестких препятствиях обусловлена требованиями оценки нагрузок от ударных или взрывных волн. Для однородных изотропных сред (газ или жидкость) уровень давления за отраженными волнами описывается хорошо известными соотношениями. Так при движении волны давления с перепадом $\Delta P_1 = P_1 - P_0$

по несжимаемой среде встреча с жесткой стенкой приводит к появлению отраженной волны с перепадом давления $\Delta P_2 = P_2 - P_1$, причем $\Delta P_1 = \Delta P_2$ или $P_2 - P_0 = 2\Delta P_1$. Отсюда ясна известная связь $\Theta_2 + \Theta_1^{-1} = 2$, где $\Theta_2 = P_2/P_1$ и $\Theta_1 = P_1/P_0$. Здесь и далее P_2 – давление за отраженной волной.

В сжимаемой среде уровень давления за отраженной волной намного выше. Так в идеальном газе с соотношением удельных теплоемкостей γ $\Theta_2^{1/\gamma} (\Theta_1^{1/\gamma} - 1)(\Theta_2^{1/\gamma} - 1)^{-1} = \Theta_1(\Theta_2 - 1)(\Theta_1 - 1)^{-1}$.

Максимальное повышение давления реализуется в изотермическом газе, когда $\Theta_2 = \Theta_1$. Однако в реальных системах, где $\gamma > 1$, всегда $\Theta_2 < \Theta_1$. Так в идеальном газе при $\gamma = \text{const}$ и $\Theta_1 \rightarrow \infty$ получаем $\Theta_2 = (3\gamma - 1)(\gamma - 1)^{-1}$. В пыльном газе, газожидкостной среде пенистой структуры, взвешях пузырьков газа в жидкости соотношение $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ близко к таковому в газе при надлежащем выборе параметра соотношения теплоемкостей. Однако кажущееся на первый взгляд предельным соотношение $\Theta_2 = \Theta_1$ в ряде практически важных случаев не выполняется, так как для многих систем $\Theta_2 > \Theta_1$. Соотношение $\Theta_2 > \Theta_1$ выполняется в двухфазных системах пузырьковой структуры с конденсирующимся или быстрорастворимым газом в пузырьках. На рис. 2 представлена обобщенная диаграмма наблюдений возможных значений $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ с учетом данных в [9]. Линия 1 построена для несжимаемой жидкости и является опорной. Линия 2 дает связь Θ_2 и Θ_1 в идеальном газе, где предельная степень повышения давления $\Theta_2 = (3\gamma - 1)/(\gamma - 1)$. Линия 3, где $\Theta_2 = \Theta_1$, получена для изотермического газа. Для волны давления, бегущей со скоростью D по двухфазной среде, состоящей из сжимаемой жидкости со скоростью звука C_f и включений газа, имеем $\Theta_2 = 1 + C_f(1 - \Theta_1^{-1})[(1 - \beta)D]^{-1}$. В пределе для сильных волн при $\Theta_1 > \infty$ получаем скорость волны давления $D \rightarrow C_f$ и тогда $\Theta_2 \rightarrow (2 - \beta)(1 - \beta)^{-1}$.

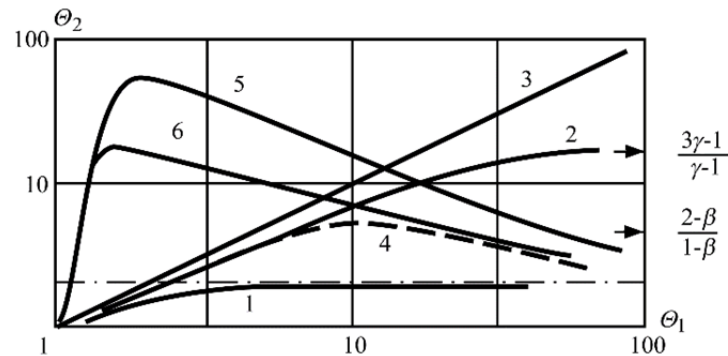


Рис. 2. Обобщенная диаграмма зависимости параметров отраженных волн от интенсивности падающей волны: линия 1 – несжимаемая жидкость без газовых включений; линия 2 – газ; линия 3 – несжимаемая жидкость с пузырьками изотермического газа; линия 4 – сжимаемая жидкость с пузырьками изотермического нерастворимого и неконденсирующегося газа; линии 5, 6 – двухфазные системы с пузырьками растворимого газа или конденсирующегося пара

Fig. 2. A generalized diagram of the dependence of the parameters of the reflected waves on the intensity of the incident wave: line 1 – incompressible liquid without gas inclusions; line 2 – gas; Line 3 – incompressible fluid with isothermal gas bubbles; line 4 – compressible liquid with bubbles of isothermal insoluble and non-condensable gas; lines 5, 6 – two-phase systems with bubbles of soluble gas or condensing vapor

Таким образом, в двухфазной среде связь $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ представляется линией 4. Сначала при малых уровнях Θ_1 поведение двухфазной среды при ударном сжатии близко к поведению изотермического газа и $\Theta_2 = \Theta_1$. Затем разогрев газа в пузырьках возрастает и их поведение при сжатии отлично от изотермического, т. е. $\Theta_2 < \Theta_1$ и величина Θ_2 лежит между линиями 2 и 3. При дальнейшем усилении волны (т. е. росте Θ_1) начинает проявляться сжимаемость жидкости, сначала за отраженной, а затем и за проходящей волной. Тогда при $\beta \ll 1$ получаем $\Theta_2 \rightarrow 2$ сверху опорной линии 1. Таким образом, зависимость $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ в двухфазных средах имеет максимум по Θ_2 при некотором Θ_{1max} . В системах с пузырьками из растворимых или конденсирующихся газов (паров) наибольшие уровни Θ_2 характерны для слабых квазиакустических

возмущений. Если интенсивность проходящей волны достаточна для полной конденсации или растворения паровых или газовых пузырьков, то

$$\frac{(\Theta_{2max} - 1)_{H_2O}}{(\Theta_{2max} - 1)_f} = \sqrt{\frac{(\rho c^2)_{H_2O}}{(\rho c^2)_f}}$$

$$\Theta_2 = 1 + \Psi \Theta_1^{-1} (\Theta_1 - 1)^{0.5}$$

при $\Psi = \left\{ \beta \rho_f C_f^2 \left[(1 - \beta) P_0 \right]^{-1} \right\}^{0.5}$.

Максимальная величина $\Theta_2 = 1 + 0,5\Psi$ достигается при $\Theta_1 \approx 2$.

Экспериментальные исследования [9–17] подтвердили достижение максимальных значений Θ_2 при $1,2 < \Theta_1 < 3$, причем $\Theta_2 > \Theta_1$. Это показано на диаграмме рис. 2 линиями 5 и 6 для двухфазной среды с переменной массовой

долей газа при двух значениях объемного содержания газа в жидкости β_{15} (линия 5) и β_{16} (линия 6), причем $\beta_{15} > \beta_{16}$. Табл. 1 дает представление о максимальном уровне коэффициента повышения давления при отражении в системе с полной конденсацией паровых включений за проходящей ударной волной для случая, когда несущая жидкость – вода.

Предельный уровень $\Theta_{2lim} \rightarrow (2 - \beta)(1 - \beta)^{-1}$ при $\Theta_1 \rightarrow \infty$ характерен для любых двухфазных систем.

Практическая важность описанных вариаций акустических свойств двухфазных газожидкостных систем и изменения параметров отраженных импульсов давления до сих пор не принимается во внимание при реализации технологических процессов штамповки взрывом [18]. Пренебрежение учетом влияния малой объемной (и, тем более, массовой) доли газовых включений в объеме передающей динамическую нагрузку жидкой среды на ее сжимаемость способствует неправильной оценке амплитудно-частотных характеристик технологического цикла. Это ведет к излишним материальным затратам из-за преждевременного износа оборудования.

Таблица 1

Максимальный уровень коэффициента повышения давления Θ_{2max} при отражении ударных волн в газожидкостной среде на жесткой стенке

Maximum level of coefficient of increase in pressure Θ_{2max} upon reflection of shock waves in a gas-liquid medium on a rigid wall

$\beta \backslash P_0$	0,1 МПа	1 МПа	10 МПа
10^{-2}	8,5	3,87	1,75
10^{-1}	23,5	9,61	3,25
0,5	76	48,4	7,5

Разработанные базовые модели динамики ударных волн в газожидкостных средах и накопленный банк данных, полученных в ходе проведения и обобщения экспериментов по

взаимодействию ударных волн с биологическими объектами и элементами конструкций, может быть реализован в современных модулях информационной поддержки взрывных технологий, позволяющих оперативно реагировать на чрезвычайные ситуации и принимать адекватные решения при ликвидации их последствий.

Реальные возможности регулирования параметров взрывных волн при детонации зарядов ВВ в различных средах

Накопленный багаж расчетных и экспериментальных данных об интенсивности взрывных волн, генерируемых зарядами ВВ в гомогенных и гетерогенных системах, позволяет указать диапазон ожидаемых величин перепада давления при переходе от одной среды к другой. На сводном графике рис. 3 указаны величины перепада давления на фронте взрывной волны после взрыва заряда ВВ (тротил)

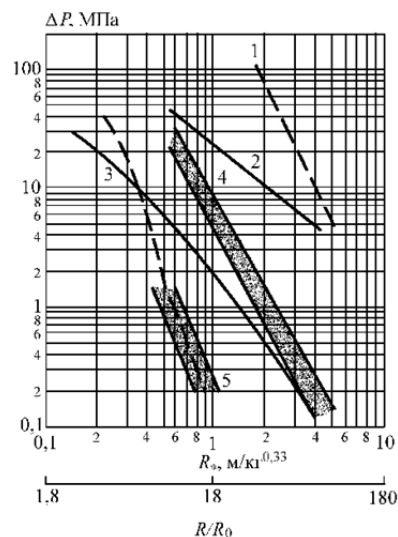


Рис. 3. Сводный график зависимости перепада давления взрывной волны для различных сред [4]:

- 1 – плотный грунт; 2 – дегазированная вода; 3 – воздух;
- 4 – пористый грунт; 5 – водномеханическая пена

Fig. 3. The summary graph of the pressure drop of the blast wave for various environments [4]:

- 1 – dense soil; 2 – degassed water; 3 – air;
- 4 – porous soil; 5 – water-mechanical foam

в плотном грунте с минимальным числом газовых включений (линия 1), в дегазированной воде (линия 2) и в воздухе (линия 3). Все графики построены при начальном давлении $P_0 = 0,1$ МПа. Введение газовых пор по объему до $\beta \leq 10$ % ведет к снижению уровня амплитуд взрывных волн. Заштрихованная полоса значений перепадов давления (4) показывает, что при замене плотного грунта на пористый наполнитель уровень давления может понизиться до 100 раз. Переход от сплошной жидкости к системе типа пузырьки газа + жидкость также приводит к резкому снижению величины ΔP вплоть до уровня перепада давления, характерного для чистого газа (это наблюдается при объемной доле пузырьков ($\beta > 1$ %)). Большой наклон зависимостей $\Delta P = \Delta P(R_*)$ в системах пузырьки газа + жидкость, также попадающих в заштрихованную зону (4), свидетельствует об усилении диссипативных процессов. Однако зависимость $\Delta P = \Delta P(R_*)$ для газа (линия 3) не является предельной. Еще меньшие значения перепада давления ΔP достижимы при проведении взрывов ВВ в высокократной газожидкостной пене при концентрации жидкости $\sigma = (5...50)$ кг/м³ (полоса значений 5). Сопоставление зависимости $\Delta P = \Delta P(R_*)$ для воздушного взрыва (3) и взрыва в пористом грунте (зона 4) показывает, что при $R_* = 4...6$ м/кг^{0,33} ($R/R_0 \approx 70...100$) амплитуды квазиакустических возмущений давления в воздухе и в пористом грунте почти сравниваются. При $R/R_0 \approx 150...200$ ($R_* \approx 10$ м/кг^{0,33}) амплитуда квазиакустической волны в газе больше таковой в пористом грунте. Здесь R_0 – радиус заряда ВВ весом G , так что приведенный линейный масштаб для расстояния R в весовых переменных Садовско–Гопкинсона составляет $R_* = R/G^{0,33}$.

Динамическое поведение ударных волн в релаксационных системах

Эффективные методы локализации действия взрыва и технические средства на их основе созданы за счет использования в качестве локализующих газожидкостных сред типа водно-

механических пен и пузырьковых систем. Динамическое поведение ударных волн в указанных релаксационных системах качественно отличается от распространения ударных волн в гомогенных средах типа газа и жидкости. Это связано с наличием развитых **релаксационных зон** межфазного взаимодействия газа с жидкостью и аномально высокой сжимаемостью газожидкостных систем по сравнению либо с жидкостью, либо с газом. Характерной особенностью ударно-волновых процессов в газожидкостных средах является резкая зависимость параметров ударных волн от глубины протекания **релаксационных процессов**. Динамика ударно-волновых процессов при взрыве в дисперсных средах осложнена процессами межфазного взаимодействия, что затрудняет теоретический анализ ударно-волновых процессов в этих средах и требует проведения широких экспериментальных исследований. Принципиальным являлось определение асимптотических решений, описывающих не только начальную стадию взрыва, но и динамику поздней стадии затухания ударных волн в области квазиакустики при замороженных процессах релаксации или при термодинамическом равновесии между газовой и жидкой фазами.

Недостаточная изученность защитных свойств газонаполненных систем приводит к неполному использованию представляемых ими возможностей. Так при ведении взрывных работ в акваториях распространена схема защиты пузырьковыми шлейфами как на рис. 4. Это типичный пример отстраненного пузырькового экрана, когда взрыв производится в воде и взрывная волна достигает экран через слой жидкости (воды). Снижение взрывных нагрузок оказалось бы более эффективным при погружении источника взрыва в пузырьковый шлейф, как это предложено в [19, 20] и проиллюстрировано на рис. 5, а на примере подводного взрыва линейных зарядов ВВ. В отсутствие пузырькового локализатора датчики давления 1 и 2 фиксировали типичную взрывную волну с амплитудой около (25 ± 5) МПа (на удалении 1 м) и $(8,6 \pm 1)$ МПа (на удалении

1,5 м) как на рис. 5, б. При взрыве внутри шлейфа вместо взрывной нагрузки получали растянутый во времени хаотический волновой пакет со значительно меньшим уровнем возмущений давления. Таким образом, в схеме проведения взрывных работ по схеме рис. 4 упущена просто реализуемая возможность дополнительного подавления и трансформации гидроимпульсных нагрузок.

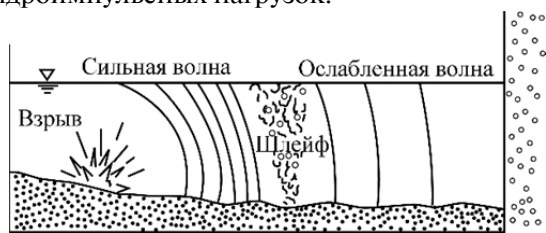


Рис. 4. Схема защиты береговых сооружений пузырьковым экраном при ведении технологических операций на реке Мозыль (ФРГ) по [1]

Fig. 4. Scheme of protection of coastal facilities with a bubble screen when conducting technological operations on the Mozyl River (Germany) according to [1]

Преобразование подводных взрывных нагрузок низкочастотными слоями

Взрывные волны подводного взрыва ВВ почти всегда попадают в разряд акустических возмущений давления. Однако уровень абсолютных значений амплитуды таких волн велик,

и они представляют реальную опасность для биообъектов, погруженных в жидкость. В отношении акустических импульсов, какими являются подводные взрывные волны, понятие ослабления волн является неточным. Более уместно говорить о способах изменения (трансформации) вида гидровзрывной нагрузки. Поставленная задача достаточно успешно решается с помощью релакционных газонаполненных экранов, воздвигаемых в жидкости на пути движения взрывной волны. Совокупность известных сведений о взаимодействии подводных взрывных волн с защитными пузырьковыми экранами [20–22] или с газонаполненными экранами из пористых полимерных материалов [23] позволяет различать два типа трансформации возмущений давления под водой:

трансформация взрывной нагрузки экраном, контактирующим с защищаемым объектом → присоединенный защитный экран (ПзЭ);

трансформация взрывной нагрузки экраном, удаленным от защищаемого объекта → отстраненный защитный экран (ОзЭ).

Типичные примеры трансформации профиля давления во времени для подводной взрывной волны в случаях использования ПзЭ или ОзЭ показаны на рис. 4.

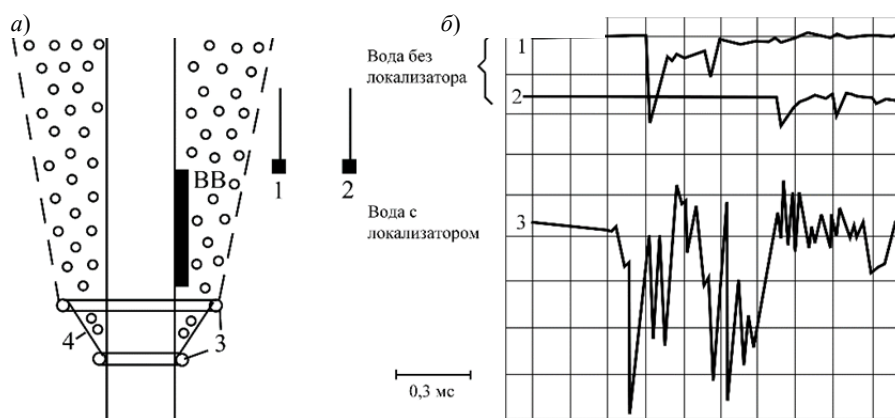


Рис. 5. Схема защиты акватории от взрыва заряда ВВ, погруженного в двухфазную среду вода-пузырьки воздуха по [23]:

1, 2 – гидрофоны, 3 – перфорированные газо-подводящие коллекторы, 4 – ограничительные сетки

Fig. 5. The scheme of protection of the water area from the explosion of an explosive charge immersed in a two-phase medium of water-air bubbles according to [23]:

1, 2 – hydrophones, 3 – perforated gas supply manifolds, 4 – restrictive grids

Преобразование подводных взрывных нагрузок присоединенными защитными экранами

Типичная взрывная волна с непрерывно убывающим давлением за фронтом преобразуется после выхода из воды и пересечения пузырькового ПзЭ в волновой пакет (рис. 6). ПзЭ (1) толщиной 80 мм образован потоком воздуха из системы отверстий (3). Амплитуда волны в воде перед экраном $\Delta P_1 \approx 0,2$ МПа. Внутри ПзЭ (датчик давления 4) взрывная волна растягивается во времени из-за снижения скорости звука в пузырьковом шлейфе. Масштаб времени отмечен на рисунке. На стенке сосуда за ПзЭ датчик давления 5 фиксирует усиленные до уровня $\Delta P_1 \approx (0,5...0,7)$ МПа колебания давления в течение времени $\approx 10^{-3}$ с. Без экрана датчик 5 фиксирует только отраженную волну с амплитудой около 0,4 МПа, как при акустическом взаимодействии в дегазированной воде падающей волны со стенкой. Таким образом, ПзЭ не выполняет предполагаемую защитную функцию. Возможность реализации описанного эффекта предсказана в [22].

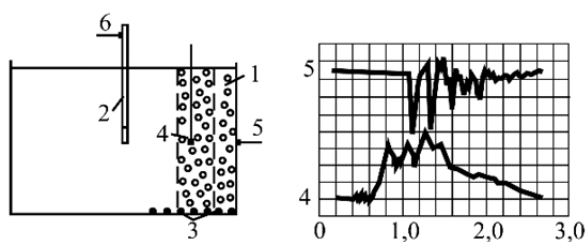


Рис. 6. Преобразование подводной трехмерной взрывной нагрузки в слое, присоединенном к преграде [2]:

- 1 – пузырьковый слой (подвижные пузыри);
- 2 – источник взрывной волны; 3 – генератор пузырей;
- 4, 5, 6 – датчики давления

Fig. 6. Transformation of an underwater three-dimensional explosive load in a layer attached to an obstacle [2]:

- 1 – bubble layer (moving bubbles); 2 – source of a blast wave;
- 3 – bubble generator; 4, 5, 6 – pressure sensors

Преобразование подводных взрывных нагрузок отстраненными защитными экранами

Типичная взрывная волна с теми же исходными параметрами, что в примере с ПзЭ проникает из воды в пузырьковый ОзЭ, отодвинутый от стенки на расстояние ≈ 200 мм – схема (рис. 7). Внутри экрана по показаниям датчика 4 скорость нарастания давления уменьшилась и время достижения максимального значения составляет $\approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ с. За ОзЭ датчик давления 5 на стенке фиксирует заметно ослабленные колебания давления. Общее представление о колебательном процессе в экране и на стенке дают показания датчиков на нижнем и верхнем лучах рис. 7, б соответственно. Если экрана в воде нет, то волновая картина упрощается и имеет вид как на рис. 7, в. Результаты лабораторных опытов с ПзЭ и ОзЭ нашли свое подтверждение для подводного взрыва ВВ [19], отмечены в крупномасштабных испытаниях [20] и воспроизведены в опытах с экранами из пористых полимерных материалов [23].

Отмеченные особенности преобразования взрывных волн отстраненным пузырьковым экраном наблюдались и в случае прохождения взрывной волны по заполненному водой каналу [22] на примере трансформации гидровзрывной нагрузки, создаваемой подводным электрическим разрядом. Трансформация нагрузки происходила в отстраненном от торца канала слое неподвижных наполненных воздухом резиновых шариков диаметром 7 мм. Длина слоя шариков менялась в интервале (1...30) см. Объемная доля полостей в пространстве, оккупированном шариками, $\beta = 1...30$ %. Как и в сферическом случае взрывная волна в слое преобразуется в низкочастотный волновой комплекс с пониженной амплитудой давления. Универсальность демпфирования коротковолновой гидровзрывной нагрузки газонаполненными слоями с пониженной скоростью звука подтверждена при создании нового поколения локализаторов

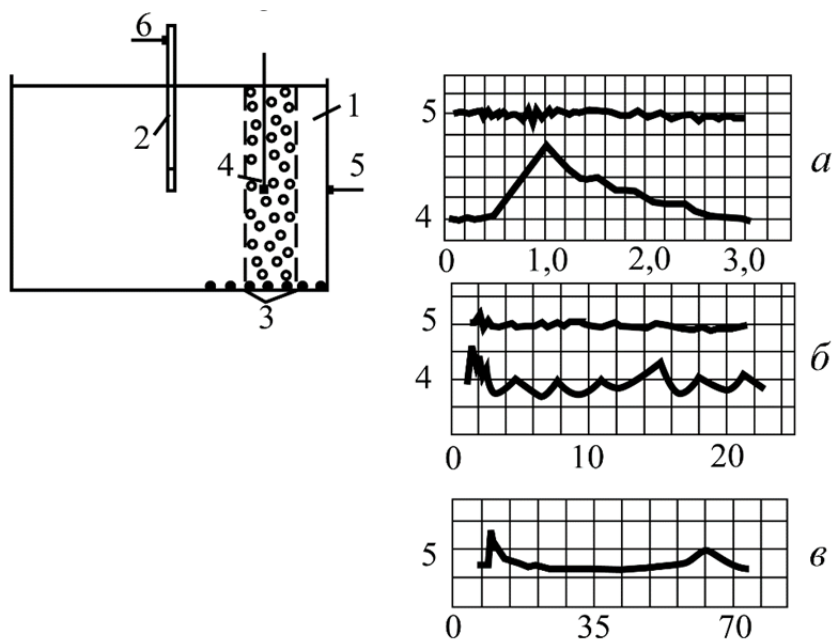


Рис. 7. Преобразование подводной трехмерной взрывной нагрузки пузырьковым слоем отодвинутым от преграды [2]:

1 – пузырьковый слой (подвижные пузыри); 2 – источник взрывной волны;
3 – генератор пузырей; 4, 5, 6 – датчики давления

Fig. 7. Conversion of an underwater three-dimensional explosive load with a bubble layer moved away from the barrier [2]:

1 – bubble layer (moving bubbles); 2 – source of a blast wave;
3 – bubble generator; 4, 5, 6 – pressure sensors

воздушного взрыва [24] и интересными опытами в [25]. В [25] низкочастотный промежуток в заполненном водой канале создавался за счет встроенной в стенки канала податливой газонаполненной пластины. Отмечается слабое затухание взрывной нагрузки в канале с жесткими стенками по амплитуде и сохранение формы сигнала на всем участке измерения. При наличии встроенной в стенку канала податливой пластины отмечено существенное (до 10 раз по амплитуде) ослабление сигнала и трансформация взрывной волны в растянутый во времени импульс сжатия.

Во всех опытах, где отмечено ослабление гидровзрывной нагрузки и трансформация профиля волны давления, скорость звука в ОзЭ (около 100 м/с) существенно ниже, чем в среде перед и за экраном (около 1500 м/с).

Весь комплекс вопросов об оптимальном использовании релаксационных газонаполненных слоев для защиты от подводных взрывных нагрузок остается, далек от полного рассмотрения.

Структурированные релаксационные системы для защиты от внешних воздействий

В [13–17] исследованы динамические процессы в структурированной трехфазной релаксационной системе жидкость + пузырьки газа (пара) + эластичный пористый каркас. В [13–17] каркас образован пенистым полимерным материалом с объемной плотностью $\sigma \approx (25 \pm 5) \text{ кг/м}^3$, например, пенополиуретаном. В [26] каркас сформирован сотовообразной структурой из тонкой алюминиевой фольги с объемной плотностью $\sigma \approx 25 \text{ кг/м}^3$.



Наличие пенообразного или сотового скелета в жидкости предотвращает перемещение жидкости и устраняет вредное смещение центра тяжести при ускорении или замедлении движения аппаратов с баками, наполненными жидкостью. При наличии в емкости границы раздела газ – жидкость устраняется появление волн на свободной поверхности. Использование в качестве внутреннего наполнителя легкого тонкостенного теплопроводящего металла (алюминия) с развитой удельной поверхностью (около $48,7 \text{ г/см}^2$) заметно отражается на тепловой инерции жидкости при внешнем нагреве. В итоге предложена оригинальная система предотвращения взрывов сосудов для хранения и транспортировки легкокипящих горючих жидкостей и сжиженных газов [26]. В том числе следует обратить внимание на повышенную устойчивость топливных баков со скелетообразующим наполнителем к действию зарядов простых и кумулятивных зарядов ВВ.

Результаты подавления взрывных нагрузок в жидкости нашли полезное применение для защиты топливных баков летательных аппаратов от гидроудара при внешнем импульсном воздействии через стенки бака на объем горючего. В [19] описана простая система подавления опасных колебаний давления в массе горючего за счет принудительного подвода в объем бака негорючих газовых пузырьков. Отмеченное при этом снижение амплитуды и характера колебаний давления соответствовало измерениям, описанным в [19, 20].

Релаксационные структуры для подавления вибрационных и колебательных воздействий

Снижение вибраций и колебательных воздействий представляет собой в ряде случаев важную техническую задачу, которая может быть решена с применением структурированных релаксационных структур. В Исследовательском центре им. М. В. Келдыша предложены демпферы из металлорезины для эффективного снижения уровня вибраций промыш-

ленных машин, трубопроводов или иных технических устройств [27]. Металлорезина представляет собой вязкоупругий газонаполненный металлический материал волоконной структуры, превосходящий по своим эксплуатационным свойствам демпферы из вспененной резины [28]. Демпферы из металлорезины снижают уровень вибраций энергонасыщенных технических устройств в 6...10 раз в диапазоне частот от 1 Гц до 7000 Гц при ничтожных затратах на эксплуатацию.

Применение импульсных энергетических технологий при демонтаже загрязненного оборудования

В последние годы накоплен уникальный опыт внедрения взрывных технологий на основе УКЗ при проведении специальных ликвидационных работ на ЧАЭС и в зоне отчуждения вокруг нее.

Специальные исследования не выявили негативного влияния повышенного радиоактивного фона на работоспособность ВВ и средств инициирования. Штатные электродетонаторы ЭДУ-1 оказались работоспособными при воздействии импульса мощностью 10^6 Р/с при экспозиционной дозе излучения до 10^4 Р . Ликвидационные приспособления на основе УКЗ и детонаторов ЭД-8Ж успешно использованы в 1986 г. при резке трубопроводов на 4-ом блоке ЧАЭС при уровне радиации около 150 Р/час . Актуальность исследований по поиску методов и эффективных средств подавления ударных волн, резко возросла в последние годы в связи с участием террористическими актами. В этом отношении локализаторы действия взрыва должны обеспечить защиту персонала и оборудования при консервации и ликвидации взрывоопасных предметов и устройств.

Несмотря на понятную аллергию к импульсным методам, связанную с применением ВВ, взрывные технологии при демонтаже загрязненного оборудования посредством УКЗ имеют неоспоримые преимущества перед традицион-

ными методами ввиду своей дистанционности, оперативности реализации. Устраняется необходимость долговременного присутствия персонала в опасных зонах для выполнения ликвидационных мероприятий. Разработанные системы локализации действия подводного и наземного взрывов нашли применение при ликвидации аварий на нефтяном и газопроводном транспорте, для утилизации и разделения металлоконструкций в 30-километровой зоне ЧАЭС, ликвидации последствий аварий на морских платформах и демонтаже гидротехнических сооружений на акваториях Каспийского, Черного и Азовского морей. Предложенные технические средства ведения подводных взрывных работ в свое время были допущены к применению специальным Распоряжением Совета Министров СССР. Разработанные модули информационной поддержки взрывных технологий и импульсные системы разделения конструкций с рекомендованными средствами защиты позволили использовать их в качестве эффективных технических средств для ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Использование особых амплитудно-частотных свойств релаксационных систем в импульсных энергетических технологиях

Разработанные лабораторные экспериментальные установки и методики исследования параметров ударных волн при взрыве в газе, жидкости и газожидкостных средах пенистой и пузырьковой структуры позволили провести прямое сопоставление фугасного действия взрыва в различных по структуре и термодинамическим свойствам средах.

Накопленный экспериментальный материал послужил основой при создании базы данных для разработки эффективных локализаторов взрыва и позволил проверить достоверность физических и математических моделей динамического поведения релаксационных систем при взрыве конденсированных ВВ.

Установленные опытные зависимости и разработанные на их основе методики определения поражающего действия взрыва послужили основой для создания прикладных программ определения допустимых расстояний при ведении работ в особых условиях радиационных загрязнений и в пожаро-взрывоопасной среде при ликвидации последствий аварий и катастроф на объектах ядерной энергетики, системах нефтяного и газопроводного транспорта.

Представлены научно-обоснованные рекомендации для разработки мобильных средств защиты от ударных волн, что расширило область практического использования энергии взрыва при резке, обработке и сварке взрывом. Применение релаксационных систем как рабочего тела для локализаторов взрыва привело к устранению опасности термического действия огненных шаров и подавлению пылеобразования при ведении взрывных работ.

Пакеты прикладных программ для определения технологических параметров локализаторов взрывов и допустимых расстояний по фугасному воздействию на биологические объекты и конструкции пригодны для решения обратных задач взрыво-технической экспертизы несанкционированных взрывов при авариях и террористических актах.

Созданы мобильные локализаторы действия взрыва и экологически чистые системы разделения конструкций на их основе расширили область применения технологических процессов резки, сварки и обработки металлов взрывом. Методы и технические средства подавления ударных волн перспективны при создании безопасных технологий разделения конструкций, незаменимы в аварийных ситуациях на нефтегазопроводном транспорте и ликвидации последствий аварии на АЭС, демонтаже гидротехнических сооружений и морских стационарных платформ.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасное действие взрывов. СПб.: Астерион. 2007. 250 с.
- [2] Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Барометрическое действие взрывов. СПб.: Астерион. 2006. 657 с.
- [3] Mori Y., Hijikata K., Komine A. Propagation of pressure waves in two phase flow // International J. of Multiphase flow. 1975. Vol. 1, no. 1. P. 139–152.
- [4] Hijikata K., Mori Y., Takahashi Y. Study of shock wave in liquid metal two-phase mixture with and without magnetic field // Nuclear Engineering and Design. 1985. Vol. 95, no. 3. P. 343–352.
- [5] Aoki T., Takagaki T., Miyazato Y., Matgsuo K. Weak shock wave propagating through bubbly flow in vertical pipe // Proc. of Symposium on shock waves, Japan-99. Ayoma Gakuin University, Sibuya, 1999. P. 497–500.
- [6] Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М., Тимофеев Е.И. Определение скорости распространения низкочастотных звуковых возмущений в смеси жидкости с пузырьками газа // ТВТ. 1975. Т. 13, № 4. С. 891–892.
- [7] Ngyeyh D.L., Vinter E.R., Greimer M. Sonic velocity in two-phase system // International J. of Multiphase flow. 1981. Vol. 7, no. 3. P. 311–320.
- [8] Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н. Измерение скорости слабых возмущений в пористых средах насыпной плотности // ЖПМТФ. 1986. № 1. С. 141–144.
- [9] Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Нигматулин Р.И., Рахматуллин Х.А., Тимофеев Е.И. Усиление ударных волн в жидкостях с пузырьками пара и растворяющегося газа // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263, № 3. С. 594–598.
- [10] Тимофеев Е.И., Губанов А.В., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А. О возможности неакустического отражения слабых волн давления в кипящей жидкости // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 5. С. 1125–1127.
- [11] Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. Об отражении ударных волн на жёсткой стенке в двухфазных средах с переменной массовой концентрацией газа // Изв. АН СССР: МЖГ. 1982. № 2. С. 159–162.
- [12] Накоряков В.Е., Вассерман Е.С., Покусаев Б.Г., Прибатурин Н.А. Усиление амплитуды волн давления в парожидкостной среде пузырьковой структуры // ТВТ. 1994. Т. 32, № 3. С. 411–417.
- [13] Прибатурин Н.А., Стасенко Д.П. Исследование возможности интенсификации насыщения жидкостей газом путём воздействия ударных волн // ЖПМТФ. 2000. Т. 41, № 2. С. 64–70.
- [14] Накоряков В.Е., Донцов В.Е. Усиление ударных волн в насыщенной пористой среде // Доклады Академии Наук. 2000. Т. 373, № 4. С. 477–478.
- [15] Покусаев Б.Г., Донцов В.Е. Ударные волны и массообмен за ударными волнами в пузырьковой среде // Теоретические основы химической технологии. 1999. Т. 33, № 5. С. 485–494.
- [16] Dontsov V.E., Pokusaev V.G. Reflection of shock waves near rigid wall in particles + liquid suspension with gaseous bubbles // Acoustical Journal. 1999. Vol. 45, no. 1. P. 82–87.
- [17] Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Распространение ударных волн в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками растворимого газа // ЖПМТФ. 2000. Т. 41, №5. С. 91–102.
- [18] Пихтовников Р.В., Хохлов Б.А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. Харьков: Прапор. 1972. 165 с.
- [19] Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Губин С.В., Кудинов В.М., Паламарчук Б.И., Подгребенков А.Л., Попов О.Е., Тимофеев Е.И. Затухание ударных волн в двухфазной среде жидкость–пузырьки газа // Изв. АН СССР: Механика жидкости и газа. 1977. № 1. С. 173–176.
- [20] Тимофеев Е.И., Гельфанд Б.Е., Гумеров А.Г., Кофман М.М., Поленов А.Н., Хомик С.В. Влияние пузырькового экрана на ударно-волновое возмущение в жидкости // ФГВ. 1985. Т. 21, № 3. С. 98–102.
- [21] Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М., Попов О.Е., Тимофеев Е.И. Взаимодействие слабых сферических ударных волн с пузырьковым экраном // Известия АН СССР. МЖГ. 1976. №2. С. 85–89.
- [22] Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: СО РАН. 2000. 434 с.
- [23] Vjerne L. Underwater explosion research based on model experiments // Problems of nonlinear acoustics / ed. by V.K. Kedrinsky. 1987. Pt. 2. P. 163–177.
- [24] Сильников М.В., Михайлин А.И., Орлов А.В. Характеристики и применение локализаторов взрыва «Фонтан» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2003. № 1/2. С. 40–45.
- [25] Klomfass A., Neuwald P., Thoma K. Attenuation of underwater shock waves in ducts by air-filled

wall panels // Shock waves 200LCD ROM Proc. of 23-rd ISSW / ed. by F.K. Lu 2002, Paper No 1914. P. 1254–1261.

[26] Baffle material, explosion suppression, expanded aluminum mesh, for aircraft fuel tanks // MIL-B-87162A (USAF). 1994, 2IP.

[27] Виброгасители из металлогезины // Пре-принт. Исследовательский центр им М.В. Келдыша. МЛ 998. 3 с.

[28] **Guy T.B.** Attenuation of fluid noise in hydraulic machines by new energy absorption technique // Thermofluid Conference.Sydney. 1976. P. 63–69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович – член-корреспондент РАН, академик РАН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-производственное объединение Специальных материалов»

E-mail: kashtano@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 01.10.2019

REFERENCES

- [1] **B.Ye. Gelfand, M.V. Silnikov,** Fugasnoye deystviye vzryvov. SPb.: Asterion. 2007. 250 s.
- [2] **B.Ye. Gelfand, M.V. Silnikov,** Barometricheskoye deystviye vzryvov. SPb.: Asterion. 2006. 657 s.
- [3] **Y. Mori, K. Hijikata, A. Komine,** Propagation of pressure waves in two phase flow, International J. of Multiphase flow, 1 (1) (1975) 139–152.
- [4] **K. Hijikata, Y. Mori,** Takahashi Y. Study of shock wave in liquid metal two-phase mixture with and without magnetic field, Nuclear Engineering and Design, 95 (3) (1985) 343–352.
- [5] **T. Aoki, T. Takagaki, Y. Miyazato, K. Matgsuo,** Weak shock wave propagating through bubbly flow in vertical pipe, Proc. of Symposium on shock waves, Japan-99. Ayoma Gakuin University, Sibuya, (1999) 497–500.
- [6] **B.Ye. Gelfand, S.A. Gubin, S.M. Kogarko, Ye.I. Timofeyev,** Opredeleniye skorosti rasprostraneniya nizkochastotnykh zvukovykh vozmushcheniy v smesi zhidkosti s puzyrkami gaza, TVT, 13 (4) (1975) 891–892.
- [7] **D.L. Ngyeyh, E.R. Vinter, M. Greimer,** Sonic velocity in two-phase system, International J. of Multiphase flow, 7 (3) (1981) 311–320.
- [8] **B.Ye. Gelfand, S.P. Medvedev, A.N. Polenov,** Izmereniye skorosti slabykh vozmushcheniy v poristyykh sredakh nasypnoy plotnosti, ZhPMTF, 1 (1986) 141–144.
- [9] **A.A. Borisov, B.Ye. Gelfand, R.I. Nigmatulin, Kh.A. Rakhmatullin, Ye.I. Timofeyev,** Usileniye udarnykh voln v zhidkostyakh s puzyrkami para i rastvorayayushchegosya gaza, Dokl. AN SSSR, 263 (3) (1982) 594–598.
- [10] **Ye.I. Timofeyev, A.V. Gubanov, B.Ye. Gelfand, S.A. Tsyganov,** O vozmozhnosti neakusticheskogo otrazheniya slabykh voln davleniya v kipyashchey zhidkosti, Dokl. AN SSSR, 257 (5) (1981) 1125–1127.
- [11] **B.Ye. Gelfand, A.V. Gubanov, Ye.I. Timofeyev,** Ob otrazhenii udarnykh voln na zhestkoy stenke v dvukhfaznykh sredakh s peremennoy massovoy kontsentratsiyey gaza, Izv. AN SSSR: MZhG, 2 (1982) 159–162.
- [12] **V.Ye. Nakoryakov, Ye.S. Vasserman, B.G. Pokusayev, N.A. Pribaturin,** Usileniye amplitudy voln davleniya v parozhidkostnoy srede puzyrkovoy struktury, TVT. 1994. T. 32, № 3. S. 411–417.
- [13] **N.A. Pribaturin, D.P. Stasenko,** Issledovaniye vozmozhnosti intensivifikatsii nasyshcheniya zhidkostey gazom putem vozdeystviya udarnykh voln, ZhPMTF, 41 (2) (2000) 64–70.
- [14] **V.Ye. Nakoryakov, V.Ye. Dontsov,** Usileniye udarnykh voln v nasyshchennoy poristoy srede, Doklady Akademii Nauk, 373 (4) (2000) 477–478.
- [15] **B.G. Pokusayev, V.Ye. Dontsov,** Udarnyye volny i massoobmen za udarnymi volnami v puzyrkovoy srede, Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii, 33 (5) (1999) 485–494.
- [16] **V.E. Dontsov, B.G. Pokusaev,** Reflection of shock waves near rigid wall in particles + liquid suspension with gaseous bubbles, Acoustical Journal, 45 (1) (1999) 82–87.
- [17] **V.Ye. Dontsov, V.Ye. Nakoryakov,** Rasprostraneniye udarnykh voln v poristoy srede, nasyshchennoy zhidkostyu s puzyrkami rastvorimogo gaza, ZhPMTF, 41 (5) (2000) 91–102.
- [18] **R.V. Pikhovnikov, B.A. Khokhlov,** Bezbasseyenovaya listovaya shtampovka vzryvom. Kharkov: Prapor. 1972.
- [19] **B.Ye. Gelfand, A.V. Gubanov, S.V. Gubin, V.M. Kudinov, B.I. Palamarchuk, A.L. Podgrebenkov, O.Ye. Popov, Ye.I. Timofeyev,** Zatukhaniye udarnykh voln v dvukhfaznoy srede zhidkost–puzyrki gaza,



Izv. AN SSSR: Mekhanika zhidkosti i gaza, 1 (1977) 173–176.

[20] **Ye.I. Timofeyev, B.Ye. Gelfand, A.G. Gumerov, M.M. Kofman, A.N. Polenov, S.V. Khomik**, Vliyaniye puzyrkovogo ekrana na udarno-volnovoye vozmushcheniye v zhidkosti, FGV, 21 (3) (1985) 98–102.

[21] **B.Ye. Gelfand, S.A. Gubin, S.M. Kogarko, O.Ye. Popov, Ye.I. Timofeyev**, Vzaimodeystviye slabykh sfericheskikh udarnykh voln s puzyrkovym ekranom, Izvestiya AN SSSR. MZhG, 2 (1976) 85–89.

[22] **V.K. Kedrinskiy**, Gidrodinamika vzryva. Eksperiment i modeli. Novosibirsk: SO PAH. 2000.

[23] **L. Bjerne**, Underwater explosion research based on model experiments, Problems of nonlinear acoustics. Ed. by V.K. Kedrinsky, 2 (1987) 163–177.

[24] **M.V. Silnikov, A.I. Mikhaylin, A.V. Orlov**, Kharakteristiki i primeneniye lokalizatorov vzryva «Fontan», Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16, 1/2 (2003) 40–45.

[25] **A. Klomfass, P. Neuwald, K. Thoma**, Attenuation of underwater shock waves in ducts by air-filled wall panels, Shock waves 200LCD ROM Proc. of 23-rd ISSW. Ed. by F.K. Lu. 2002, Paper No. 1914 1254–1261.

[26] Buffle material, explosion suppression, expanded aluminum mesh, for aircraft fuel tanks, MIL-B-87162A (USAF). 1994, 2IP.

[27] Vibrogasiteli iz metalloreziny, Preprint. Issledovatel'skiy tsentr im M.V. Keldysha. ML 998.

[28] **T.B. Guy**, Attenuation of fluid noise in hydraulic machines by new energy absorption technique, Thermofluid Conference. Sydney, (1976) 63–69.

THE AUTHOR

SILNIKOV Mikhail V. – *Special Materials Corp.*

E-mail: kashtano@yandex.ru

Received: 01.10.2019