

## О КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ КАМЕР ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЗРЫВНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

А. Г. Иванов, М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко, В. А. Рыжанский

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Оценивается возможность реализации предложенного академиком А. Д. Сахаровым решения энергетической проблемы человечества методом взрывного термоядерного синтеза. Суть данного метода состоит в использовании энергии термоядерных взрывов низкой мощности, производимых циклически в стационарных взрывостойких камерах, оснащенных средствами отбора и утилизации тепловой энергии взрыва. При этом основной проблемой является создание герметичных камер, способных многократно выдерживать термоядерные взрывы мощностью  $\approx 10 \div 25$  кт тротилового эквивалента. Критически рассмотрены имеющиеся данные по этому вопросу. Сформулирована концепция создания надежных взрывозащитных камер для решения указанной проблемы.

### ВВЕДЕНИЕ

Из анализа, проведенного в работах [1, 2], следует, что первостепенной задачей человечества на ближайшие десятилетия является решение энергетических проблем. При этом сделан вывод о том, что наиболее экологически безопасным способом энергоснабжения в будущем является переход на термоядерное топливо.

Общеизвестны два основных направления разработки энергетических установок управляемого термоядерного синтеза (с инерционным и магнитным удержанием высокотемпературной плазмы), реализация которых наталкивается на значительные трудности [1, 2]. В [1] рассмотрен вариант, представляющийся авторам реально более осуществимым проектом на ближайшие десятилетия и основанный на предложении А. Д. Сахарова использовать для производства энергии взрывной термоядерный синтез [3].

Суть метода состоит в использовании энергии термоядерных зарядов в стационарных взрывозащитных камерах (ВК) с передачей энергии взрыва через теплоноситель на тепловые генераторы электроэнергии. В [1] в качестве основного горючего предлагается использовать дейтерий. В качестве теплоносителя рассматривается жидкий натрий, как это делается в атомных реакторах на быстрых нейтронах.

При решении этой проблемы, принимая во внимание большой опыт по разработке таких зарядов, наличие технологии и базы их про-

изводства, на первый план выходит задача создания высоконадежных ВК, выдерживающих (в рабочем и аварийном режимах) циклические взрывные нагрузки. Очевидно, что такие камеры должны не только сохранять свою целостность, но и не терять герметичности.

По мнению авторов [1], для экономической эффективности проекта энергоснабжение одиночного термоядерного заряда должно быть принято эквивалентным взрыву  $(10 \div 25) \cdot 10^3$  т тротила (ТНТ)<sup>1</sup>.

Рассмотрим некоторые предложения по обоснованию возможности создания стационарно работающих ВК для удержания взрыва указанной мощности. В [1] приведены некоторые конфигурации камер для взрывов разной мощности ( $Q$ ) в ТНТ-эквиваленте (ТЭ), обсуждавшиеся в США ( $Q = 0,2$  и  $2$  кт ТЭ) и в России ( $Q = 0,25$  кт ТЭ и вариант камеры для котла взрывного сгорания (КВС-25) мощностью  $Q = 25$  кт ТЭ). С учетом различия физических процессов при химическом и ядерном взрывах затраты стали на сооружение КВС-25 оцениваются в  $\approx 8 \cdot 10^6$  т (допустимое эксплуатационное напряжение  $\sigma_{\text{доп}} = 2 \cdot 10^8$  Па при максимальной скорости смещения стенок КВС-25  $V_{\text{max}} = 5$  м/с). Это соответствует  $\approx 320$  т стали на тонну ТЭ энергии взрыва.

В оценках [1] принималась пропорциональная зависимость массы железа  $M$  от энер-

<sup>1</sup>Мощность атомного заряда, уничтожившего Хиросиму, оценивается в  $\approx 20 \cdot 10^3$  т тротила. Для перевозки эквивалентного количества тротила потребуется 200–500 железнодорожных вагонов [1].

гии взрыва. Существующие и эксплуатируемые в России металлические ВК, рассчитанные на мощность до 50 кг ТЭ, работают обычно при нагрузках  $Q = 5 \div 10$  кг ТЭ и менее. Исключением является сферическая камера, разработанная во ВНИИЭФ под руководством С. Б. Кормера [4]<sup>2</sup>. При диаметре 12 м и толщине стенки из стали 100 мм масса ВК составила  $\approx 350$  т. В камере было проведено пять подрывов зарядов массой 250 кг, один — 500 кг и еще один — 1 т ТНТ.

Следует отметить, что в период разработки этой камеры уже были известны работы, из которых следовало, что при геометрически подобном увеличении размеров ВК резко падает их удельная несущая способность. Это явление наблюдалось в случае заполнения ВК как воздухом, так и водой. Результаты этих работ и исследований, изложенные в [5], привели авторов [4] к необходимости резко уменьшить размеры люков для загрузки ВВ и разработать ряд конструктивных усовершенствований по снижению изгибных колебаний.

Близкие значения удельного расхода металла на единицу энерговыделения (мощности)  $M/Q = 320$  т/т ТЭ для КВС и  $M/Q = 350$  т/т ТЭ при химическом взрыве [4] с учетом «благоприятных» особенностей ядерного энерговыделения и ряда технических решений, приведенных в [1], не вызывают сомнений в правильности традиционной оценки расхода металла при создании КВС-25:  $M \approx 8 \cdot 10^6$  т. По оценке, основанной на патенте США [6], это значение несколько больше:  $M \approx 25 \cdot 10^6$  т.

## 1. ТРЕБОВАНИЯ К ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЕ

Очевидно, что требования к ВК как составной части КВС-25 должны быть много жестче, чем к вышеупомянутой ВК на 1 т ТЭ. Взрывная камера для КВС-25 должна:

- сохранять свою конструктивную целостность и оставаться герметичной не только при нормальных нагрузках, но и в проектно-аварийных экстремальных условиях нагружения (землетрясение, завышенное энерговыделение термоядерного заряда и т. п.);

<sup>2</sup>Более полная информация по данной разработке была изложена в работе: Абакумов А. И., Васкубенко Б. А., Кокшаров В. В. и др. «Удержание взрыва с энерговыделением более 1 т ТНТ в крупногабаритной взрывной камере (эксперимент)». Доклад был представлен на Заббахинских научных чтениях, Челябинск 70, 1992 г.

- эксплуатироваться при многократных циклических нагружениях. Так, при цикле нагружения  $\approx 1$  ч число нагружений составит  $\approx 9 \cdot 10^3$  в год. Стенки камеры должны будут содержать большое количество герметично состыкованных конструктивных элементов (устройства ввода и циркуляции, накопители теплоносителя (Na) и т. п.).

При сооружении КВС должны быть решены вопросы технологии и строительства (производство, транспортировка, сварка крупномасштабных узлов и т. п.).

Так, взяв в качестве модели камеру [4], получим, что при увеличении  $Q$  в  $25 \cdot 10^3$  раз линейные размеры возрастут в  $\approx 30$  раз и составят: диаметр  $\approx 360$  м, толщина стенки 3 м.

При этом заметим, что в [1] рассматривается КВС-25 в виде цилиндрической камеры диаметром 130 м и высотой 250 м. Для такой камеры на 1 т ТЭ приходится объем  $120$  м<sup>3</sup>. При сферической форме камеры для сохранения этой характеристики следует взять диаметр 185 м (вместо 360 м, полученных при пересчете), соответственно увеличив толщину стенок из расчета неизменной массы камеры. Однако такой переход не может повлиять на цепь наших последующих заключений.

## 2. О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КАМЕРЫ КВС-25

В науке о прочности, в том числе и при импульсных динамических нагрузках, во второй половине XX в. произошел коренной пересмотр критериев разрушения. Традиционные силовые критерии оказались не в состоянии объяснить многочисленные случаи хрупких разрушений конструкций. Количество таких событий возрастало по мере увеличения размеров объектов, использования новых более прочных материалов, снижения температуры эксплуатации и перехода к воздействию импульсными нагрузками.

Было установлено, что разрушение, как разделение целого на части, есть акт совершения работы. Поэтому в основе описания процесса разрушения должны лежать энергетические соотношения. Было установлено, что при разрушении работа по продвижению хрупкой магистральной трещины непосредственно совершается за счет упругой энергии деформации растяжения, накопленной в конструкции.

Поскольку скорость хрупкой трещины сравнима со скоростью звука в материале, такие разрушения носят внезапный, катастрофический характер и протекают фактически без обмена энергии с внешним окружением. Все перечисленные выше причины ведут к росту упругой энергии деформации и способствуют возникновению хрупких разрушений. Однако на одной из них, как наиболее важной для данного рассмотрения, остановимся особо. Это влияние увеличения размера конструкции.

Чтобы уйти от влияния других причин, рассмотрим два произвольных геометрически подобных объекта, нагруженных одинаковым образом, например, два кубика, растягиваемых за две противоположные грани [7]. Для того, чтобы произошло хрупкое разрушение (путем отрыва), запас упругой энергии на момент разрушения в каждом из кубиков должен быть, по меньшей мере, равным или превышать работу по продвижению трещины. Это есть необходимое условие разрушения:

$$\left(\frac{\sigma^2}{2E}\right)L^3 \geq G_{Ic}L^2 \quad \text{или} \quad \sigma \geq \sqrt{\frac{2G_{Ic}}{L}},$$

где  $\sigma$  — напряжение растяжения,  $E$  — модуль Юнга,  $L$  — размер ребра кубика,  $G_{Ic}$  — удельная (на единицу поверхности) работа прохождения хрупкой трещины. Величины  $G_{Ic}$  и  $E$  для данной температуры нагружения есть константы материала.

Необходимое условие хрупкого разрушения удобно записать в виде

$$\sigma^2 L \geq 2K_{Ic}^2(1 - \nu^2), \quad (1)$$

где  $K_{Ic}^2 = EG_{Ic}/(1 - \nu^2)$ ,  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Как следует из (1), если материал находится в состоянии упругопластического течения без упрочнения, то максимальное значение  $\sigma$  будет  $\sigma_T$ , а величина  $L$ , отвечающая пределу текучести  $\sigma_T$ , — это минимальное значение  $L = L_0$ , когда хрупкое разрушение еще возможно. Влияние других, помимо размера конструкции, факторов на величину  $L_0$  будет сказываться через значение  $\sigma$ .

В общем случае для произвольной формы геометрически подобных объектов необходимое условие хрупкого разрушения запишется как

$$\int_V q dV \geq \int_S G_{Ic} dS, \quad (2)$$

где  $q$  — упругая удельная энергия в элементарном объеме  $dV$ ,  $dS$  — элементарный участок площади разрушения.

Механика разрушения не располагает критерием, гарантирующим от хрупкого разрушения объекта. Однако использование (2) позволило сформулировать условия неразрушения сферических и цилиндрических сосудов при их статических и взрывных нагрузках, найти условия неразрушения трубопроводного транспорта, разработать концепцию эксплуатационной надежности этого транспорта и оценить последствия его разрушений при экстремальных ненормативных нагрузках [7].

Из (1) и (2) следует возможность проявления сильных масштабных эффектов энергетической природы при хрупком разрушении: с ростом характерного размера объекта напряжение, при котором возможно его хрупкое разрушение, будет падать как

$$\sigma_p \sim L^{-1/2}. \quad (3)$$

Как правило, у большинства современных крупных конструкций запас упругой энергии достаточен для их хрупкого разрушения. Ситуация здесь подобна заряженному ружью. Роль основного фактора — «спускового крючка», инициирующего разрушение, — выполняет случайная трещина достаточного размера. При избытке упругой энергии дефект структуры материала или особенность конструкции (концентраторы напряжения) также могут инициировать разрушение.

Пример реализации условия (3) можно получить в опытах с геометрически подобными образцами. По мере увеличения их размеров критическое значение коэффициента концентрации напряжений  $K_c$  в устье трещины длиной  $\alpha$  уменьшается и переходит к своему стационарному значению  $K_{Ic}$ <sup>3</sup>. В самом деле,  $K_{Ic}$ ,  $\sigma_p$ ,  $L$  и  $\sigma$  связаны соотношением

$$K_{Ic} = \sigma_p \sqrt{\alpha} f(L/\alpha), \quad (4)$$

но так как  $L/\alpha = \text{const}$ , то (4) переходит в (3). В данном случае необходимое условие оказывается и достаточным, а значение  $G_{Ic}$  находится как

<sup>3</sup>Одним из способов определения  $K_{Ic}$  является разрушение геометрически подобных образцов материала при их внецентренном растяжении [8]. При достаточном увеличении  $L$  разрушение образца переходит в хрупкое, а величина  $K_c$  падает до своего минимального значения  $K_{Ic}$ .

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E}(1 - \nu^2). \quad (5)$$

Согласно [9] импульсное нагружение способствует резкому увеличению эффективности влияния конструктивной особенности объекта как фактора, инициирующего разрушение.

Экспериментальные исследования взрывного разрушения геометрически подобных сосудов, заполненных воздухом [10, 11] и водой [12, 13], подтвердили изложенную выше реальную возможность проявления масштабных эффектов энергетической природы.

С другой стороны, при выполнении необходимого условия условие достаточности может реализоваться как вследствие конструктивных особенностей объекта, так и в процессе развития и роста дефектов структуры до их критического значения. Это позволило автору [14] заключить: «Прочность конструкции всегда представляет собой некоторую случайную величину, так как, во-первых, точное расположение всех дефектов заранее неизвестно, а, во-вторых, если бы это расположение и было точно известно, решение соответствующей математической задачи было бы невозможно из-за ее сложности». Аналогичное мнение высказывает и автор работы [15], объясняя разброс результатов при разрушении следующим образом: «...переход материала из вязкого состояния в хрупкое не имеет определенного критерия, а является процессом статистической природы».

Таким образом, чтобы исключить возможность непредвиденного хрупкого разрушения конструкции, протекающего в области упругих деформаций, необходимо исключить возможность выполнения условия (2).

Рассмотрим на примерах, как могут проявиться масштабные эффекты энергетической природы при оценке массы металла камеры КВС-25.

1. В качестве модели представим сферическую камеру, разработанную во ВНИИЭФ (ее радиус  $R_M = 6$  м, масса  $M_M \approx 350$  т), выдержавшую взрыв ВВ массой  $m_1 = 1$  т [4]. Оценим массу  $M_K$  сферической камеры КВС-25, способной выдержать взрыв ВВ массой  $m_2 = 25 \cdot 10^3$  т ТНТ. Линейный коэффициент моделирования  $k = \sqrt[3]{m_2/m_1} = \sqrt[3]{25 \cdot 10^3} = 29,24$ , поэтому радиус камеры  $R_K = kR_M$ . Для напряженного состояния объектов с учетом масштабных эффектов энергетической природы справедливо равенство  $\sigma_M^2 R_M = \sigma_K^2 R_K$ , поэтому

$$\sigma_K = \sigma_M k^{-1/2}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что равнопрочность камеры КВС-25 и модели (с целью исключения возможности хрупкого разрушения) достигается путем снижения действующего напряжения в стенках камеры в  $\sqrt{k}$  раз. Очевидно, что можно поднять нагрузку в КВС-25 до требуемой величины, если увеличить толщину стенки в  $\sqrt{k}$  раз. Естественно, что при этом во столько же раз возрастет и расход металла. Он составит не  $350 \cdot 2,5 \cdot 10^4 \approx 8,8 \cdot 10^6$  т, как это было бы без учета масштабных эффектов энергетической природы<sup>4</sup>, а в  $\sqrt{k} = 5,4$  раза больше, т. е.  $M_K = 4,8 \cdot 10^7$  т.

При оценке мы пренебрегли как рядом смягчающих факторов (более щадящее действие ядерного взрыва, чем химического, что, по нашим оценкам, снижает требуемый расход металла до  $M_K = 3,5 \cdot 10^7$  т, возможность использования ряда технических решений для растяжения импульса и др.), так и рядом ужесточающих факторов (многоцикловая работа КВС, наличие концентраторов напряжений и существенных конструктивных отклонений от простой геометрической формы и др.). По нашему мнению, полученная оценка с учетом масштабных эффектов энергетической природы не завышена, а скорее наоборот, поскольку нельзя исключить хрупкое разрушение модельной камеры при ее последующих нагружениях зарядами в 1 т ТЭ.

Так, используя формулы (12) и (18) работы [16], оценим значение максимального радиуса геометрически подобных камер, для которых хрупкое разрушение исключено в процессе взрывного нагружения вплоть до  $\sigma = \sigma_{0,2}$ . Для стали при  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $G_{Ic} = 2 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} = 2,5 \cdot 10^8$  Па и  $\nu = 0,3$  этот радиус составит  $\approx 2,6$  м вместо 6 м у реально испытанной камеры. Согласно формулам (12), (24) работы [16] допустимая масса заряда ВВ (при скорости детонации 6,5 км/с) без опасности хрупкого разрушения от изгибных колебаний камеры ( $R = 6$  м,  $h = 0,1$  м) составляет  $\approx 450$  кг.

2. В [6] предлагается камера из стали для взрывов  $\approx 100$  т ТЭ. Ее масса составляет  $\approx 10^4$  т. При переходе к взрывам мощностью  $2,5 \cdot 10^4$  т ТЭ масса камеры без учета масштаб-

<sup>4</sup>Масса железной камеры КВС-25 по оценке авторов [1] составила  $8,2 \cdot 10^6$  т, что фактически совпадает с нашей оценкой без учета масштабных эффектов энергетической природы.

ных эффектов энергетической природы составляет  $25 \cdot 10^6$  т, а с учетом этих эффектов при  $k = 6,3$  и  $\sqrt{k} = 2,5$  —  $M = 6,25 \cdot 10^7$  т. Обе оценки дают значения, близкие к массе камеры КВС-25:  $M \approx (5 \div 6) \cdot 10^7$  т.

3. В [1] рассмотрены оценки характеристик камеры КВС-25, встроенной в гранит, предложенной в ряде патентов США. Было показано, что, в отличие от окружения камеры водой, наличие более тяжелого окружения уменьшило допустимую скорость смещения вовлеченной инертной массы гранита до  $0,3$  м/с вместо допустимой, по мнению авторов [1], скорости  $5$  м/с для металла, что позволяет снизить затраты металла до  $\approx 2 \cdot 10^6$  т, ограничившись толщиной цилиндрического корпуса камеры, равной  $2$  м при ее диаметре  $130$  м. Из примеров, рассмотренных в п. 1 и 2, следует, что учет возможности проявления масштабных эффектов энергетической природы и для этой камеры потребует увеличения в несколько раз толщины корпуса (и соответственно массы металла).

Проведенные оценки возможности создания стальной камеры КВС-25 традиционного типа показывают бесперспективность такой разработки по следующим причинам.

- Камера, выполненная без учета возможности проявления масштабных эффектов энергетической природы, обречена на хрупкое разрушение. Вероятность такого события даже при нормальных эксплуатационных режимах весьма велика, что недопустимо для таких сооружений. В качестве инициирующих факторов, обеспечивающих выполнение условия достаточности при переходе к хрупкому разрушению, вполне могут служить кольцевые сопла, резервуары для теплоносителя и другие конструктивные элементы, как это имело место в [10–13].

- Уход от возможности хрупкого разрушения путем снижения интенсивности нагружения камеры требует резкого увеличения затрат на материалы и строительство (даже если не учитывать уникальность — отсутствие опыта и отработанной технологии создания таких сооружений).

### 3. ВОЗМОЖНЫЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПУТИ СОЗДАНИЯ КАМЕРЫ ДЛЯ КВС

Существуют ли и каковы пути решения проблемы?

Как уйти от масштабных эффектов энергетической природы при сооружении камеры, снизить ее материалоемкость, исключить возможность разрушения не только в номинальном режиме ударно-взрывной длительной циклической эксплуатации, но и при возможных экстремальных нагрузках?

Поясним возможность этого на примере оценки конструкции произвольного размера из силовых элементов постоянного сечения, не превышающего порога хрупкости материала [17].

Диаметр цилиндрического стержня, работающего на растяжение, не превышающий порога хрупкости, составляет

$$d_0 = 2 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_0} \right)^2 \sqrt{2(1+\nu)}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  — предел упругости материала. Поэтому максимальная нагрузка, которая гарантирует невозможность его хрупкого разрушения, есть  $F_0 = (\pi/4)\sigma_0 d_0^2$ . Если же требуемая нагрузка  $F > F_0$ , то уход от хрупкого разрушения достигается использованием  $n$  параллельных стержней, где  $n \geq 4F/\sigma_0 d_0^2 \pi$ .

Но это канат!

Рассмотренный пример имеет важное принципиальное значение, так как открывает путь:

- ухода от масштабных эффектов энергетической природы,
- снижения массы конструкции путем использования материалов с высоким значением предела упругости (текучести).

К материалам этого класса относятся, в частности, ориентированные композиты, силовым элементом которых является стеклянная нить. При диаметре  $10$  мкм и плотности, примерно в три раза меньшей, чем у стали, она разрушается в упругой области при напряжении  $\approx 4,2$  ГПа, что в несколько раз превышает аналогичную величину для закаленной стали.

В [18] впервые экспериментально установлено отсутствие масштабных эффектов энергетической природы при взрывном разрушении геометрически подобных оболочек разного размера из стеклопластика, представляющего собой композицию из стеклянных волокон малого диаметра и полимерного связующего.

Многолетние последующие исследования материалов этого класса, частично обобщенные в [19, 20], показали, что сосуды и трубы

из стеклопластика при их взрывном нагружении обладают рядом специфических свойств.

- Процесс разрушения в них не носит порогового характера, как у конструкций из обычных материалов при хрупком разрушении, а протекает в несколько стадий. Даже образование первой сквозной трещины не означает потери конструктивной целостности объекта испытания.

- Возможное снижение несущей способности сосуда, связанное с возбуждением изгибных колебаний, вследствие присущих конструкции несовершенств формы, может быть сведено к минимуму введением пластически деформируемого слоя металла.

- Исследование усталостной прочности при взрывных нагружениях показало относительно низкую величину этой характеристики. Основная причина — дробление эпоксидной смолы, исполняющей роль связующего материала (матрицы).

Использование стеклопластика в качестве материала для взрывостойких сосудов позволило разработать легкие контейнеры, выдерживающие взрыв до 200 кг ТНТ [21]. Такие материалы позволяют создавать взрывостойкие контейнеры для перевозки опасных грузов, в том числе и устройств, содержащих помимо ВВ и радиоактивные материалы [22].

Возможность ухода от масштабных эффектов энергетической природы и использование высокопрочных материалов типа ориентированных волокнистых композитов позволяют надеяться на возможность создания относительно легких взрывостойких камер для решения проблем КВС. Не менее важным свойством таких материалов является их слабая чувствительность к дефектам<sup>5</sup>. В роли «дефектов» в КВС будут выступать конструктивные технологические элементы.

О путях повышения усталостной прочности сосудов из ориентированных волокон остановимся ниже. Рассмотрим некоторые параметры возможных камер КВС.

**Форма камеры.** В [1] рассмотрены камеры цилиндрической и бочкообразной формы. Последняя по своему виду близка к сферической.

Сферический тип камеры из стеклопластика при взрыве ВВ в ее центре по своим массовым характеристикам оказался в 3–5 раз более выгодным, чем цилиндрический [23]. Этот результат, являющийся следствием более равномерной загрузки всех участков камеры, дает основание ориентироваться на «бочкообразную» камеру. Такой тип камеры не должен содержать резких угловых переходов, ему в меньшей мере будут свойственны двумерные эффекты и трудности расчетного плана, связанные с ними.

**Несущий (силовой) материал.** Для камеры, изготовленной по типу камер из композитов с ориентированными волокнами, нет препятствий для использования высокопрочной стали. Причем использование такой стали ведет еще и к снижению затрат материала. Оценим по формуле (7) допустимый диаметр нити (проволоки) из некоторых марок сталей для случая растяжения на пороге хрупкости. Принимая  $\nu = 0,3$ , находим

$$d_0 = 3,2 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_0} \right)^2. \quad (8)$$

Значения  $d_0$ , полученные из (8) для некоторых марок сталей, приведены в таблице. Их наблюдаемые отличия свидетельствуют о возможности поднять (при соответствующем выборе стали) рабочее напряжение в стенках камеры в 5–10 раз, т. е. снизить затраты несущего силового материала наполнителя, а также позволяют рассмотреть возможность снижения характерных размеров самой камеры для КВС.

**Материал связующего.** Эту важную функцию у стеклопластиков, как правило, выполняет эпоксидная смола. Последняя в основном и ответственна за низкое значение усталостной прочности сосудов из стеклопластика. При достаточно интенсивном взрывном нагружении происходит дробление эпоксидной матрицы. Вследствие этого нарушается монолитность всего пакета, и в локальных зонах деформация волокон стекла может превышать предельные значения. Для избежания этого эффекта в качестве материала матрицы необходимо использовать вязкие материалы, которые способны восстанавливать свою сплошность после нагружения за время, меньшее периода между взрывами. Таким материалом, например, является гудрон, хрупко разрушающийся при ударных нагрузках и восстанавливающий свою сплошность при достаточно высокой

<sup>5</sup>Последнее свойство объектов такого типа ставит их в один ряд с конструкциями из традиционных пластичных материалов, у которых, как и у объектов из ориентированных волокон, не выполнено необходимое условие разрушения. Этим обстоятельством объясняется их не пороговый характер разрушения.

| Материал         | Термообработка, источник         | $\sigma_T$ , МПа | $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup> | $d_0$ , мм |
|------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------|------------|
| Сталь 45         | Закалка и отпуск при 100 °С [24] | 1500             | 14,54                           | 0,3        |
| FS-1             | [25]                             | 2303             | 24,4                            | 0,4        |
| Сталь 40X        | Закалка и отпуск при 100 °С [24] | 1650             | 31,6                            | 1,2        |
| Бронева сталь МЗ | [26]                             | 1450             | 50                              | 3,8        |
| Бронева сталь М1 | [26]                             | 967              | 115                             | 45         |
| Сталь 20         | Горячекатаная [14]               | ≈ 250            | 39,2                            | 79         |

температуре, либо какая-нибудь другая достаточно тяжелая хрупковязкая жидкость, например стекло «сили-пати» [27, с. 20] или другие вязкие жидкости [28]. Следует отметить, что возможность замены твердой эпоксидной смолы эластичной (с уменьшенным содержанием отвердителя) проверена во взрывных экспериментах с волокнистыми стеклопластиковыми [29]. Эксперименты показали отсутствие снижения динамической прочности и деформируемости образцов при такой замене.

Мы не считаем оправданным использовать традиционный железобетон в качестве строительного материала, как это предлагают авторы [1], по следующим соображениям. Как отмечалось в [7], железобетонные конструкции в меньшей мере должны быть подвержены масштабным эффектам энергетической природы. Однако в нашем случае он был бы пригоден в качестве строительного материала, если бы доля бетона была  $\approx 30 \div 35$  %, а не  $90 \div 95$  % и, конечно, если бы после хрупкого растрескивания он был способен восстанавливать свою сплошность. Очевидно, не исключена возможность создания специальных железобетонов с комплексом вышеуказанных свойств.

#### **Внутренняя герметизирующая оболочка КВС.**

В качестве материала такой оболочки, по-видимому, следует выбрать нержавеющей сталь типа 12Х18Н10Т, которая широко применяется при разработке корпусов реакторов на быстрых нейтронах. Последняя не только коррозионностойка, но и имеет максимальное значение порога хрупкости среди сталей ( $L_0 \approx 1,5$  м) [7], что позволяет выполнить такую оболочку толщиной до  $100 \div 500$  мм, не опасаясь ее хрупкого разрушения [30], в том числе и за счет снижения пластичности вследствие радиационного облучения в КВС.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Главное содержание представленного сообщения основано на возможности борьбы с проявлением сильных масштабных эффектов энергетической природы при разрушении разномасштабных геометрически подобных конструкций. Впервые на это обратил внимание, по-видимому, Галилей. Так, в [31, с. 20] сообщается, что Галилея долгие годы волновало увиденное им однажды внезапное разрушение только что построенной галереи, которая была абсолютно подобна обычной, очень надежной галереи, но отличалась от нее тем, что все элементы ее были вдвое больше. Только в возрасте 74 лет «великий еретик» сформулировал общий закон: «Если мы, *отвлекаясь от всякого несовершенства материи и предположив таковую неизменяемой и лишенной всяких случайных недостатков*, построим большую машину из того же самого материала и точно сохраним все пропорции меньшей, то в силу самого свойства материи мы получим машину, соответствующую меньшей во всех отношениях, кроме прочности и сопротивляемости внешнему воздействию: в этом отношении чем больше будет она по размеру, тем менее будет она прочна»<sup>6</sup>.

Таким образом, при использовании энергетического критерия разрушения катастрофа, озадачившая Галилея, приобретает четкое физическое обоснование как проявление масштабных эффектов энергетической природы.

Подобные эффекты или явления, имеющие аналогичную физическую сущность, можно наблюдать в природе и технике. Так, сравни-

<sup>6</sup>Курсив наш. По-видимому, для Галилея было неприемлемо объяснение, положенное позже в обоснование статистической природы масштабного эффекта.

вая поле пшеницы и сосновый бор, легко убедиться, что отношение высоты к диаметру у стебля пшеницы и ствола сосны составляют примерно 1000 и 100. Не меньшее различие и в относительной грузоподъемности муравья и слона. Объяснение одно: масса с увеличением характерного размера растет как  $L^3$ , а опорная поверхность, воспринимающая нагрузку, — как  $L^2$ . С этой точки зрения легко понять также, почему самое большое млекопитающее — кит — обитает в море, а не на суше, или почему, скажем, не летают слоны или коровы.

Еще о полетах. Подъемная сила крыла самолета пропорциональна  $L^2$ , а его масса пропорциональна  $L^3$ . При геометрически подобном увеличении размеров самолета увеличения подъемной силы можно достичь за счет роста скорости как при взлете, так и в пути. Следовательно, малый самолет при непредвиденной остановке двигателя в пути может спланировать и благополучно приземлиться, а для его геометрически подобного большого аналога такая ситуация грозит катастрофой.

Возникает вопрос, почему же до настоящего времени при ответе на вопрос о прочности объекта (в смысле возможности его неразрушения) мы ограничиваемся информацией о его напряженно-деформированном состоянии.

Очевидно, что дело здесь не в ностальгии о старых добрых временах, когда достаточно было знания напряженного состояния конструкции и учета поправок на масштабный эффект статистической природы. Главная причина, по-видимому, состоит в том, что помимо знания запаса упругой энергии в рассматриваемом объекте надо еще иметь информацию о величине, размерах и месте расположения дефектов, а также о кинетике их изменения во времени в зависимости от истории нагружения. Эта информация важна, так как для большинства конструкций необходимое условие разрушения (2) оказывается выполненным. Возвращение же к традиционным критериям разрушения связано с риском оставить за бортом возможность проявления масштабных эффектов энергетической природы. Последнее обстоятельство авторы ряда монографий упускают из вида. Таким образом, из приведенного анализа следует, что при конструировании камер для КВС не учитываются масштабные эффекты энергетической природы и поэтому не исключена вероятность хрупкого разрушения в

области незначительных упругих деформаций. Учет этих эффектов исключает такую вероятность, но приводит к чрезмерному возрастанию массы ВК. Поэтому разработать на основе изложенной в [1] концепции высоконадежную камеру для КВС, выдерживающую многочисленные циклические взрывы с энерговыделением 25 кт ТЭ, не представляется возможным.

Волокнистые композитные материалы позволяют уйти от масштабных эффектов энергетической природы и использовать в качестве несущего (силового) элемента тонкие стержни, в том числе из стали с высоким показателем порога хрупкости. Роль связующего в таком композите должны выполнять материалы, способные восстанавливать свою сплошность после динамического нагружения. Только в этом случае, в том числе при переходе к более равнонапряженной конструкции сферической формы или близкой к ней, возможность создания КВС представляется вполне реальной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов Г. А., Волошин Н. П., Ганев А. С. и др.** Взрывная дейтериевая энергетика. Снежинск: РФЯЦ, ВНИИТФ, 1996.
2. **Путвинский С. В.** Возможна ли будущая мировая энергетическая система без ядерного синтеза? // Успехи физ. наук. 1998. Т. 168, № 11. С. 1235–1246.
3. **Сахаров А. Д.** Ядерная энергетика и свобода Запада // Экохроника. 1995. № 3 (перепечатка из Нью-Йорк-пресс, 1977).
4. **Рекламный листок «Установка 13Я».** Саров: РФЯЦ, ВНИИЭФ, 1993.
5. **Абакумов А. И., Григорьев Ф. В., Соловьев В. П. и др.** Исследование динамики деформирования сферических сосудов при внутреннем взрывном нагружении // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения научных исследований: Всесоюз. межвуз. сб. Нижний Новгород: Горьковский гос. ун-т, 1998. С. 53–57.
6. **Pat. 4121969 US.** Contained fissionly vaporized imploded fission explosive breeder reactor / E. F. Marwick. Is published 24.10.78. V. 975, N 4.
7. **Иванов А. Г.** Динамическое разрушение и масштабные эффекты // ПМТФ. 1994. Т. 35, N 3. С. 116–131.
8. **Вессел Э., Кларк У., Прайл У.** Расчеты стальных конструкций с крупными сечениями методами механики разрушения // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: Сб. тр. / Пер. с англ. М.: Мир, 1972. С. 213–244.



9. Nakayama N., Ohashi M., Sano T. et al. Dynamic stress concentration factor in the strip plate with fillet // 5th Intern. Conf. on Mech. and Phys. Beh. Mater. under Dynamic Loading. Toledo, Spain. 1997 / J. de Physique. IV (France). 1997. Т. 7. Р. с3-295–с3-300.
10. **Иванов А. Г., Сеницын В. А., Новиков С. А.** Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций // Докл. АН СССР. 1970. Т. 194, № 2. С. 316–319.
11. **Иванов А. Г., Новиков С. А., Сеницын В. А.** Масштабный эффект при взрывном разрушении замкнутых стальных сосудов // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8, № 1. С. 124–129.
12. **Иванов А. Г., Учаев А. А., Рыжанский В. А. и др.** Импульсное разрушение геометрически подобных объектов // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 4. С. 868–871.
13. **Иванов А. Г., Рыжанский В. А., Жуков В. В. и др.** Экспериментальное исследование влияния масштаба на прочность котла высокого давления при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 102–108.
14. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
15. **Мурей Бойд Дж.** Практические примеры проектирования конструкций сосудов с учетом сопротивления хрупкому разрушению // Разрушение: Сб. науч. тр. М.: Машиностроение, 1977. Т. 5. С. 343–422.
16. **Иванов А. Г.** Хрупкая прочность тонкостенных сосудов // Пробл. прочности. 1988. № 6. С. 49–53.
17. **Иванов А. Г.** Интегральный подход в проблеме разрушения // Высокие плотности энергии: Сб. науч. тр. Саров: РФЯЦ, ВНИИЭФ, 1997.
18. **Рыжанский В. А., Минеев В. Н., Иванов А. Г. и др.** Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров. 1978. № 2. С. 283–289.
19. **Иванов А. Г., Цыпкин В. И.** Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // Механика композит. материалов. 1987. № 3. С. 472–480.
20. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Влияние структуры армирования ориентированных стеклопластиков на прочность круговых цилиндрических оболочек при взрывном нагружении изнутри // Механика композит. материалов. 1991. № 4. С. 631–640.
21. **Ivanov A. G.** Transportable localizing container for explosive cargoes // Symp. on Accident Resistant Containers and Transportation Safety, Albuquerque, NM, October 26–November 2, 1993.
22. **Иванов А. Г., Федоренко А. Г., Сырунин М. А.** О возможности повышения безопасности ядерного оружия // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 32, № 2. С. 169–171.
23. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Динамическая прочность сферических стеклопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 4. С. 93–99.
24. **Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е.** Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. Киев: Наук. думка, 1977.
25. **Weimer R. J., Rogers H. C.** Dynamic fracture phenomena in high-strength steels // J. Appl. Phys. 1979. V. 50, N 12. P. 8025–8030.
26. **Gaily B. and Petit J.** Influence of the microstructure on armor steel spelling // Shock Compression of Condensed Matter: Proc. of the Conf. of Amer. Phys. Soc. Seattle, Washington, August 13–18, 1995. Pt 1. P. 635–638.
27. **Уипп Ф. Л.** Семья Солнца. Планеты и спутники солнечной системы. М.: Мир, 1984.
28. **Кольский Г., Рейдер Д.** Волны напряжения // Разрушение: Сб. М.: Мир, 1973. Т. 1.
29. **Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Сырунин М. А. и др.** Поведение композитных оболочек с высокоэластичным связующим при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1988. № 2. С. 306–314.
30. **Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Жуков В. В. и др.** Взрывостойкость цилиндрической части корпуса быстрого реактора // Атомн. энергия. 1995. Т. 79, вып. 3. С. 178–188.
31. **Партон В. З.** Механика разрушения. От теории к практике. М.: Наука, 1990.

*Поступила в редакцию 30/XI 1999 г.*