

15. W. C. Davis. Ibid.
16. J. K. Rigdon, L. B. Akst. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research. ACR-184, 1970.
17. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, 132, 6.
18. В. Ф. Нестеренко. ФГВ, 1975, 11, 2, 324.
19. В. Н. Зубарев. ПМТФ, 1965, 2, 54.
20. В. Н. Зубарев, Н. В. Попов, Г. С. Телегин. ФГВ, 1970, 6, 1, 107.
21. О. А. Кузнецов, В. С. Соловьев. ФГВ, 1974, 10, 3, 401.
22. V. G. Craig. 10-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, USA, 1964.
23. M. A. Cook. The Science of high explosives. Reinhold publ. Corp., 1958.
24. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6.
25. S. I. Jacobs, D. J. Edwards. Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, ACR-184, 1970.
26. И. М. Воскобойников, А. Н. Кирюшкин, А. Н. Афанасенков и др. Докл. I Все-союз. симпозиума по импульсным давлениям. Т. 1. М., 1974.
27. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя. Хим. физика, 1984, 3, 7, 1036.
28. J. E. Kennedy, J. W. Nunziato, D. R. Hardesty. Acta Astronautica, 1975, 3, 811.
29. Л. В. Альтшулер, В. А. Ашаев, Г. С. Доронин и др.— В кн.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черноголовка, 1978.
30. Л. В. Альтшулер, В. К. Ашаев, Г. С. Доронин и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.
31. V. Hayes, V. Graig, M. Tarver. UCRL, 1981, 84987.
32. S. A. Sheffield, D. D. Bloomqvist, C. M. Tarver. J. Chem Phys., 1984, 80(8), 3831.
33. M. Finger, E. Lee, F. Helm e. a. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation, ACR-224, 1976.

*Поступила в редакцию 30/IV 1986*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВВ И ТЕХНИКИ ВЗРЫВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*В. Н. Минеев, Ю. Н. Тюняев, В. А. Рыжанский,  
А. Г. Иванов  
(Москва)*

В настоящее время ряд ключевых для экономики отраслей промышленности (химическая, атомная энергетика), а также некоторые перспективные научно-технические программы (например, управляемый термоядерный синтез) испытывают возрастающую потребность в достаточно прочных крупногабаритных системах для локализации взрывообразных процессов. При всем различии природы этих процессов (химический, тепловой, физический взрывы, реакции деления или синтеза) и их места в технологическом цикле (нормальный или аварийный режим) процессы со взрывообразным выделением энергии обладают одним общим свойством — передавать на конструкции механические нагрузки большой амплитуды и малой длительности (динамические нагрузки). Опасность таких нагрузок состоит в том, что они могут привести к неконтролируемому пластическим деформациям или даже к разрушению конструкций.

Ценность крупномасштабных, часто уникальных объектов повышенной ответственности, такие как ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), исключает возможность проведения их разрушающих испытаний для выяснения фактического запаса прочности при динамическом нагружении. Поэтому параллельно с совершенствованием подобных конструкций развиваются методы экспериментальных исследований по моделированию динамической неупругой реакции этих объектов.

Настоящая работа представляет собой краткий обзор методов экспериментальных исследований динамической прочности силовых и защитных структур ЯЭУ (корпусов и защитных оболочек реакторов, зданий АЭС).

Такие исследования проводятся в течение последних 30 лет странами, реализующими национальные программы в области атомной энергетики (США, ФРГ, Великобритания, Франция, Италия, Япония, Чехословакия и др.). Общие черты исследований:

1) приоритет экспериментальных исследований при оценке уровня «механической» безопасности ЯЭУ;

2) широкое использование в экспериментах моделей элементов ЯЭУ;

3) применение модельных химических источников динамических (ударно-волновых) нагрузок на основе взрывчатых веществ (ВВ), порохов и т. п.

### **Физические основы моделирования неупругой реакции конструкции при динамическом нагружении. Ограничения модельных экспериментов**

Для прогнозирования динамической реакции крупномасштабной конструкции по результатам испытания ее уменьшенной модели необходимо установить связь между параметрами реакции модели и конструкции при известной связи между параметрами нагружения модели и конструкции.

Начиная с работ [1, 2] по настоящее время [3, 4], модельные эксперименты проводятся преимущественно на макетах, геометрически подобных полномасштабным объектам, а экстраполяция полученных результатов на натуру основывается на теории размерностей и подобия [5]. Как показано в ряде работ (см., например, [6, 7]), для случаев внутреннего динамического нагружения геометрически подобных объектов с помощью геометрически подобных химических источников энергии с полным энергоделиением  $E \sim d^3$  ( $d$  — характерный линейный размер источника энергии) теория [5] дает связь между параметрами модельных и полномасштабных систем ( $K$  — коэффициент подобия), приведенную в табл. 1. Соотношения в табл. 1 получены при следующих предположениях:

- а) материалы модели и натурального объекта одинаковы;
- б) механическое уравнение состояния материала в виде  $\sigma(\epsilon)$  не зависит от скорости деформации;
- в) масштаб системы не влияет на процессы тепло- и массопереноса в ней и на термодинамические свойства материала.

Данный метод моделирования — это, по существу, единственный широко практикуемый метод прогнозирования в рассматриваемой области. Уверенность в адекватности прогнозов применительно к аварийным ситуациям с ЯЭУ подкрепляется успешным применением моделирования данного типа при решении прикладных задач динамической прочности в других областях машиностроения [8].

Однако методу геометрически подобного моделирования присущи принципиальные ограничения, обусловленные в основном фактическим влиянием масштаба конструкции на ее прочность [9] и массовые силы (силы веса и инерции). Прогнозы, сделанные без учета этих факторов, могут быть некорректными. В частности, влияние масштаба конструкции на ее прочность проявляется, с одной стороны, через влияние скорости деформации на зависимость  $\sigma(\epsilon)$  материала конструкции, а с другой — через зависимость характеристик разрушения конструкции от масштаба.

Как правило, вклад указанных выше и иных факторов в суммарную динамическую прочность конструкции заранее неизвестен. Поэтому чтобы избежать грубых просчетов, рекомендуется брать масштаб моделей не менее 1:10 [8]. Предлагаются и другие способы учета различия прочностных характеристик модели и натуре. Так, рекомендуется изготавливать модели из материала, у которого зависимость  $\sigma(\epsilon)$  при повышенных скоростях деформации близка к аналогичной для материала

Таблица 1

## Связь параметров модели и природы

Параметр системы	Обозначения	
	модель	природа
Объект нагружения		
линейные размеры	$l_i$	$Kl_i$
объем	$V$	$K^3V$
Источник энерговыделения		
характерный линейный размер	$d$	$Kd$
полная энергия	$E$	$K^3E$
Волна нагрузки		
максимальное давление	$p_{\max}$	$p_{\max}$
импульс	$I$	$KI$
время действия	$t_H$	$Kt_H$
Компоненты тензоров		
напряжений	$\sigma_i$	$\sigma_i$
деформаций	$\varepsilon_i$	$\varepsilon_i$
Характеристики элементов		
объекта		
перемещения	$x_i$	$Kx_i$
скорость	$v_i$	$v_i$
скорость деформаций	$\dot{\varepsilon}_i$	$K^{-1}\dot{\varepsilon}_i$
ускорение	$a_i$	$K^{-1}a_i$
инерционные силы	$F_i$	$K^2F_i$

натурного объекта при ожидаемых у него скоростях деформации. Аналогично предлагается моделировать и влияние на  $\sigma(\varepsilon)$  повышенной температуры, при которой может находиться материал объекта в момент аварии [10].

#### Оценка динамической прочности элементов защиты тепловых реакторов с помощью взрывных экспериментов

Поскольку с точки зрения безопасности ЯЭУ наибольший интерес представляет экспериментальное моделирование наихудших последствий аварийного энерговыделения (при заданной величине  $E$ ), то в начальный период исследований в качестве модельного источника энергии использовались почти исключительно ВВ [1, 2, 8]. Такой выбор был обоснован предположением, что при  $E = \text{const}$  максимум повреждений объекта имеет место при максимальной скорости энерговыделения  $dE/dt$  (или при минимальном времени энерговыделения  $\tau$ ). Детонация конденсированных ВВ вполне удовлетворяет этому условию.

Чтобы проиллюстрировать данную концепцию, рассмотрим случай импульсного точечного выделения энергии  $E$  в воде за время  $\tau$ . Пусть энерговыделение происходит в сферическом объеме, расширяющемся за счет испарения все новых слоев окружающей воды с генерацией в ней ударной волны (УВ) вследствие высокой скорости испарения. Оценки, полученные в предположении, что к моменту окончания процесса энерговыделения образуется паровой пузырь радиусом  $D\tau$  ( $D$  — скорость УВ в воде) показывают, что, например, при  $E = 10$  кДж и  $\tau = 10$  мкс параметры, характеризующие эффективность действия энерговыделения на окружающую среду (температура в пузыре, давление и скорость УВ), составляют:  $T \approx 10^3$  К,  $p \approx 0,2$  ГПа и  $D \approx 1,6$  км/с. Уменьшение  $\tau$  на порядок приводит к резкому повышению параметров эффективности

энерговыведения:  $T \approx 3 \cdot 10^4$  К,  $p \approx 8$  ГПа,  $D \approx 4,6$  км/с. Выделение  $E = 10$  кДж при детонации сферического заряда ТНТ также происходит за 1 мкс с параметрами:  $T \approx 3 \cdot 10^3$  К,  $p \approx 10$  ГПа и  $D \approx 5$  км/с, которые, очевидно, близки к параметрам эффективности «чистого» энерговыведения за это же время. К тому же следует отметить, что для ВВ выполняется условие  $E \sim d^3$ , поэтому к энергоисточникам на основе ВВ возможно применение соотношений табл. 1.

Первые систематические исследования прочности корпусов и защитных оболочек ядерных реакторов при авариях взрывного типа относятся к середине 50-х годов [1, 2]. В частности, экспериментальная часть американской программы в этой области включала следующие эксперименты [2].

1. Моделирование аварийного энерговыведения в активной зоне тепловых реакторов с помощью детонации зарядов ВВ или горения пороховых зарядов. Предполагаемые характеристики аварийного энерговыведения (полная энергия  $E$ , скорость энерговыведения  $dE/dt$ , часть энергии  $E_m$ , переходящая в механическую работу) моделировались с привлечением понятия тротилового эквивалента. Принималось, что взрыв в центре активной зоны реактора заряда ТНТ с полной энергией взрыва, равной  $E$ , приведет к тем же повреждениям реактора, что и предполагаемая авария. Такой подход основан на теоретических оценках [11], согласно которым, по крайней мере при некоторых аварийных ситуациях, в активной зоне реактора соотношение  $E_m$  и  $E$  ( $E_m \approx 0,5 \cdot E$ ) и характер генерации динамических давлений приближаются к соответствующим характеристикам химического взрыва.

Величина  $dE/dt$  изменялась в экспериментах в  $\sim 10^3$  раз (в зависимости от режима химического превращения).

2. Проверка соотношений табл. 1 для системы «замкнутая металлическая оболочка — заряд ВВ» при изменении масштаба системы в 8 раз. Определялись зависимости  $\sigma(\epsilon)$  и  $\epsilon(t)$  для центрального сечения сварных цилиндрических оболочек из нержавеющей стали с полусферическими торцами и относительной толщиной стенки  $\sim 4\%$ . Диаметр цилиндрической части оболочек составлял от 0,75 до 6 м.

3. Внутреннее взрывное нагружение модели (1:4 натуре) теплового реактора. В серии подрывов зарядов ВВ возрастающей массы определялись: конечное состояние защитной железобетонной оболочки, динамика деформирования и конечное состояние элементов внутреннего насыщения модели.

По результатам экспериментов в [1, 7] сделаны выводы: во-первых, метод геометрически подобного моделирования справедлив вплоть до разрушения металлической оболочки и, во-вторых, модельные эксперименты с ВВ позволяют прогнозировать наихудшие (для состояния защитных систем) последствия возможной аварии при постулированной величине  $E$ . Хотя эти выводы позднее подвергались сомнениям [12, 13], подход к прогнозированию динамической прочности элементов защиты ЯЭУ, реализованный в [2], воспроизводится без изменений во всех последующих экспериментальных исследованиях в данной области.

В работах [12, 13] выдвинуты возражения выводам [1, 7].

а) Статистическая обработка измеренных в различных работах амплитуд давлений  $p_{отр}$  в отраженных УВ при взрывах зарядов ВВ в заполненных водой цилиндрических оболочках с одним открытым торцом показала [12], что величина  $p_{отр}$ , по-видимому, отклоняется от закона геометрического подобия: лучшее описание измеренных амплитуд давлений единой зависимостью  $p_{отр} = (C^\alpha, R_i)$  ( $C$  — масса заряда ВВ,  $R_i$  — внутренний радиус оболочки) наблюдается не при  $\alpha \approx 1/3$ , как это следует из геометрического подобия, а при  $\alpha \approx 1/2$ . При этом значения импульсов отраженных УВ подчиняются закону геометрического подобия [12].

б) Исследование влияния скорости энерговыведения на величины и характеры распределения остаточных деформаций модели (1:10 натуре) корпуса реактора РЕС (Италия) [13] показало, что уменьшение

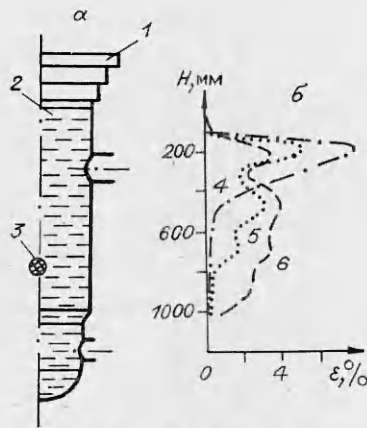


Рис. 1. Схема постановки опытов с моделью (1:10 натуре) корпуса реактора РЭС (а) и распределение остаточных деформаций  $\varepsilon_{ост}$  по высоте  $H$  модели (б) [13]. 1 — модель корпуса; 2 — уровень воды; 3 — заряд ВВ; распределение  $\varepsilon_{ост}(H)$  при: горении состава на основе перхлората аммония (4), детонации низкоплотного ВВ (5), детонации конденсированного ВВ (6).

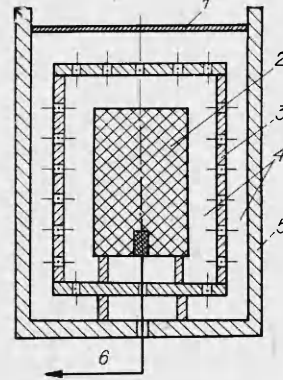


Рис. 2. Принципиальная схема модельного источника нагрузок на основе низкоплотного ВВ [15].

1 — разрушаемая диафрагма; 2 — заряд низкоплотного ВВ; 3 — перфорированный металлический контейнер; 4 — объемы, заполненные воздухом; 5 — массивная металлическая обойма; 6 — детонатор.

$dE/dt$  в  $\sim 30$  раз привело к увеличению максимальных остаточных деформаций модели в  $\sim 2$  раза при существенном их перераспределении вдоль образующей модели (рис. 1). Использованы источники энергии: ВВ с  $D \approx 7 \cdot 10^3$  м/с, смесевое ВВ с  $D \approx 3,5 \cdot 10^3$  м/с и состав на основе перхлората аммония со скоростью горения  $\sim 2,5 \cdot 10^2$  м/с. Массы зарядов выбирались из условия равенства величин  $E_m$ . Сделан вывод, что использование конденсированных ВВ в модельных экспериментах в общем случае не гарантирует консервативность прочностных прогнозов для элементов защиты натурального реактора и даже не позволяет предсказать область локализации наибольших деформаций его корпуса.

Результаты и выводы [13] нетривиальны. Причины их противоречия данным [1, 7, 11] и изложенному выше предположению о повышении эффективности действия импульсной энергии с уменьшением времени энерговыделения требуют дополнительного анализа. Возможно, на результатах [13] сказались побочные факторы (принцип выбора масс зарядов, конструктивные особенности макетов активной зоны, всплытие пузыря газообразных высокотемпературных продуктов энерговыделения и т. п.).

С целью повышения достоверности прочностных прогнозов в случае аварий ЯЭУ в последнее десятилетие для модельных экспериментов разрабатываются специальные источники энергии, генерирующие в жидкой среде волны сжатия с заданными параметрами либо воспроизводящие предсказываемый теорией закон расширения двухфазного (пар — жидкость) пузыря в расплавленной части активной зоны. В соответствии с теоретическими прогнозами разработаны модельные источники нагрузок [14—17], генерирующие волны сжатия с пологим передним фронтом (время нарастания давления до максимума составляет  $\sim 20\%$  от полной длительности волны). Физической основой подобных источников является расширение продуктов детонации заряда смесового ВВ с большой (до 35%) долей инертных добавок в системе коаксиальных перфорированных камер. Схематически конструкция такого источника представлена на рис. 2.

в) Неправоммерно игнорируется принципиальная возможность проявления масштабных эффектов, пагубных для прочности конструкций. Как показано в [18—20], наиболее опасно проявление масштабного эффекта энергетической природы, для которого характерно разрушение крупномасштабных объектов при пониженных деформациях, вплоть до перехода в упругую область. Эти эффекты, действие которых подтвержде-

но и изучено экспериментально, ставят под сомнение корректность «автоматического» переноса от модели на натуру критериев ее несущей способности, так как, вообще говоря, неучет масштабных эффектов может привести к неоправданному завышению проектных запасов прочности натуральных объектов.

В середине 60-х годов сделана попытка построить универсальную аналитическую зависимость для прогноза предельных неразрушающих деформаций корпусов ЯЭУ при внутреннем ударно-волновом нагружении [21]. Получено полуэмпирическое уравнение, выражающее связь между остаточной деформацией в центральном сечении заполненной водой цилиндрической металлической оболочки ( $\varepsilon$ ) и массой заряда ТНТ ( $M_{ВВ}$ ), подрываемого в ее центре:

$$M_{ВВ} = \left[ \frac{1,407\sigma_t \varepsilon (3,41 + 0,117R_i/h_0) (R_0^2 - R_i^2)^{1,85}}{10^5 \rho^{-0,85} (1,47 + 0,0373R_i/h_0)^{0,15} R_i^{0,15}} \right]^{0,811} \quad (1)$$

где размерность  $M_{ВВ}$  — фунт;  $\sigma_t = \sigma_y + \left[ \frac{\sigma_b (1 + \varepsilon_p) - \sigma_y}{\varepsilon_p} \right] \varepsilon$  — действующее напряжение в стенке оболочки, фунт/дюйм<sup>2</sup>;  $\rho$  — плотность материала оболочки, фунт/дюйм<sup>3</sup>;  $R_0$  — начальный наружный радиус оболочки, фут;  $R_i$  — начальный внутренний радиус оболочки, фут;  $h_0 = R_0 - R_i$  — начальная толщина стенки;  $\sigma_b$  — предел прочности материала оболочки, фунт/дюйм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_p$  — относительное удлинение стандартных образцов материала оболочки (статические испытания), дюйм/дюйм;  $\sigma_y$  — статический предел текучести материала оболочки, фунт/дюйм<sup>2</sup>.

Уравнение (1) проверено экспериментально при  $R_0 = 0,07 \div 0,28$  м,  $h_0/R_0 = 2,3 \div 9,2\%$ ,  $\varepsilon < \varepsilon_p$ . Показано, что при наличии конструктивных неоднородностей (торцевые заглушки, приваренные трубопроводы и т. п.) максимальная остаточная деформация, при которой оболочка еще не разрушается, не превышает  $1/3\varepsilon_p$ . Систематической проверки уравнения (1) при  $R_0 > 0,28$  м не проводилось; экспериментальные данные [18] по оболочкам с  $R_0 = 0,61$  м и  $h_0/R_0 = 2,5\%$  уравнением (1) не описываются.

#### Экспериментальные исследования прочностных аспектов безопасности быстрых реакторов

В связи с перспективностью использования реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов) в качестве ЯЭУ [22] с начала 70-х годов получили широкое развитие работы по экспериментальному моделированию аварий взрывного типа в этих реакторах. По сравнению с тепловыми (т. е. на тепловых нейтронах) реакторами специфика работы быстрых реакторов (в частности, повышенная напряженность ядерно-и теплофизических процессов, преимущественное использование в качестве теплоносителя жидкого натрия, обладающего высокой химической активностью) обуславливает более высокие уровни возможного аварийного энерговыделения и большее разнообразие потенциальных механизмов генерации аварийных динамических нагрузок: частичное расплавление и испарение активной зоны с образованием высокотемпературного пузыря, его взрывное расширение, воздействие на корпус реактора разлетающихся фрагментов разрушенного внутрореакторного оборудования, удар столба жидкого натрия по крышке корпуса («натриевый молот»), взрыв при взаимодействии натрия с водой и пр. Этим объясняется повышенное внимание к прочностным аспектам безопасности быстрых реакторов, одним из основных критериев которой является взрывостойкость корпуса реактора. Например, проектом французского реактора Phenix допускается максимальное аварийное энерговыделение  $E \approx 5$  ГДж, которое по эффективности механического воздействия может оказаться эквивалентным (консервативная оценка) взрыву  $\sim 600$  кг ТНТ [11]. Представление о размерах некоторых действующих быстрых реакторов дает табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики быстрых реакторов

Тип реактора	Страна	Диаметр корпуса, м	Толщина стенки корпуса, мм	Расстояние от центра активной зоны до крышки реактора, м	Масса жидкого натрия в реакторе, т
Phenix	Франция	11,8	16	7,0	800
PFR	Англия	12,2	13	7,7	900
BN-600	СССР	12,9	28	6,0	800

Таблица 3

## Некоторые типичные исследования по проблеме безопасности быстрых реакторов, в которых использовались ВВ и (или) техника взрывного эксперимента

Научно-исследовательская работа	Страна	Ссылка
Разработка модельных источников динамических нагрузок на основе низкоплотных ВВ с заданными зависимостями объем — давление или давление — время	США Англия Италия	[14, 16, 17] [23, 24] [13, 25]
Разработка моделей быстрых реакторов и имитация на них максимальной проектной аварии (в скобках указан масштаб модели): FTR (1 : 10) CRBR (1 : 20) SNR-300 (1 : 6) MONJU (1 : 7,5) Phenix (1 : 25)	США США ЕЭС * Япония Франция	[9] [26] [25] [27] [28, 29]
Моделирование воздействия «натриевого молота» на верхнюю часть корпуса реактора	США	[4]
Определение откольной прочности и взрывогасящих свойств железобетонной биологической защиты	Италия	[30]
Моделирование поведения здания АЭС и защитной оболочки реактора при внешнем взрыве или ударе извне	Франция	[31]

\* Европейское экономическое сообщество.

В последнее десятилетие предметом моделирования, в том числе численного, являются возможные аварийные ситуации не только в реакторе, но и вне его: удар по зданию АЭС элементов авиакосмической техники, воздействие сейсмозрывных волн, взрыв облака топливно-воздушной смеси вблизи АЭС и пр. В табл. 3 приводится краткий перечень выполненных после 1970 г. исследований по безопасности быстрых реакторов, в которых использовались ВВ и (или) техника взрывного эксперимента.

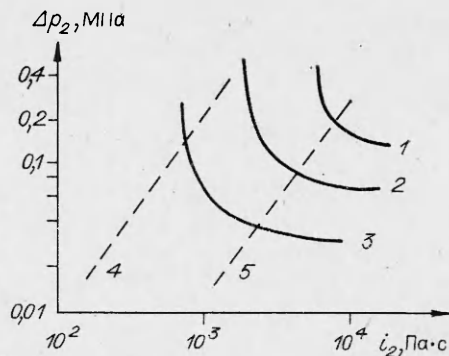
Более узкие вопросы экспериментальных исследований в рассматриваемой области и публикации обзорного характера содержатся в трудах международных конференций по применению методов строительной механики в реакторостроении — SMiRT (Structural Mechanics in Reactor Technology), 1971, 1973, 1975, 1977, 1979 гг.

### Использование метода изоповреждений для оценки устойчивости ядерных энергетических установок к ударно-волновым воздействиям

Как известно, неупругая реакция динамически нагруженных конструкций, количественно выражаемая величинами остаточных деформаций  $\epsilon_{ост}$ , углов раскрытия трещин  $\phi$ , остаточных прогибов  $\Delta h$  и т. д., в общем случае зависит от трех независимых параметров нагрузки: ампли-

Рис. 3. Кривые изоповреждений железобетонного здания АЭС (1—3) и действующие нагрузки (4, 5) при взрыве полусферического облака газовой смеси с начальным радиусом  $r_0$  [37].

1 — появление сквозных трещин; 2 — появление несквозных трещин; 3 — предел упругости железобетона; 4 — нагрузка (импульс  $i_2$  и избыточное давление  $\Delta p_2$  отраженной УВ) как функция расстояния  $R$  между зданием и облаком при  $r_0=10$  м; 5 — то же, при  $r_0=100$  м.



туды  $p_{\max}$ , длительности  $\tau$  и формы импульса давления  $p(t)$ . В [32—35] показано, что значения параметров динамической нагрузки, приводящей элементы типа балок, пластин, оболочек в данное конечное состояние (например,  $\Delta h = \Delta h^*$ ), образуют непрерывный спектр. В плоскости

$p_{\max} - \tau$  или  $p_{\max} - i$ , где  $i = \int_0^{\tau} p(t) dt$  — импульс нагрузки, этот спектр

выражается гиперболой, точки которой полностью определяют множество значений  $p_{\max}$  и  $i$ , при которых достигается состояние с  $\Delta h = \Delta h^*$ . Асимптоты гиперболы описывают известные случаи, когда конечное состояние элемента однозначно определяется только одним параметром нагрузки (при квазистатическом нагружении — амплитудой, при нагрузках малой длительности — импульсом). Положение гиперболы в плоскости  $p_{\max} - i$  находится по значению параметра конечного состояния. Поскольку параметры типа  $\epsilon_{\text{ост}}$ ,  $\phi$ ,  $\Delta h$  также характеризуют необратимые изменения элементов (уровень повреждений), то в литературе указанные гиперболы и метод их построения получили название кривых и метода изоповреждений.

В [36] показано, что кривые изоповреждений сложных конструкций могут быть получены суперпозицией «элементарных» гипербол, и предложен способ исключения влияния формы  $p(t)$  на положение кривой изоповреждений. Полезность этого метода для оценки безопасности ЯЭУ состоит в том, что он позволяет при заданном предельно допустимом конечном состоянии конструкции (в терминах  $\epsilon_{\text{ост}}$ ,  $\phi$ ,  $\Delta h$ ) определить область допустимых значений параметров аварийных динамических нагрузок.

В работе [37] метод изоповреждений использован для анализа последствий взрыва полусферического облака газовой смеси вблизи железобетонного здания АЭС. Для модели здания в виде пространственной системы точечных масс и пружин рассчитаны кривые изоповреждений при различных уровнях повреждения здания (рис. 3). Здесь же приведены рассчитанные зависимости параметров нагрузки здания (избыточное давление  $p_2$  и импульс  $i_2$  отраженной воздушной УВ) от диаметра облака и его удаленности от здания.

В [38] отмечается, что метод изоповреждений может быть использован и для описания состояния конструкций в случаях их динамического нагружения изнутри.

Совмещение в плоскости  $p_{\max} - i$  характеристик неупругой реакции конструкций (семейство кривых изоповреждений) и характеристик динамических нагрузок при конкретных значениях параметров источников энергии позволяет объективно оценивать степень опасности для элементов АЭС различных режимов и уровней аварийного энерговыделения.

### Заключение

Экспериментальное моделирование с помощью ВВ динамического нагружения элементов защиты ЯЭУ при авариях исторически было первым методом получения количественной информации о динамической



прочности защитных систем ЯЭУ. В дальнейшем развитие численных методов анализа гидродинамических явлений и упругопластической реакции конструкций при ударно-волновом нагружении породило уверенность (см., например, [10]), что проблемы прочностного прогноза поведения систем защиты ЯЭУ могут быть решены исключительно с помощью ЭВМ. Взрывным (динамическим) экспериментам в этой концепции отводилась роль инструмента калибровки соответствующих программ для ЭВМ. Действительно, взрывные эксперименты с оболочками простой формы и малых размеров в настоящее время обязательны для отработки специализированных машинных программ расчетов динамических нагрузок и деформаций элементов конструкции реактора при авариях [4, 10, 25]. Однако даже в наиболее продвинутых программах (REXCO-HER [4], ASTARTE [10], SURBOUM [25] и ряд других) используются сильно идеализированные модели реакторов и жестко детерминированные модели аварийного энерговыделения. Фактически же существует значительная неопределенность в оценках характеристик аварийного энерговыделения [39]: максимальной полной энергии, ее доли, переходящей в механическую работу, интервала скоростей энерговыделения.

Недостаточно полно для эффективной реализации численных методов изучены и уравнения состояния некоторых реакторных материалов, особенно сталей в пластическом состоянии и в жидкой фазе. Поэтому при численном моделировании используются различные аппроксимации соответствующих уравнений. В результате, хотя программы типа [4, 10, 25] удовлетворительно описывают стандартные эксперименты по взрывному нагружению оболочек, достоверность получаемых с их помощью прогнозов для реальных условий (геометрия и масштаб реального реактора, особенности его внутреннего насыщения оборудованием) остается недоказанной [40]. Более того, имеются прямые экспериментальные данные о существенной роли масштабного эффекта при разрушении конструкций [18—20].

Скептицизм по отношению к адекватности численных методов прогноза последствий аварий, по крайней мере на современном уровне знаний и возможностей ЭВМ, уже привел к переосмысливанию значения взрывных (динамических) модельных экспериментов для решения проблемы безопасности ЯЭУ. В кругах проектантов и инженеров распространена точка зрения, в которой наиболее надежными оценками и прогнозами общего состояния защитных структур реактора при быстропротекающих авариях в настоящее время являются оценки (прогнозы) на основе именно взрывных модельных экспериментов [9]. Что же касается систем трубопроводов и периферийных внутриреакторных структур, то взрывные модельные эксперименты рассматриваются пока как единственный источник информации об их состоянии при аварии [10]. Так, в [9] сообщается об использовании взрывных модельных экспериментов для исследования процессов массопереноса и взаимодействия волн сжатия с внутриреакторными структурами. Исследование проводилось с модельным источником импульсной энергии на модели быстрого реактора с прозрачным корпусом. В Чехословакии с 1975 г. осуществляется программа экспериментальных исследований по проблеме безопасности быстрых реакторов [41], аналогичная по содержанию упомянутой программе США [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. AEC Containment Studies. Nucleonics, 1958, 6, 3, 77.
2. Proc. of the 2-nd United Nations Internat. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Vol. 11. Reactor Safety and Control. Geneva, 1958.
3. A. M. Christie, N. W. Brown, B. W. Joe. Nuclear Engineering and Design, 1980, 60, 257.
4. A. M. Christie, M. A. Todd, S. Ranatza. Ibid., 267.
5. Н. Н. Давиденков. Некоторые проблемы механики материалов. Л.: Лениздат, 1943.

6. B. Hopkinson. British Ordnance Board Minutes, 1975, 13565.
7. W. E. Baker.— In [2], p. 79.
8. W. R. Wise, J. F. Proctor, L. P. Walker. Experimental Mechanics, 1963, 10, 245.
9. G. R. Abrahamson. 3-rd SMiRT Conf. Paper E 4/2. London, 1975.
10. H. Holtbecker. Nuclear Engineering and Design, 1977, 42, 75.
11. Г. Хаммел, Д. Окрент. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1975.
12. L. V. Krishnan, D. D. Garg. Nuclear Engineering and Design, 1980, 56, 405.
13. R. Cenerini, S. Curioni, G. Millionini e. a. 2-nd SMiRT Conf. Paper E 2/9. San-Francisco, 1973.
14. D. J. Cagliostro, A. L. Florence, G. R. Abrahamson e. a. Nuclear Engineering and Design, 1974, 27, 94.
15. D. J. Cagliostro, T. J. Marcinjak. 3-rd SMiRT Conf. Paper E 1/2. London, 1975.
16. G. R. Abrahamson, D. J. Cagliostro, A. L. Florence. Nuclear Engineering and Design, 1977, 42, 89.
17. Y. W. Chang, J. Gvildis. Ibid., 1978, 49, 131.
18. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев. ФГВ. 1979, 15, 5, 70.
19. А. Г. Иванов. Докл. АН СССР, 1985, 285, 2, 357.
20. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын и др.— В кн.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюз. межвузовский сборник. Вып. 29. Горький: Горьковский университет им. Н. И. Лобачевского, 1985.
21. J. F. Proctor. Nuclear Safety, 1966, 7, 459.
22. А. П. Александров, В. А. Легасов, В. А. Сидоренко и др. Атомная энергия, 1977, 43, 427.
23. I. G. Cameron, N. E. Hoskin, M. J. Lancefield. 4-th SMiRT Conf. Paper E 2/1. San-Francisco, 1977.
24. Советско-английский семинар по быстрым реакторам. Атомная энергия, 1977, 42, 150.
25. M. Egleme, J. P. Fabri, H. Lamotte e. a. Nuclear Engineering and Design, 1977, 42, 115.
26. C. M. Romander, D. J. Cagliostro. Ibid., 1980, 60, 239.
27. Y. Ando, S. Kondo, H. Yoshizawa e. a. Ibid., 1977, 42, 105.
28. D. Costes. 1-st SMiRT Conf. Paper E 1/5. Berlin (West), 1971.
29. A. Meyer-Heine, M. Fortunato. Methode D'analyse Du Comportement Dynamique Des Structures Du Reacteur Phenix Dans Les Cas D'accidents Hypothetiques. Communication CEA. Decembre 1977.
30. C. Albertini, V. Andrignetti, M. Montagnani e. a. 1-st SMiRT Conf. Paper E 2/5. Berlin (West), 1971.
31. Экспресс-информация ЦНИИАтоминформ по материалам иностранной печати, 1979, 34.
32. C. J. Constantino. J. Appl. Mech., 1965, 32, 104.
33. D. L. Anderson, H. E. Lindberg. AIAA J., 1968, 6, 589.
34. G. R. Abrahamson, H. E. Lindberg.— In: Dynamic Response of Structures/Ed. G. Herman. Oxford: Pergamon Press, 1972.
35. L. M. Habip. Nuclear Safety, 1972, 13, 107.
36. C. K. Youngdahl. J. Appl. Mech., 1970, 37, 744.
37. W. Geiger. Nuclear Engineering and Design, 1974, 27, 189.
38. L. M. Habip. 3-rd SMiRT Conf. Paper J 5/1. London, 1975.
39. J. F. Jackson, J. E. Boudreau. Nuclear Engineering and Design, 1977, 42, 31.
40. R. Wilson. Rev. of Mod. Phys., 1977, 49, 893.
41. V. Adamic. 3-rd SMiRT Conf. Paper E 3/6. London, 1975.

*Поступила в редакцию 18/XI 1986*

## О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ ВО ФРОНТЕ СЛАБОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*А. В. Аттегов, В. С. Соловьев*

*(Москва)*

Вопросам изучения законов распространения ударных разрывов в реагирующих средах в последнее время уделяется все большее внимание. Физически необходимость проведения анализа внутриударных переходов означает необходимость учета дополнительных эффектов (релаксационных процессов, физико-химических превращений), происходящих в самом ударном фронте, и применительно к вопросам ударно-волнового инициирования твердых гетерогенных взрывчатых веществ (ВВ), подтверждается, в частности, наблюдаемым различием (см., на-