

# СТАТЬИ

УДК 621.039.526:621.039.58

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЗРЫВОСТОЙКОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОРПУСА БЫСТРОГО РЕАКТОРА ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

*Рыжанский В.А., Иванов А.Г. (ВНИИЭФ), Жуков В.В. (ОКБМ)*

Основной корпус быстрого реактора типа БН-600 изготовлен из хромоникелевой стали в виде тонкостенного бака с цилиндрической обечайкой, эллиптическим (БН-600) или сферическим (БН-800) дном и конической крышей. Обечайка соединена с дном через опорное кольцо, на котором покоится жесткий опорный пояс с установленным на нем реакторным оборудованием. Горловина крыши служит опорой для большой поворотной пробки. Реактор наполнен жидким натрием, полость над ним заполнена аргоном.

Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования [1] показали, что статическая прочность корпуса достаточна для его надежной и безопасной эксплуатации. Однако оставался открытым вопрос о прочности при аварийном динамическом нагружении в результате, например, внезапного взрывоподобного выделения энергии в активной зоне. Таким образом, изучение динамической прочности корпуса актуально. В этой связи предлагается разработанная авторами методика, позволяющая по данным модельных взрывных испытаний оценить взрывостойкость и на ее основе несущую способность корпуса при запроектной аварии.

Эксперимент проводился на двух моделях БН-800 масштаба 1:10, в одной из которых (модель I) внутриреакторное насыщение\* не моделировалось. Корпуса моделей (внутренний радиус 643, толщина 3 мм), как и прототипа, сварены из стали 12Х18Н10Т (рис. 1). Конструкция модели с имитацией внутриреакторного насыщения (модель II) упрощена (без повышения несущей способности корпуса), а именно:

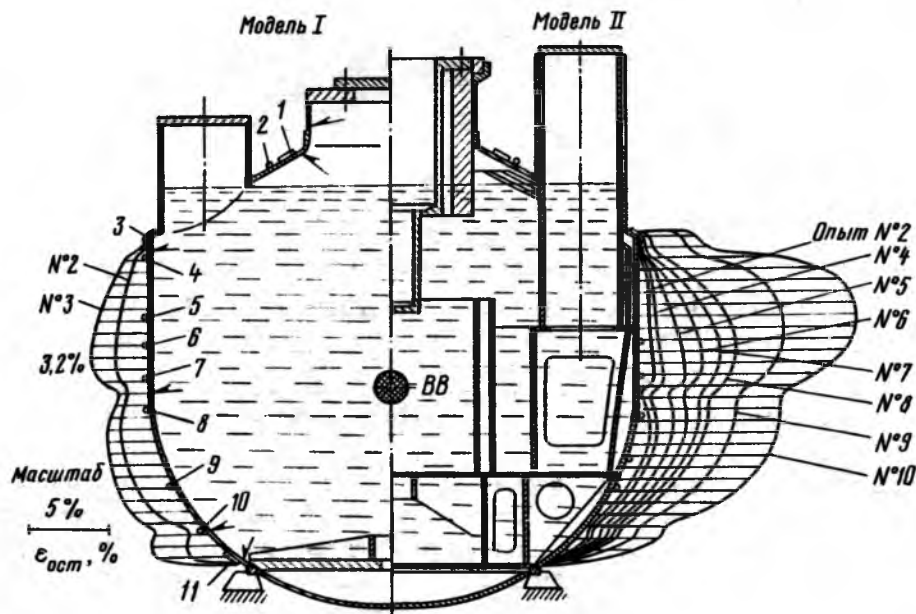
исключены активная зона и зона воспроизводства, внутрибаковая защита, вытеснители, выгородка элеваторов, напорные трубопроводы, система газовой продувки, коллекторы и страховочный корпус;

корпус сварен из меньшего числа листовых панелей; имитаторы внутриреакторного насыщения изготовлены из углеродистой стали; сильфоны заменены тонкими (0,5 мм) обечайками; в качестве большой поворотной пробки использована массивная гильза, приваренная к горловине для имитации гидрозатвора; малую поворотную пробку и поворотную колонну заменила единая ступенчатая полая пробка, закрепляемая в гильзе болтами; внутренняя радиационная защита представлена двумя соосными обечайками толщиной 4 мм, приваренными к опорному поясу.

Корпус модели I имел почти такую же конструкцию, но его горловина закрывалась пластиной на болтах, выступы теплообменников на крыше заменены заглушенными патрубками, опорный пояс — массивным диском с радиальными ребрами жесткости.

Схема постановки опытов приведена на рис. 1. Модели, установленные на опорах (подобно реактору), наполняли водой, полость над которой оставалась заполненной воздухом при атмосферном давлении. Таким образом имитировали наличие в реакторе жидкого натрия и газовой подушки над ним. Высокие температура (~ 400—600 °С) и

\* Здесь внутриреакторное насыщение означает комплекс оборудования, размещенного в корпусе.



Р и с. 1. Схема постановки опытов и эпюры распределения окружающей остаточной деформации корпуса модели БН-800 без имитации (модель I) и с имитацией внутриреакторного насыщения (модель II); стрелками указаны кольцевые сварные швы; 1, 3, 11 — меридиональные, 2, 4—10 — кольцевые тензодатчики

химическая активность жидкого натрия чрезвычайно затруднили бы опыты. Замена его водой допустима, учитывая близость плотности и ударной адиабаты в области давления до 8 ГПа. Вспышку аварийного энерговыделения имитировали детонацией шарового заряда взрывчатого вещества (ВВ) из сплава тротила (тнт) с гексогеном. Теплота взрыва сплава  $Q = 4,78$  МДж/кг, плотность  $\rho = 1650$  кг/м<sup>3</sup> и скорость детонации  $D = 7650$  м/с. ВВ располагали под водой в месте, соответствующем центру активной зоны. Каждую модель нагружали серией взрывов до разрушения. Массу ВВ выбирали из условия достижения в опыте малой пластической деформации корпуса. Параметры динамического деформирования корпусов регистрировали с помощью бифилярных тензодатчиков как кольцевых (конструкции [2]), так и меридиональных (зигзаг-решетка с базой 50 мм); в некоторых опытах проводили скоростную киносъемку моделей. После опыта модель фотографировали и измеряли остаточные деформации корпуса (по меткам на его поверхности).

Конечная задача эксперимента состояла в определении массы эквивалентного заряда ВВ, взрыв которого привел бы к тому же результату, что и серия взрывов меньшей силы.

Результаты эксперимента. Основные исходные данные и результаты измерений приведены в табл. 1, 2, где  $\epsilon_{\max}$  и  $\epsilon_{\text{ост}}$  — максимальная (в данном опыте) и остаточная (после серии опытов) относительная деформация корпуса;  $m$  — масса ВВ в опыте;  $m_z$  — эквивалентная масса ВВ (по серии опытов) в пересчете на тнт по формуле  $(Qm)_{\text{тнт}} = (Qm_z)_{\text{тнт}}^2$ , где слева — характеристики сплава тнт с гексогеном, справа — тнт ( $Q = 4,23$  МДж/кг,  $\rho = 1620$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 7170$  м/с)<sup>\*</sup>. Относительная погрешность определения  $\epsilon_{\max}$  и  $\epsilon_{\text{ост}}$  не превышает 10 и 0,2% соответственно. Схема расположения тензодатчиков и эпюры распределения окружающей  $\epsilon_{\text{ост}}$  вдоль образующей корпуса приведены на рис. 1, модели после некоторых опытов — на рис. 2—5.

\* Формула вытекает из работы [3, с. 575, 576] в акустическом приближении для ВВ, эквивалентных по работоспособности.

Т а б л и ц а 1. Результаты опытов с моделью I

Номер датчика	Номер опыта; <i>m</i> , г		
	1; 5	2; 169,3	3; 107,8
	$\epsilon_{\text{макс}}$ , %; $\epsilon_{\text{ост}}$ , %		
1	-0,02; —	—	0,43; —
2	0,03; —	0,41; —	0,12; —
3	-0,1; —	-1,11; —	—
4	0,08; 0	0,8; 0,7	0,50; 1,2
5	0,11; 0	—; 1,5	1,59; 2,8
6	—; 0	—; 1,8	—; 3,2
7	0,11; 0	2,08; 1,7	1,49; 2,8
8	0,07; 0	2,2; 1,5	0,96; 1,9
9	0,07; 0	2,47; 2	1,58; 3
10	0,07; 0	—; 0,9	2,18; 2,6
11	0,04; —	—	—

Т а б л и ц а 2. Результаты опытов с моделью II

Номер датчика	Номер опыта; <i>m</i> , г									
	1; 5	2; 169,3	3; 55,5	4; 109,8	5; 205,6	6; 205	7; 205,2	8; 205,5	9; 362,7	10; 573,7
	$\epsilon_{\text{макс}}$ , %; $\epsilon_{\text{ост}}$ , %									
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,35; —
3	—	—	-0,3; —	-0,13; —	—	—	—	—	—	—
4	0,04; 0	0,82; 0,2	0,59; 0,2	0,51; 0,3	0,8; 0,4	0,47; 0,6	0,69; 0,9	—; 1,4	3; 3,9	—; 8
5	0,08; 0	0,84; 0,6	0,4; 0,7	0,86; 1	1,89; 2,1	1,3; 3	1,33; 3,9	1,27; 4,9	3,4; 7,9	—; 11,7
6	0,02; 0	1; 0,8	0,59; 0,9	0,9; 1,2	1,63; 2,5	2,58; 3,4	2,25; 4,5	1,1; 5,3	—; 7,6	—; 11,3
7	0,04; 0	1,65; 0,9	0,45; 1,1	0,86; 1,5	1,43; 2,6	1; 3,3	1,1; 4,1	1,2; 4,9	—; 6,6	—; 9,5
8	0,03; 0	0,83; 0,6	0,25; 0,7; —	0,5; 0,9	1,44; 2	—; 2,7	—; 3,4	—; 4	—; 5,3	—; 7,7
9	0,03; 0	—; 0,9	0,28; 1	0,38; 1,2	0,63; 1,5	0,97; 2,1	—; 2,6	1; 3	1,35; 4,3	—; 6,7
10	—	0,6; 0,3	0,15; 0,4	0,33; 0,6	0,72; 1,1	0,83; 1,4	—; 1,7	0,7; 2,1	1,23; 2,9	—; 4,3
11	—	—	0,2; —	0,36; —	0,47; —	0,54; —	—	—	—	—
<i>m</i> <sub>3</sub> , г тнт	—	191	254	378	611	842	1074	1306	1716	2364

Модель I. Нагружение в опыте № 1 было намеренно слабым (см. табл. 1), чтобы, не выходя за пределы упругости материала, оценить деформацию частей корпуса и откалибровать аппаратуру. В опыте № 2 в обечайке, несмотря на малую  $\epsilon_{\text{ост}}$  (до 2%), возникла меридиональная трещина (рис. 2). Очагом разрушения был скрытый дефект, не обнаруженный при входном контроле листовых заготовок (он проявился после пластической деформации); происхождение дефекта не установлено.

После ремонта модели эксперимент был продолжен, а для выяснения истинной взрывостойкости нагружение модели в опыте № 2 считалось неразрушающим. Однако данный инцидент указывает на недопустимость каких-либо дефектов, так как, даже



Р и с. 2. Трещина в обечайке корпуса модели I

не будучи опасными при статическом нагружении, в случае интенсивного импульсного нагружения в процессе развития аварии они могут сыграть роковую роль.

В опыте № 3, хотя масса ВВ была снижена в 1,5 раза, по сравнению с опытом № 2 модель разрушилась: произошел срез жестким опорным кольцом расширявшейся над ним части корпуса; признак среза — наличие в этой зоне окружной  $\epsilon_{\text{ост}}$  при отсутствии меридиональной (см. табл. 1, датчик № 11, рис. 1). Судя по провалам на эпюрах  $\epsilon_{\text{ост}}$ , расширение корпуса резко ограничивали и сварные швы, более жесткие, чем основной металл. Обечайка же, несмотря на деформацию до 3% (см. табл. 1, датчик № 7,  $\epsilon_{\text{ост}}$  в опыте № 2 +  $\epsilon_{\text{макс}}$  в опыте № 3), уцелела. Таким образом, ее разрушение в опыте № 2 действительно было вызвано случайным дефектом и не означало исчерпание несущей способности.

Модель II. Из-за экранирующего действия имитаторов внутриреакторного насыщения реакция модели II на взрыв отличалась от реакции модели I как количественно (увеличенная масса ВВ, число опытов, деформации), так и качественно (иные места и характер разрушений). В опыте № 2 разрушился имитатор гидрозатвора, но блок пробок и колонны не был отброшен взрывом, а выйдя наружу, лег на горловину (рис. 3). Следовательно, сила взрыва была близка к критической для прочности имитатора гидрозатвора, что важно иметь в виду при оценке его взрывостойкости. После усиления имитатора гидрозатвора и ремонта модели эксперимент было продолжено.

В опыте № 7 возле кольцевого шва, связывающего горловину с крышей, возникла трещина (рис. 4). По ней в опыте № 8 горловина (в сборе с блоком пробок и колонны) была оторвана от крыши и отброшена. Наконец, в опыте № 10 возле кольцевого шва, связывающего крышу с обечайкой, возникла и раскрылась окружная трещина (рис. 5). К этому времени имитаторы внутриреакторного насыщения были разрушены и корпус округлился, претерпев значительные меридиональные (до 4%) и окружные деформации (до 12%, см. табл. 2, рис. 1).

Итак, в отличие от модели I все разрушения корпуса модели II были вызваны осевыми нагрузками на элементы крыши. Это объясняется направленным воздействием взрывов под влиянием имитаторов внутриреакторного насыщения. К концу эксперимента опасным стало и перерезывающее воздействие опорного кольца: деформация днища в этой зоне, несмотря на экранирование имитаторами внутриреакторного насыщения, достигла уровня, при котором модель I разрушилась. Разрушение обеих моделей было вязким и происходило в области глубокой пластичности.

Взрывостойкость. Примем за критерий взрывостойкости корпуса критическую (для прочности) массу тнт ( $M$ ): при  $m < M$  корпус не разрушается, при  $m > M$  — разрушается, при многократном нагружении  $m = m_3$ . Очевидно, критическую массу тнт следует оценивать по граничным состояниям корпуса модели II (разрушился — не разрушился) в опасных зонах, которыми являются имитатор гидрозатвора (зона А) — в опыте № 2, связь горловины с крышей (зона Б) — в опытах № 6, 7 и связь крыши с обечайкой (зона В) — в опытах № 9, 10.

Для обечаек из стали 12Х18Н10Т при  $\epsilon_{\text{ост}} \leq 12\%$   $m_3 \sim \sum m_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  — число нагружений, приводивших к пластической деформации) [4]. Поэтому, например, для зоны Б после опыта № 6  $m_3 \sim 842$  г, после опыта № 7 —  $\sim 1074$  г, следовательно,  $0,842 < M < 1,074$  кг тнт; аналогично оценивается критическая масса тнт и для других зон (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Взрывостойкость объектов и запас несущей способности корпуса реактора при аварии

Опасная зона	Модель II		Реактор	
	Опыты	$M$ , кг тнт	$M$ , кг тнт	$S$
А	2	$\leq 0,191$	$\leq 134$	$\leq 1$
Б	6—7	$0,842 < M < 1,074$	$590 < M < 750$	$5 < S < 6$
В	9—10	$1,716 \leq M < 2,364$	$1200 \leq M < 1650$	$10 \leq S < 14$



Р и с. 3. Модель II после опыта № 2 (стрелкой показан блок пробок и колонны, выдвинутый из горловины действием взрыва)



Р и с. 5. То же, что на рис. 3, после опыта № 10 (стрелкой показан деформированный взрывами имитатор теплового экрана, видимый в раскрытой трещине в зоне связи крыши с горловиной)



Р и с. 4. То же, что на рис. 3, после опыта № 7 (стрелкой показана трещина возле шва, связывающего горловину с крышей)

Оценим по полученным данным взрывостойкость натурального корпуса. При переходе к нему от модели линейные размеры возрастают в 10 раз, поэтому, соблюдая подобие, следует принять для  $m_3$  коэффициент масштаба  $k_1 = 10^3$ . Кроме того, необходимо учесть возможное влияние масштабного фактора, положения в активной зоне очага аварийного энерговыделения, термо- и радиационных факторов.

Известно (см., например, работы [5, 6]), что с увеличением размеров прочность и взрывостойкость объекта могут снижаться. Однако, как показали опыты с геометрически подобными обечайками из стали 12Х18Н10Т (внутренний радиус 37, 149, 594 и 1190 мм, толщина соответственно 1, 4, 16 и 300 мм), увеличение размера обечайки в 30 раз до натурной толщины (30 мм) не приводит к снижению ее взрывостойкости.

Аварийное энерговыделение именно в центре активной зоны, вообще говоря, — случайное событие и может произойти в стороне от ее центра. Очевидно, смещение заряда ВВ от центра активной зоны вызовет соответствующее увеличение деформации

ближней к ВВ зоны корпуса по сравнению с деформацией зоны, удаленной от ВВ, что равносильно адекватному снижению взрывостойкости. Используя методику [7], можно показать, что при максимально возможном смещении ВВ взрывостойкость корпуса снизится максимум на 30%. Поэтому принимаем для  $m_3$  коэффициент смещения  $k_2 = 0,7$ .

Нагрев и облучение корпусной стали могут привести к ухудшению ее прочностных и пластических свойств. Однако при эксплуатации реактора данного типа в штатных режимах термо- и радиационные факторы существенного разупрочнения корпуса не вызывают [8]. Тем не менее влияние этих факторов требует более глубокого изучения.

Таким образом, влиянием масштабного, термо- и радиационных факторов можно пренебречь и критическую массу ВВ определять с учетом  $k_1$  и  $k_2$ . Умножив на них  $m_3$  (см. табл. 2), находим, что, например, для зоны Б критическая масса тнт  $590 < M < 750$  кг. Также оценена критическая масса тнт и для иных опасных зон (см. табл. 3).

Несущая способность при аварии. Как известно, энерговыделение при аварии и детонации ВВ различно по своей природе. Поэтому использовать полученные результаты для оценки запаса несущей способности корпуса при аварии ( $S$ ) можно, если за критерий принять работоспособность энерговыделения. Его важнейшими параметрами при этом являются продолжительность ( $\tau$ ) и связанная с ней доля кинетической энергии ( $E_k$ ) в полной энергии ( $E_n$ ), поэтому и оценку  $S$  следует проводить с учетом  $\tau$  и  $E_k$ . Пусть при детонации ВВ  $\tau = \tau_{\text{ВВ}}$ ,  $E_n = E_{n(\text{ВВ})}$  и  $E_k = E_{k(\text{ВВ})}$ , при аварии  $\tau = \tau_A$ ,  $E_n = E_{n(A)}$  и  $E_k = E_{k(A)}$ .

При детонации тнт  $E_{n(\text{ВВ})}$  выделяется со скоростью  $D$ , поэтому при критической массе, указанной в табл. 3,  $\tau_{\text{ВВ}} = (3m_3/4\pi\rho)^{1/3}/D \sim 10^{-4}$  с. При детонации в воде  $E_{k(\text{ВВ})}$ , вообще говоря, не превышает 40%  $E_{n(\text{ВВ})}$  [3, с. 590], но при детонации в реакторе этот параметр существенно снижается из-за насыщенности внутриреакторным оборудованием, резко повышающим потери энергии ударных волн на пути к корпусу. Ввиду сложности этих процессов прямая оценка  $E_{k(\text{ВВ})}$  по результатам наших опытов не представляется возможной, поэтому воспользуемся ее достаточно корректной характеристикой  $\epsilon_{\text{ост}}$ . Что же касается аварии, то заранее указать параметры  $\tau_A$  и  $E_{n(A)}$  невозможно, так как априори неизвестны факторы, обуславливающие энерговыделение и в основном зависимые от случайных причин. Эти факторы определяются численными методами по заданной гипотезе, что выходит за рамки данного исследования. Поэтому методику оценки  $S$  по данным взрывных испытаний покажем на произвольном примере.

Пусть при максимальной аварии в результате роста реактивности со скоростью  $10 \beta/\text{с}$  в активной зоне реактора выделилось  $E_{n(A)} \sim 10$  ГДж за время  $\tau_A \sim 10^{-1}$  с. Зависимость  $E_k(E_n)$ , на практике определяемая численными методами, сложна, так как обобщает взаимосвязь конкретных условий и факторов, в том числе  $\tau_A$ , свойства теплоносителя, насыщенность оборудованием и др. К сожалению, для БН-600 она отсутствует, но учет  $\tau$  и  $E_k$  возможен следующим косвенным путем.

Заданное по условиям аварии  $\tau_A$  в  $10^3$  раз больше  $\tau_{\text{ВВ}}$ . Чтобы понять, каковы последствия увеличения  $\tau$  для прочности объекта, нами были проведены опыты по импульсному нагружению изнутри стальных сосудов (без имитации внутриреакторного насыщения), заполненных водой. В опытах, используя ВВ и другие импульсные источники энергии, при  $E_n = \text{const}$  варьировали  $\tau$  от  $\sim 10^{-6}$  до  $\sim 10^{-2}$  с. В итоге было

установлено, что увеличение  $\tau$  в  $10^3$  раз приводит к уменьшению  $\epsilon_{\text{ост}}$  примерно в 10 раз. Кроме того, из данных табл. 1, 2 следует, что внутреннее насыщение снижает  $\epsilon_{\text{ост}}$  корпуса модели в среднем в 2 раза, но реальное снижение  $\epsilon_{\text{ост}}$  для натурального корпуса должно быть больше, так как общая масса внутреннего насыщения в модели была занижена против фактической. Таким образом, достижение при детонации ВВ той же  $\epsilon_{\text{ост}}$ , что и при аварии, возможно при  $E_{\text{п(ВВ)}}^* \leq E_{\text{п(А)}}/20 \sim 0,5$  ГДж, т.е. при  $M^* \leq 120$  кг тит. Поскольку  $S = M/M^*$ , то, например, для зоны  $B5 < S < 6$ . Аналогично оцениваются  $S$  и для иных опасных зон (см. табл. 3).

Таким образом, исследование показало, что по отношению к аварийным динамическим нагрузкам корпус БН-800 обладает значительными резервами прочности в зонах Б и В. Следует признать, что ценность полученных результатов и корректность оценок могут быть существенно повышены путем более тщательного моделирования как реактора, в том числе его внутреннего насыщения, так и аварийного энерговыделения, в частности, его природы и продолжительности (работы в этом направлении уже дали интересные результаты [9]). Однако во всяком случае взрывостойкость корпуса реактора является характеристикой, значение которой при оценке безопасности реактора трудно переоценить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Городов Г.Ф., Жуков В.В., Зуев Б.И. и др. Основные результаты исследования напряженно-деформированного состояния корпуса реактора БН-600. — В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численная реализация решения физико-механических задач. Горький, 1984, с. 56—61.
2. Шитов А.Т., Минеев В.Н., Клещевников О.А. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций. — Физика горения и взрыва, 1976, № 2, с. 304—307.
3. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. Изд. 2-е под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
4. Иванов А.Г., Рыжанский В.А., Жуков В.В. и др. Некоторые результаты экспериментального изучения динамической прочности реакторов типа БН. Деп. ЦНИИАтоминформ «Техника, технология, экономика», серия «О», 1982, вып. 15. 10 с.
5. Иванов А.Г., Минеев В.Н. О масштабных эффектах при разрушении. — Физика горения и взрыва, 1979, № 5, с. 70—95.
6. Цыпкин В.И., Иванов А.Г., Минеев В.Н., Шитов А.Т. Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении. — Атомная энергия, 1976, т. 41, вып. 5, с. 303—308.
7. Ruzhanski V.A., Ivanov A.G., Timonin L.M. Steel shell response to misaligned HE charge explosion. — In: Proc. X Intern. Conf. HERF-89. Sept. 18—22, 1989, Ljubljana, Yugoslavia, p. 246—255.
8. Баладин Ю.Ф., Мадорский А.Я., Марков В.Г. Конструкционные материалы для основного оборудования АЭС с натриевым теплоносителем: Препринт ЦНИИАтоминформа, 1974. 30 с.
9. Выскубенко В.А., Кокшаров В.В., Колегов Л.Е. и др. Источник динамической нагрузки для испытаний корпусов реакторов. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 5, с. 402—407.

Поступила в Редакцию 5.04.93

УДК 621.184.25:621.181.192

#### КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМЕ РЕГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ АЭС с ВВЭР-1000

*Бараненко В.И., Киров В.С., Кравченко В.П. (Одесский политехнический университет),  
Коровкин В.А., Фридман Н.А. (Ровенская АЭС)*

Температурный уровень системы регенерации высокого давления блоков с ВВЭР-1000 определяется надежностью подогревателей высокого давления. Конструктивно такая система включает две нитки с тремя подогревателями в каждой. На