

# ПРОЧНОСТЬ КАМЕРЫ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

*А. С. Блинов, В. В. Доценко, В. П. Кузьмин, М. В. Никульшин, В. В. Титов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

## Введение

Камера физустановки ЕП1487.1620.00.000 (камера водородной безопасности) предназначена:

– для исследований водородной безопасности АЭС с ВВЭР;

– получения экспериментальных данных по распространению паро-водородной газовой смеси (ВПГС) в изолированных и связанных боксах, моделирующих помещения ЗО, при различных составах и режимах вытекания ВПГС, включая процессы струйных истечений, возможного воспламенения и распространения пламени, смены режимов горения, характерных для протекания тяжелых аварий.

## Конструкция камеры водородной безопасности

Конструкция камеры физической установки ЕП1487.1620.00.000 включает три, последовательно соединенных болтовыми соединениями и сваркой секции и цилиндрическую опору. Центральная секция (царга) состоит из цилиндрической обечайки и

двух фланцев. Верхняя и нижняя секции образованы цилиндрической обечайкой, фланцем и эллиптическим днищем (рис. 1) [1].

Камера включает 14 люк-иллюминаторов двух типов: первый тип – люк-иллюминатор диаметром 200 мм; второй тип – люк-иллюминатор диаметром 500 мм. На рис. 2 представлено расположение люк-иллюминаторов в сечениях камеры А-А, Б-Б, В-В. В каждом сечении находится по три люка первого типа и один люк второго типа. В центре каждого днища располагается люк-иллюминатор первого типа. При эксплуатации в каждый люк-иллюминатор устанавливается один из элементов доступа (заглушка, окно смотровое и гермоввод, предназначенные для монтажа средств наблюдений и измерений). В центр днища и крышки устанавливается заглушка или гермоввод I типа. Окна смотровые I и II типа могут размещаться только в сечениях А-А, Б-Б, В-В камеры.

Заглушки, окна смотровые и гермоввод соединяются с люк-иллюминаторами первого типа шпильками М24 (12 штук), а с люк-иллюминаторами второго типа шпильками М20 (28 штук).

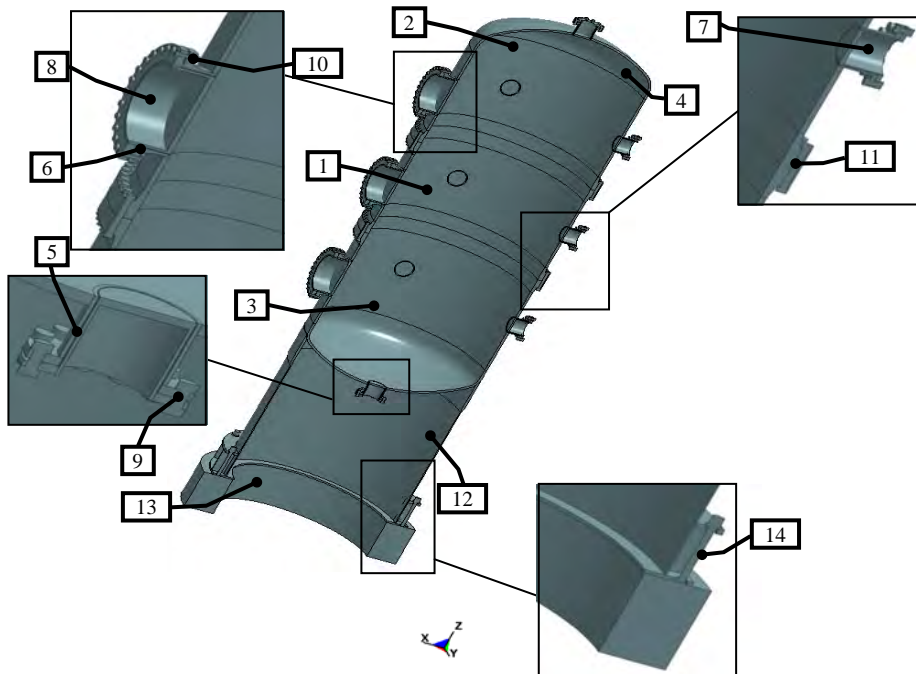


Рис. 1. Схема камеры ЕП1487.1620.00.000: 1 – центральная секция; 2 – верхняя секция; 3 – нижняя секция; 4 – днище; 5 – люк-иллюминатор первого типа; 6 – люк-иллюминатор второго типа; 7 – имитатор заглушки первого типа; 8 – имитатор заглушки второго типа; 9 – шпилька М24; 10 – шпилька М204 11 – шпилька М30; 12 – цилиндрическая опора; 13 – бетонное основание; 14 – фундаментный болт БФ-4

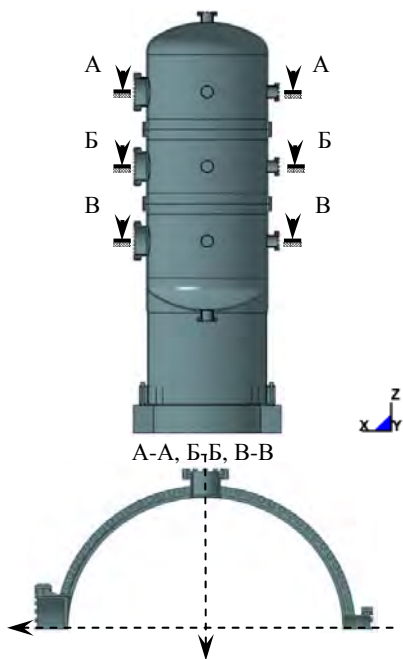


Рис. 2. Расположение люк-иллюминаторов в сечениях камеры

### Конечно-элементная модель камеры

Для проведения расчетов разработана трехмерная конечно-элементная модель камеры физустановки

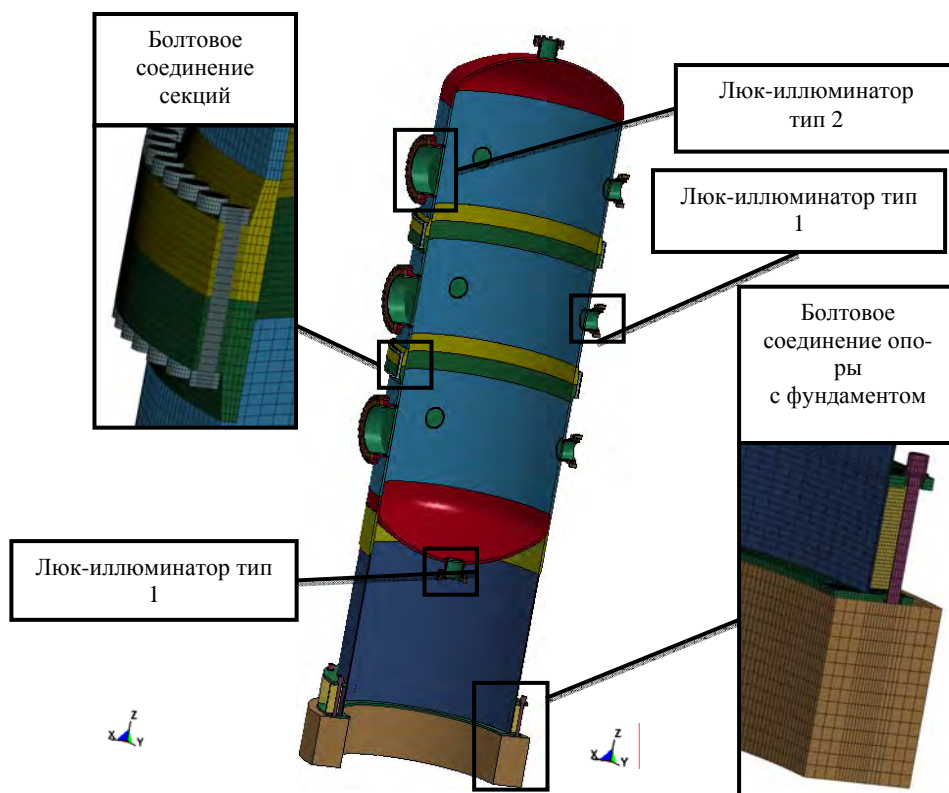


Рис. 3. Конечно-элементная модель камеры физустановки

(рис. 3). Исходя из того, что камера физустановки имеет одну плоскость симметрии, для расчета создана модель 1/2 часть камеры. Конечно-элементная модель содержит  $\approx 2500000$  элементов и  $\approx 3000000$  узлов.

Взаимодействие между конструктивными элементами учитывается с помощью контактных элементов типа «поверхность-поверхность». Коэффициент трения между контактирующими деталями принят равным 0.2. Сварные и резьбовые соединения моделировались контактными элементами с опцией склейки.

Граничные условия соответствуют условию ограничения перемещений узлов перпендикулярно плоскости симметрии ( $U_Y = 0$ ), а для бетонного основания по всем направлениям ( $U_X = U_Y = U_Z = 0$ ).

При задании физико-механических характеристик материалов использовались соответствующие государственные стандарты [2–5]. Для описания упругопластического поведения материалов задавалась билинейная диаграмма деформирования. Расчетный модуль упрочнения получен по условным характеристикам материалов. Физико-механические характеристики материалов представлены в табл. 1.

При взрывном нагружении камера подвергается упругопластическому деформированию. Для оценки прочности камеры используется критерии прочности 5 % по накопленным эквивалентным деформациям, который используется в РФЯЦ-ВНИИТФ при расчетах взрывозащитных камер.

## Условия нагружения

Для выполнения статического расчета прочности нагружение камеры проводилось равномерно распределенным давлением  $P_{\text{раб}} = 0,5$  МПа по внутренней поверхности камеры до элементов герметизации камеры, которые находятся между фланцами люк-иллюминатора и имитатора заглушки.

Расчеты полей давлений, для динамического расчета прочности при взрыве пароводородной смеси в камере, проведены по программному комплексу FAN. В расчетах использовано табличное уравнение состояние воздуха. Стенки камеры предполагаются неподвижными. Инициирование взрыва пароводородной смеси происходит в точке пересечения верхнего сечения А-А с продольной осью камеры (рис. 2).

На рис.4 представлены графики распределения полей давлений в центральных точках имитаторов заглушек камеры. Как видно из рис. 4, максимальное давление  $P_5 = 2,5$  МПа реализуется на момент времени  $t = 6,5$  мс в центре заглушки нижнего днища (график 5). Для заглушки верхнего днища в момент времени  $t = 1,8$  мс давление равно  $P_1 = 1,75$  МПа (график 1). Величина давления для остальных заглушек камеры не превышает  $P_{2-4} = 1,0$  Мпа (графики 2-4).

## Результаты расчетов камеры физустановки при действии статической нагрузки

При действии рабочего давления  $P_{\text{раб}} = 0,5$  МПа, максимальное продольное смещение элементов камеры реализуется для люк-иллюминатора верхнего днища камеры и составляет 1,0 мм. В радиальном направлении максимальное смещение достигается для люк-иллюминаторов второго типа и не превышает 0,25 мм (рис. 5).

На рис. 6 представлено напряженное состояние камеры физустановки. Максимальное эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экр}} = 100$  МПа реализуется в области сопряжения люк-иллюминатора второго типа с цилиндрической обечайкой корпуса (сечение Б-Б). В этом же сечении возникает максимальное эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экр}} = 50$  МПа в зоне сопряжения люк-иллюминатора первого типа с цилиндрической обечайкой. Напряжения, реализуемые в обоих днищах, составляют  $\sigma_{\text{экр}} = 40$  МПа. В опоре для зоны сопряжения основания с камерой реализуется эквивалентное напряжение равно  $\sigma_{\text{экр}} = 30$  МПа.

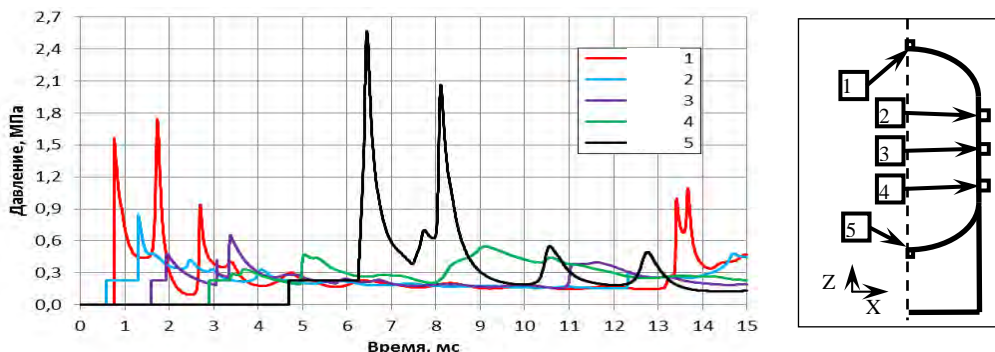


Рис. 4. Распределение полей давления в центральных точках имитаторов заглушек

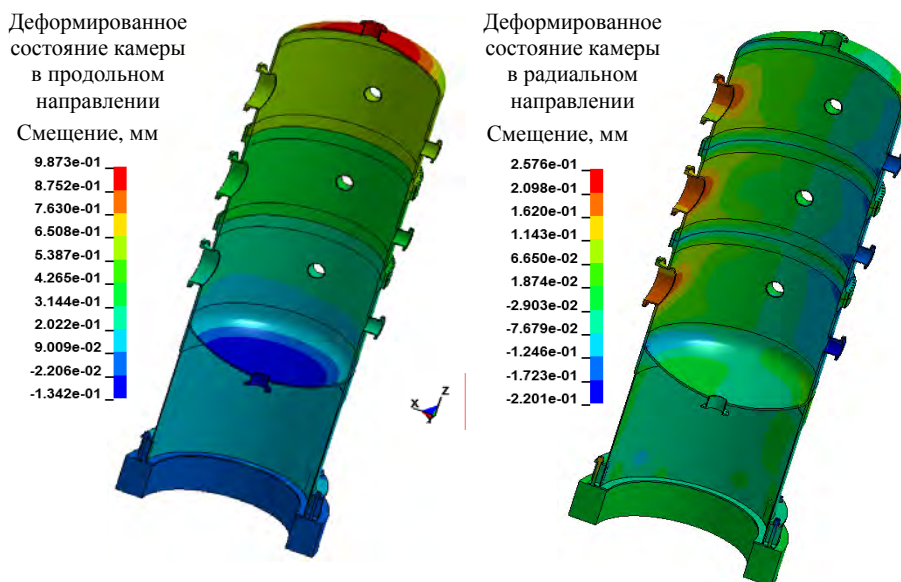


Рис. 5. Деформированные состояния камеры физустановки при действии рабочего давления  $P_{\text{раб}} = 0,5$  МПа

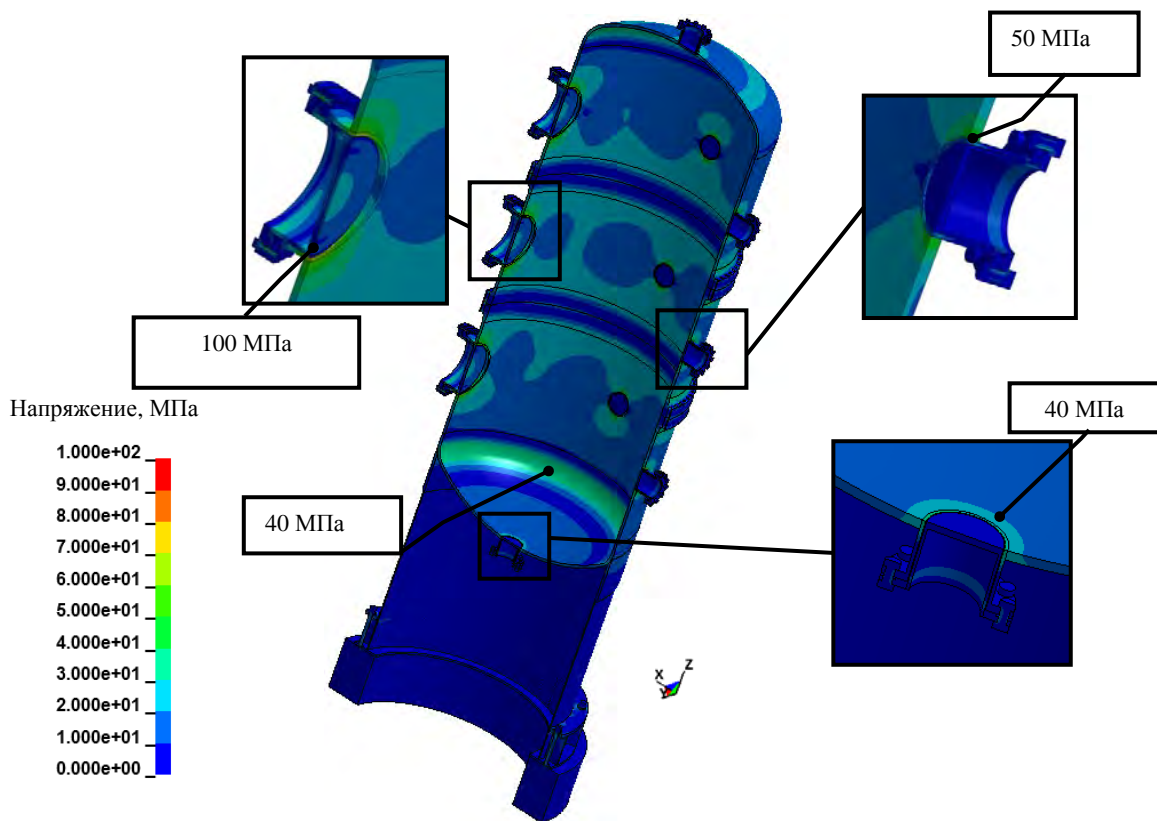


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений камеры физустановки при действии рабочего давления  $P_{\text{раб}} = 0,5 \text{ МПа}$

### Результаты расчета камеры физустановки при взрывном нагружении

Значения максимальных смещений основных элементов камеры представлены в табл. 1. Все максимальные смещения для камеры достигаются в верхней части камеры и определяются близостью точки инициирования и закреплением камеры в области нижнего дна.

Самым нагруженным является люк-иллюминатор первого типа, который находится на нижнем дне (рис. 7). Максимальное эквивалентное напряжение соответствует величине  $\sigma_{\text{экр}} = 240 \text{ МПа}$  и превышает предел текучести материала  $\sigma_{\text{экр}} = 235 \text{ МПа}$ . Пластическое течение начинается в горловине люк-иллюминатора в момент времени  $t=7,8 \text{ мс}$ , что связано с моментом максимального перемещения дна. Деформация нарастает в течение двух миллисекунд и в момент времени  $t = 9,8 \text{ мс}$  достигает максимального значения  $\epsilon = 1,15 \%$ .

Таблица 1

Максимальные смещения основных элементов камеры

Элемент	Смещение, мм	Время, мс
Люк-иллюминатор I типа в верхней секции	2	7.5
Люк-иллюминатор II типа в верхней секции	1.55	7.2
Цилиндрическая обечайка верхней секции	1.57	6.5
Верхнее днище	2.1	6.5
Нижнее днище	1.55	8
Верхняя часть опоры	1	6

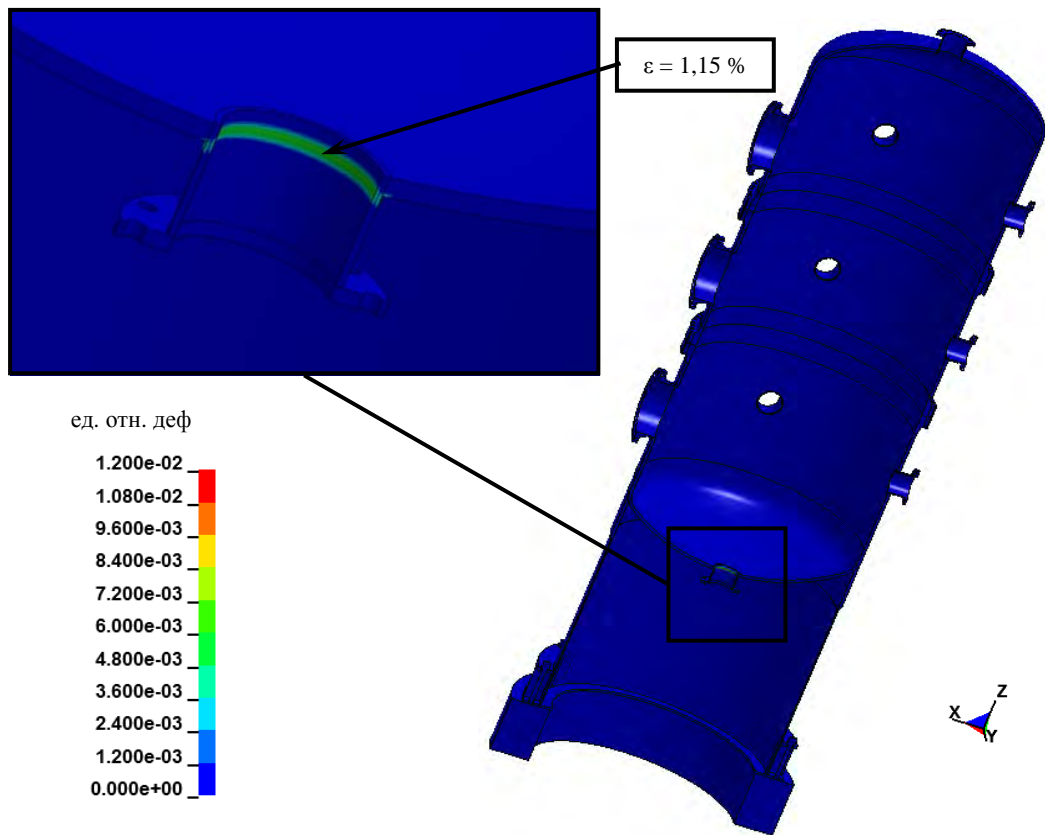


Рис. 7. Распределение пластических деформаций камеры физустановки

### Конструкция элементов доступа

В ранее представленных расчетах использовались имитаторы люков и заглушек, которые необходимы в расчетной модели для передачи на камеру импульса давления при взрывном нагружении.

На рис. 8 представлена конструктивная схема смотрового окна I типа [1].

Окно состоит из стакана 1, прижима 2, втулки 3 и стекла смотрового тип Г, 4. Соединение прижима со стаканом осуществляется резьбовым соединением.

Конструктивная схема заглушки I типа показана на рисунке 9 [1].

Заглушка состоит из стакана 1, прижима 2 и заглушки 3. При проведении измерений во внутреннем объеме камеры устанавливается заглушка с отверстиями для гермоввода.

Элементы II типа имеют подобные конструкции.

Окно смотровое II типа (рис. 10) состоит из корпуса 1, прижима 2, втулки 3 и стекла смотрового для промышленных установок тип Г, 4.

Заглушка II типа (рис. 5) состоит из корпуса 1 и заглушки 2.

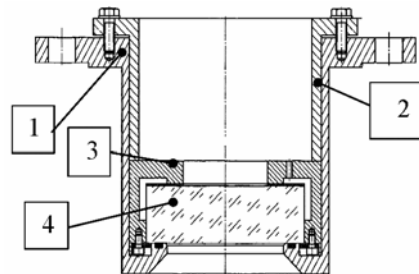


Рис. 8. Окно смотровое I типа: 1 – стакан; 2 – прижим; 3 – втулка; 4 – стекло смотровое

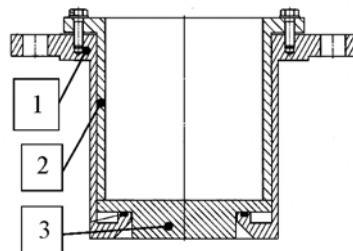


Рис. 9. Заглушка I типа: 1 – стакан; 2 – прижим; 3 – заглушка

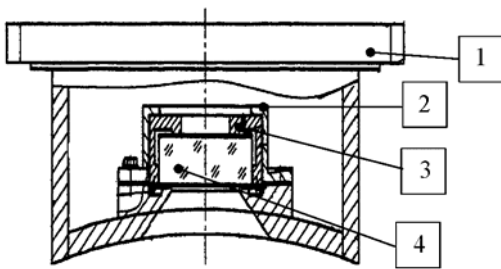


Рис. 10. Окно смотровое II типа: 1 – корпус; 2 – прижим; 3 – втулка; 4 – стекло смотровое

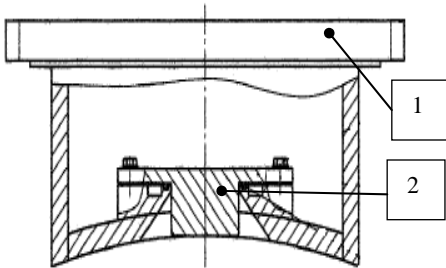


Рис. 11. Заглушка II типа 1 – корпус, 2 – заглушка

### Расчетные модели элементов доступа

Исследование прочности сборок проведено методом конечных элементов. Построение расчетных моделей выполнено на основе конструкторской документации [1].

В расчете принято, что стенки камеры при действии заданной нагрузки являются недеформируемыми.

Конструкции заглушки и окна смотрового I типа являются осесимметричными, поэтому для анализа прочности данных элементов используются двумерные модели (рис. 12, 13). Дискретизация моделей осуществлялась четырехузловыми конечными элементами с опцией осевой симметрии.

Для заглушки с отверстиями гермоввода I типа (рис. 14), окна смотрового II типа (рис. 15) и заглушки II типа (рис. 16) используются трехмерные конечно-элементные модели. Дискретизация моделей осуществлялась твердотельными конечными элементами. Параметры взаимодействия контактных элементов и модели материалов приняты аналогично предыдущему расчету.

На рис. 12–16 показаны зоны определения граничных условий ( $U_x = U_y = U_z = 0$ ) и области приложения давления в деталях. Отсеченные части учитываются заданием граничных условий по плоскости сечения.

Нагружение элементов доступа камеры проводилось рабочим статическим давлением  $P_{\text{раб}} = 0,5 \text{ МПа}$  и наибольшим динамическим давлением для элементов доступа I и II типа, реализующегося при взрыве пароводородной смеси (рис. 4 график 5 для заглушки и заглушки с отверстиями гермоввода I типа, график 2 для окон смотровых I и II типа и заглушки II типа).

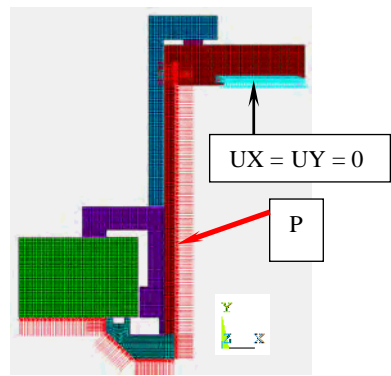


Рис. 12. КЭМ окна I типа

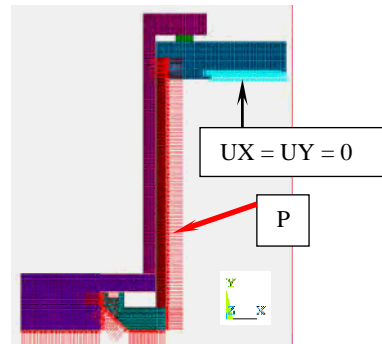


Рис. 13. КЭМ заглушки I типа

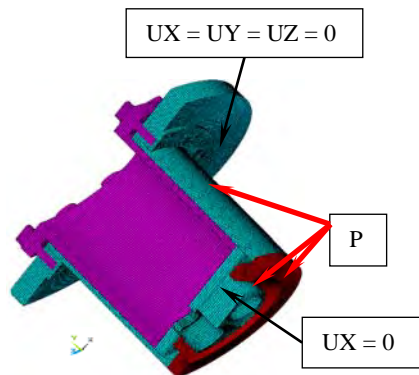


Рис. 14. КЭМ заглушки с отверстиями для гермоввода I типа

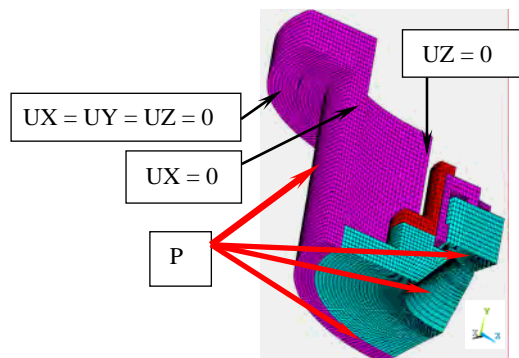


Рис. 15. КЭМ окна смотрового II типа

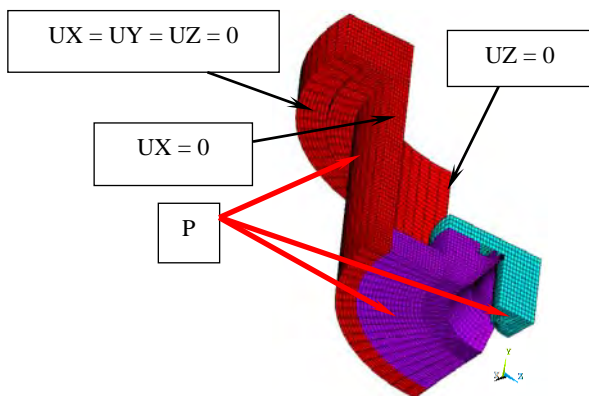


Рис. 16. КЭМ заглушки II типа

### Результаты расчетов элементов доступа

Согласно полученным результатам расчетов прочность элементов доступа камеры при статическом нагружении обеспечивается. Минимальный запас прочности для стекла равен  $K_{\sigma 1} = 8$ , для стальных деталей –  $K_T = 7,8$ .

Значения максимальных напряжений и запасы прочности всех рассматриваемых деталей представлены в табл. 2.

Значения максимальных эквивалентных напряжений и запасы прочности всех деталей при действии аварийного нагружения приведены в табл. 3. По результатам расчетов получено, что прочность элементов доступа камеры обеспечивается. Запас прочности для стекла  $K > 10$ , для стальных деталей –  $K_T = 3$ .

Таблица 2

#### Результаты расчетов

Сборка	Деталь, материал	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_{\text{эKB}}$ , МПа	Запас прочности
Заглушка I типа	Стакан, сталь	235	22	$K_T > 10$
Заглушка с отверстиями гермоввода I типа	Стакан, сталь	235	10	$K_T > 10$
Окно смотровое I типа	Стакан, сталь	235	20	$K_T > 10$
	Стекло	$\sigma_{\text{ви}} = \sigma_{\text{в1}} = 40$ , $\sigma_{\text{в3}} = 590$	$\sigma_1 = 5$ $\sigma_3 = 4,9$ $\sigma_{\text{и}} = 3,9$	$K_{\sigma 1} = 8$ $K_{\sigma 3} > 10$ $K_{\text{ви}} > 10$
Заглушка II типа	Корпус, сталь	235	30	$K_T = 7,8$
Окно смотровое II типа	Корпус, сталь	235	28	$K_T = 8,4$
	Стекло	$\sigma_{\text{ви}} = \sigma_{\text{в1}} = 40$ , $\sigma_{\text{в3}} = 590$	$\sigma_1 = 3,7$ $\sigma_3 = 4$ $\sigma_{\text{и}} = 3,9$	$K_{\sigma 1} > 10$ $K_{\sigma 3} > 10$ $K_{\text{ви}} > 10$

Таблица 3

#### Результаты расчетов

Сборка	Максимальное давление	Деталь, материал	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_{\text{эKB}}$ , МПа	Запас прочности
Заглушка I типа	2,55 МПа	Стакан, сталь	235	64	$K_T = 3,7$
Заглушка с отверстиями гермоввода I типа	2,55 МПа	Стакан, сталь	235	77	$K_T = 3$
Окно смотровое I типа	0,8 МПа	Стакан, сталь	235	24,5	$K_T = 9,6$
		Стекло	$\sigma_{\text{в1}} = 40$ $\sigma_{\text{в3}} = 590$	$\sigma_1 = 1,9$ $\sigma_3 = 2,8$	$K_{\sigma 1} > 10$ $K_{\sigma 3} > 10$
Заглушка II типа	0,8 МПа	Корпус, сталь	235	27,8	$K_T = 8,5$
Окно смотровое II типа	0,8 МПа	Корпус, сталь	235	22,5	$K_T > 10$
		Стекло	$\sigma_{\text{в1}} = 40$ $\sigma_{\text{в3}} = 590$	$\sigma_1 = 3,7$ $\sigma_3 = 3,9$	$K_{\sigma 1} > 10$ $K_{\sigma 3} > 10$

## Заключение

В работе представлены результаты расчетов НДС камеры физиустановки ЕП1487.1620.00.000 и элементов доступа при действии рабочего статического давления и при взрывном нагружении.

По результатам расчетов получено:

– прочность камеры физиустановки при действии рабочего давления  $P_{\text{раб}} = 0,5$  МПа обеспечивается. Деформация элементов камеры происходит в упругой области;

– при аварийном взрывном нагружении деформация достигает максимального значения  $\varepsilon = 1,15$  % в области люк иллюминатора I типа установленного в нижнем днище;

– прочность элементов доступа I и II типов при действии рабочего статического давления  $P_{\text{раб}} = 0,5$  МПа обеспечивается. Минимальный запас прочности по пределу прочности на изгиб для смотрового

стекла равен  $K_{\sigma 1} = 8$ . В стальных деталях запас прочности составляет  $K_T = 7,8$ ;

– при аварийном взрывном нагружении камеры деформирование элементов доступа происходит в упругой области. Прочность элементов сохраняется, запас прочности для смотрового стекла  $K_{\sigma 1} > 10$ , для стальных деталей –  $K_T = 3$ .

## Литература

1. **Конструкторская** документация на физиустановку ЕП 1487.1620.00.000.
2. **Сталь** толстолистовая коррозионностойкая ГОСТ 7350-77.
3. **Поковки** из коррозионностойких сталей и сплавов ГОСТ 25054-81.
4. **Смеси** бетонные ГОСТ 7473-2010.
5. **Стекло** кварцевое, оптическое ГОСТ 15130-86.