

УДК 536.6

*А. В. Королев, М. В. Колесник**Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ ВЗРЫВОВ ВОДОРОДА  
В МАЛОМ ОБЪЕМЕ**

Представлены результаты экспериментального исследования взрывов водорода в конечном объеме. Установлена зависимость влияния объема водородно-кислородной смеси и ее влажности на амплитуду взрыва. Выполнено сравнение экспериментально измеренных значений мощности взрывов с энергией химической реакции взрыва. Показана невозможность прямого переноса результатов эксперимента на реальные объекты.

**Ключевые слова:** водород, Фукусима, эксперимент, гидролиз, индикатор.

На сегодняшний день на АЭС существует угроза накопления опасных концентраций водорода в гермооболочке (ГО) и под крышкой реакторной установки (РУ), где, в сочетании с кислородом, возможны его воспламенение и детонация. Такой ход событий может привести к разрушению четвертого физического барьера безопасности АЭС и выходу радиации за пределы ГО. Примером может служить авария на АЭС «Фукусима-1». Взрывы, произошедшие на энергоблоках 1—4, привели к серьезным повреждениям строительных конструкций станции, обеспечив прямой выход радиации в атмосферу и значительно усложнив аварийно-восстановительные работы на АЭС [1].

Ранее проводились преимущественно исследования для определения порога пожаро- и взрыво-

опасных концентраций водородо-паровоздушной смеси, но исследований по прямому определению давления и энергии взрыва гремучей смеси обнаружить не удалось.

Целью данного исследования является определение максимально возможного давления взрыва гремучей смеси под куполом ГО и под крышкой РУ для АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 для оценки их динамической прочности. Для получения гремучей смеси использовался электролиз воды, поскольку процессы, проходящие при электролизе, по конечному результату подобны процессу радиолиза воды в активной зоне РУ.

Эксперименты выполнялись на установке, представленной на рис. 1.

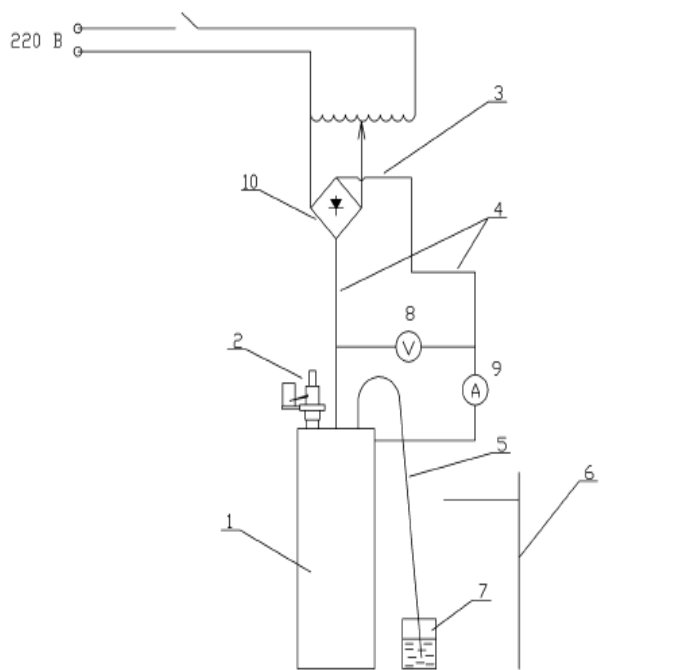


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – электролизер; 2 – индикатор Кросби; 3 – автотрансформатор; 4 – контактные провода; 5 – газоотводная трубка; 6 – держатель для газоотводной трубки; 7 – колба с водой; 8 – вольтметр; 9 – амперметр; 10 – выпрямитель электрического тока

К электролизеру 1 (его устройство показано на рис. 2) с помощью штуцера крепится индикатор Кросби 2 и подводится постоянный электрический ток по проводникам 4 от автотрансформатора 3 через выпрямитель 10. Катодом служит корпус электролизера, анодом — центральный стержень.

Гремучий газ выходит из электролизера по ПВХ-трубке 5 диаметром 4 мм и направляется в колбу 7 под уровень воды, что позволяет определить расход газа (объемным способом).

По вольтметру 8 и амперметру 9 определяются напряжение и сила тока электролиза (в нашем случае диапазон значений составил:  $U=18...22$  В,  $I=1,8...2,4$  А). Через определенный промежуток времени (от 3 до 5 мин в зависимости от рабочего объема электролизера) трубка 5 закрепляется в держателе 6 и к ее выходному отверстию подносится открытое пламя.

Электролизер выполнен из отрезка трубы  $\varnothing 108 \times 6,0$  мм (аустенитная сталь 08X18N10T) и рассчитан на номинальное давление 10,0 МПа при нормальных условиях. Крышка толщиной 17 мм выполнена из электроизолятора — текстолита, крепящегося к корпусу четырьмя шпильками М8.

Для регистрации давления взрыва использовался индикатор Кросби (индикатор Майгак). Индикатор-Кросби выбран для определения давления взрыва гремучей смеси в малом объеме по следующим соображениям. Ранее подобные приборы повсеместно применялись для контроля динамических давлений

в судовых поршневых машинах, дизельных двигателях тепловозов и автомобилей для определения давления вспышки горючего и мощности агрегата. Исходя из назначения, индикатор приспособлен для самых разнообразных режимов измерения динамического давления (от 0,02 до 250 МПа), регулировка его чувствительности задается соотношением диаметр цилиндра/жесткость пружины.

Напомним, что именно индикатор Кросби использовался Н. Е. Жуковским в классическом эксперименте по определению величины гидроудара в водопроводных трубах [2]. В комплект индикатора Кросби (рис. 3) входит набор пружин разной жесткости. Пружина фиксируется на корпусе индикатора и создает заданное сопротивление движению поршня, на который снизу действует давление взрыва. В составе индикатора имеются три поршня с диаметрами 20,3; 14,4 и 9,9 мм. К штоку поршня прикреплена стрелка с иглой на конце (пишущий элемент), которая фиксирует перемещение поршня, оставляя след на индикаторной бумаге, закрепленной на барабане.

Индикатор был предварительно калиброван с помощью динамометра (класс точности 0,01 мм). Калибровка проводилась со всеми пружинами поочередно, отклонение стрелки индикатора фиксировалось на индикаторной бумаге. Результаты калибровки представлены в табл. 1.

После калибровки для исследования были выбраны поршень № 1 и пружины № 10 и № 6.

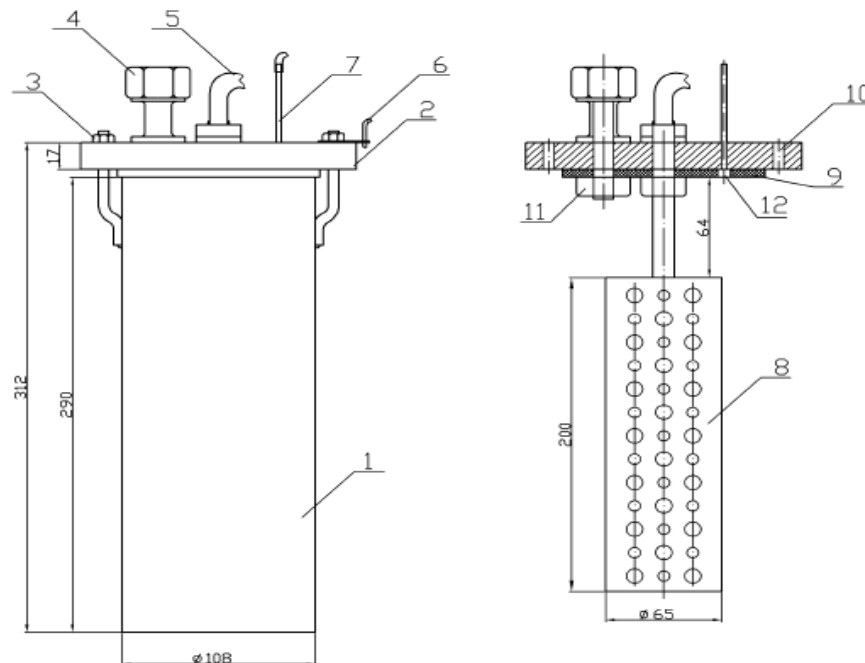


Рис. 2. Устройство электролизера:

1 – корпус электролизера; 2 – крышка электролизера; 3 – крепление крышки; 4 – фланец для крепления индикатора; 5 – электрод (+); 6 – электрод (-); 7 – газоотводная трубка; 8 – дырчатая трубка – рабочая часть электролизера (сердечник); 9 – уплотнительная резина; 10 – 4 отверстия под болт М8; 11 – гайка для фиксации фланца; 12 – отверстие в уплотнительной резине перед выводным каналом  $\varnothing 6$  мм)

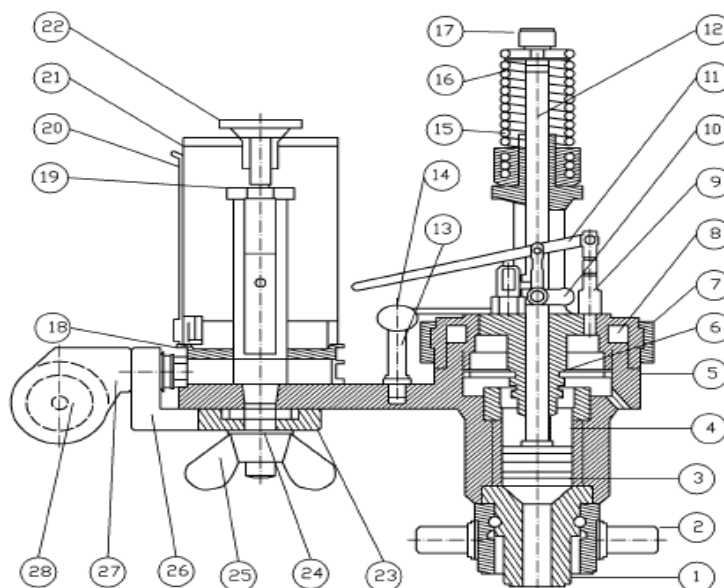


Рис. 3. Схема устройства индикатора Кросби:

1 – присоединительный конус; 2 – контактная гайка 27 Ø10мм; 3 – поршень; 4 – цилиндр; 5 – нижняя часть с откачивающим пазом; 6 – муфта с засечками для смены поршней; 7 – накидная гайка; 8 – шарикоподшипник; 9 – верхняя часть с пружинной балкой; 10 – зажимный винт; 11 – записывающий рычажный механизм; 12 – поршневой шток; 13 – регулировочный винт начала обработки; 14 – прижимная ручка; 15 – пружины; 16 – вращательная пара с шарниром в поршневом штоке; 17 – винт, фиксирующий пружину; 18 – пишущий барабан; 19 – пружинная головка; 20 – бумагодержатель; 21 – барабанная обшивка; 22 – гайка с прямой накаткой; 23 – барабанный винт; 24 – шестигранная гайка; 25 – гайка-барашек с подкладной шайбой; 26 – уголок роликдержателя; 27 – роликдержатель; 28 – ролик со шнуром

Таблица 1. Соответствие показаний динамометра давлению под поршнем

Показания динамометра	Давление в поршнях					
	№ 1 ( $D=2,03$ см; $S=3,23$ см <sup>2</sup> )		№ 2 ( $D=1,44$ см; $S=1,63$ см <sup>2</sup> )		№ 3 ( $D=0,91$ см; $S=0,65$ см <sup>2</sup> )	
	кгс/см <sup>2</sup>	МПа	кгс/см <sup>2</sup>	МПа	кгс/см <sup>2</sup>	МПа
0,0	0	0	0	0	0	0
1,2	0,8	0,08	1,68	0,16	4,20	0,41
2,8	1,9	0,19	3,84	0,38	9,61	0,94
5,0	3,4	0,34	6,80	0,67	17,02	1,67
10,0	6,8	0,67	13,59	1,33	34,03	3,34
22,6	15,5	1,52	30,72	3,01	76,92	7,54
45,2	30,9	3,03	61,43	6,02	153,83	15,08
60,0	41,0	4,02	81,55	7,99	204,20	20,01
100,0	68,4	6,71	135,91	13,32	340,34	33,35

Эксперименты выполняются по следующей методике. Корпус электролизера заполняется водой до ликвидации воздушного «мешка» под крышкой. Затем с помощью мерного шприца объемом 20 мл отбирается заданное количество воды для создания точного объема воздушного пространства внутри корпуса.

На крышку электролизера устанавливается индикатор Кросби, к центральному электроду и корпусу под-

водятся электроды, по которым подается питание от автотрансформатора. При включении автотрансформатора начинается процесс электролиза воды. Молекулы воды расщепляются на водород и кислород, которые вытесняют имеющийся там объем воздуха. Вывод газов из корпуса происходит через газоотводную трубку (минимальный диаметр 2 мм), опущенную свободным концом в колбу с водой для контроля про-

цесса газообразования. Через некоторое время практически весь объем занимает гремучий газ. Оценка времени получения заданного объема гремучего газа проводилась методом вытеснения жидкости из мерной колбы. Это время, необходимое для полного замещения свободного объема воздуха в электролизере гремучим газом. Продолжительное выполнение эксперимента приводит к значительному разогреву жидкости в электролизере и появлению под крышкой пара.

Поджиг гремучей смеси производится с помощью открытого огня, поднесенного к концу трубки. В этот момент происходит дефлаграция смеси в трубке и детонация ее внутри корпуса электролизера. Поршень индикатора под действием давления взрыва поднимается вверх, растягивая пружину. При движении поршня срабатывает записывающий рычажный механизм, оставляя след на индикаторной бумаге, закрепленной на барабане. После взрыва отключается автотрансформатор, мерным шприцом отбираются следующие 20 мл воды, на барабане индикатора передвигается индикаторная бумага — и опыт повторяется.

Процессы, происходящие при прохождении тока через электролит и в самом электролите, а также на обоих электродах, достаточно сложны. И в электролите, и на электродах происходят изменения, например поляризация электродов, которая заставляет увеличивать напряжение для поддержания стабильного уровня выхода водорода. Следует заметить, что полной ясности понимания того, что же происходит при электролизе, до сих пор нет [3], однако все эти явления не влияют на силу взрыва.

Эксперимент проводился сериями, с разными поршнями и пружинами. Полученные данные сведены в табл. 2, а на рис. 4 представлена типичная запись колебаний давления на индикаторную бумагу.

Энергия взрыва, Дж, определялась по известному соотношению

$$Q = P \cdot V, \quad (1)$$

где  $P$  — давление взрыва, Па;  $V$  — объем гремучей смеси, м<sup>3</sup>.

Таблица 2. Результаты экспериментального исследования давления взрыва

№ точки	Объем гремучей смеси		Поднятие стрелки, см	Давление $P$ , МПа	Энергия $Q$ , Дж
	мл	м <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup>			
1	60	0,06	1,1	0,108	6,51
2	80	0,08	1,37	0,135	10,8
3	100	0,1	1,65	0,163	16,3
4	120	0,12	3,22	0,317	38,1
5 (1)	176	0,176	2,1	0,503	88,5
6 (2)	186	0,186	1,9	0,455	84,6
7 (3)	186	0,186	2,48	0,594	110
8 (4)	196	0,196	2,75	0,658	129
9 (5)	204	0,204	2,7	0,646	132
10 (6)	204	0,204	3,0	0,718	146
11 (7)	204	0,204	3,25	0,778	159
12 (8)	204	0,204	1,95	0,467	95,2
13 (9)	204	0,204	2,7	0,646	132

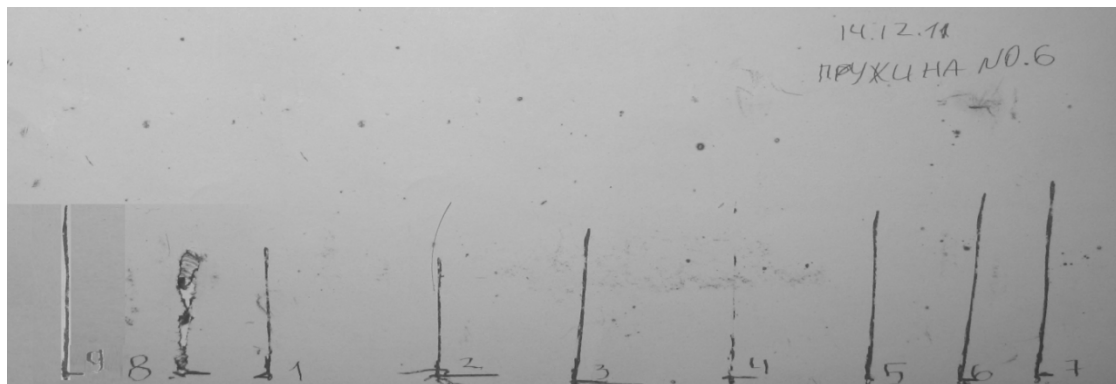


Рис. 4. Типичная запись давления взрыва на индикаторной бумаге (пружина № 6)

Для некоторых объемов эксперимент проводился по несколько раз с различным интервалом времени между началом электролиза и взрывом, чтобы выяснить влияние паровой фазы на силу взрыва (количество пара косвенно оценивалось по времени непрерывной работы электролизера). Типовой опыт из данной серии экспериментов представлен в [4]. По результатам экспериментов построены графики (рис. 5).

Для выяснения влияния влажности гремучей смеси на амплитуду взрывного давления экспериментальные данные были разделены по температуре электролизера (табл. 3, 4).

На рис. 6 представлен график, построенный по данным табл. 3 и 4, наглядно показывающий влияние температуры электролита (и влажности) на давление взрыва гремучей смеси.

Анализ полученных графиков показал, что наилучшая аппроксимация результатов эксперимента

обеспечивается экспоненциальной функцией. Ниже представлены три варианта аппроксимации экспериментальных данных (экспоненциальная, степенная и линейная функции):

$$P=2 \cdot 10^7 \cdot V^2 - 1526 \cdot V + 0,120, \quad R^2=0,982, \quad (2)$$

$$P=92162 \cdot V^{1,659}, \quad R^2=0,967, \quad (3)$$

$$P=4487 \cdot V - 0,222, \quad R^2=0,958, \quad (4)$$

где  $R^2$  — степень корреляции.

Воспользуемся полученными зависимостями и выполним экстраполяцию силы взрыва водородной смеси на большие объемы (объем под крышкой РУ и объем ГО). При более детальных расчетах следует учитывать, что при изменении объема изменяется и его геометрия, что также должно влиять на силу взрыва.

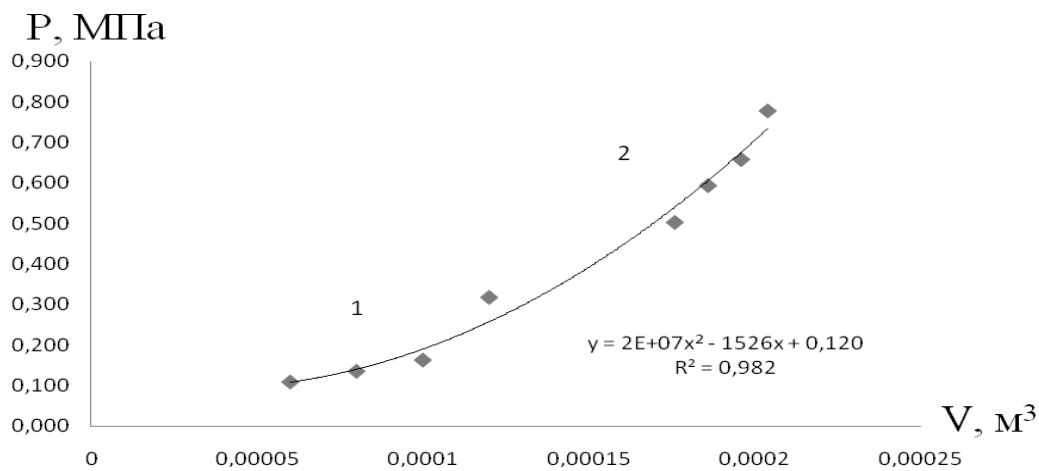


Рис. 5. Зависимость давления взрыва от объема гремучей смеси:  
1 – пружина № 10; 2 – пружина № 6

Таблица 3. Данные экспериментов на горячей воде (температура более 40 °С)

№ точки	Объем гремучей смеси V		Отклонение стрелки, см	Давление P, МПа	Энергия Q, Дж
	мл	м³			
1	100	0,0001	1,65	0,163	16,3
2	120	0,00012	3,22	0,317	38,1
3	186	0,000186	1,9	0,455	84,6
4	204	0,000204	2,7	0,646	132

Таблица 4. Данные экспериментов на холодной воде (температура 15...25°С)

№ точки	Объем гремучей смеси V		Отклонение стрелки, см	Давление P, МПа	Энергия Q, Дж
	мл	м³			
1	60	0,00006	1,1	0,108	6,51
2	80	0,00008	1,37	0,135	10,8
3	176	0,000176	2,1	0,503	88,5
4	186	0,000186	2,48	0,594	110
5	204	0,000204	3,25	0,778	159
6	214	0,000214	2,5	1,047	224

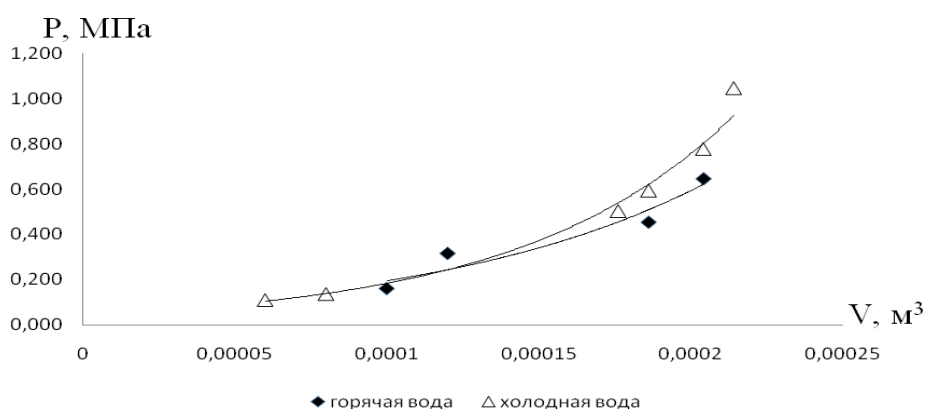


Рис. 6. Зависимость давления взрыва от объема гремучей смеси при разных температурах электролита

Объем под крышкой реактора найдем как половину объема эллипсоида вращения, через высоту и диаметр крышки реактора ( $H=2215$  мм;  $D=3396$  мм):

$$V = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} R^2 \cdot H = \frac{4}{6} \cdot 1,698^2 \cdot 2,215 = 4,258 \text{ м}^3, \quad (5)$$

де  $R$  — радиус крышки;  $H$  — высота крышки.

Учтем уменьшение свободного объема за счет патрубков технологических каналов:  $0,9V=3,832 \text{ м}^3$ .

Свободный объем ГО для реакторов ВВЭР-1000 составляет  $58000 \text{ м}^3$ . Проведя экстраполяцию по зависимости (2), разделив полученное значение на весь свободный объем, найдем значения давления взрыва гремучей смеси под крышкой РУ и в объеме ГО (табл. 5).

Если полученную энергию взрыва представить в тротиловом эквиваленте, то энергия взрыва гремучей смеси в объеме ГО будет эквивалентна взрыву  $7,1$  Мт ТНТ. Для сравнения напомним, что энергия взрыва ядерной бомбы «Малыш» над Хиросимой 6 августа 1945 года по разным оценкам составил от  $13$  до  $18$  кт ТНТ.

Такие оценки наглядно показывают недопустимость прямого переноса экспериментальных данных

по объемным взрывам с малых объемов на большие, что говорит о необходимости разработки условий таких перерасчетов.

Для оценки адекватности полученных результатов рассчитаем энергию взрыва водорода через энергию-химической реакции. К дефлаграции и/или детонации гремучей смеси приводит экзотермическая реакция между водородом и кислородом с образованием воды (при  $t=20$  °C) [5]:



Результаты расчета энерговыделения по реакции (6), пересчитанные на объем экспериментальной ячейки, а также результаты экспериментального определения взрывной энергии представлены в табл. 6. КПД взрыва рассчитан по соотношению

$$\text{КПД} = \frac{Q_{\text{т}}}{Q_{\text{с}}} \cdot 100\%.$$

Сравнение результатов расчета энерговыделения (см. табл. 6) дало интересный результат. Энергия взрыва составляет небольшую долю от энергии химической реакции. Основная часть энергии переходит в тепло, а остаток идет на повышение давления.

Таблица 5. Результаты экстраполяции на реальные объекты

Объект	Объем $V, \text{ м}^3$	Давление взрыва $P, \text{ Па}$	Энергия взрыва $Q, \text{ Дж}$
Крышка РУ	3,832	$2,94 \cdot 10^8$	$1,13 \cdot 10^9$
ГО (св.об.)	58000	$6,73 \cdot 10^{16}$	$3,90 \cdot 10^{21}$

Таблица 6. Сравнение теоретической энергии реакции и экспериментальной энергии взрыва

Объем ячейки $V, \text{ м}^3$	Энергия химической реакции $Q_{\text{с}}, \text{ Дж}$	Экспериментальная энергия взрыва $Q_{\text{т}}, \text{ Дж}$	КПД взрыва %
0,00006	652,7	6,5	0,996
0,00008	870,2	10,8	1,24
0,000176	1915	88,5	4,62
0,000186	2024	110,4	5,45
0,000204	2220	158,7	7,15
0,000214	2328	224,1	9,63

Известно, что КПД ракетной установки равен 10—12 %. Таким образом, порядок полученного КПД взрыва (около 5—10 %) вполне адекватен КПД ракетной установки. Кроме этого, исследование показало, что с увеличением объема ячейки КПД взрыва растет. Этот факт подчеркивает вывод о влиянии на амплитуду взрыва геометрии объема, в котором производится взрыв.

### Выводы

1. Исследования показали, что для проведения пересчета экспериментальных данных по взрывам в малых объемах на технологические объемы АЭС

необходимо учитывать геометрические характеристики свободного объема, температуру и состав среды гермооболочки, в частности величину паровой фазы.

2. Коэффициент полезного действия взрыва составил 1—10 % теплоты образования воды, причем КПД взрыва растет с увеличением объема экспериментальной ячейки.

3. Эксперимент подтверждает, что накопление критической концентрации гремучей смеси и её детонация в гермообъеме приведет к разрушению защитной оболочки, так как амплитуда взрыва может достигать значений от  $3,77 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^{10}$  Па, что значительно превышает проектный запас прочности гермооболочки.

### Список использованной литературы

1. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский — М.: ГИТТЛ, 1949. — 89 с.
2. Лепехин Ф. Г. Электролиз воды. — <http://hepd.pnpi.spb.ru/ofve/nni/elva.htm>
3. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва / Л. Н. Хитрин. — М.: Изд-во МГУ, 1957. — 269 с.
4. Экспериментальное исследование взрыва гремучего газа в замкнутом объеме. — <http://www.youtube.com/watch?v=L8xvIalHnc4>
5. Бесков С. Д. Технохимические расчеты / С. В. Бесков. — М.: Высш. шк., 1962. — 468 с.

Получено 05.02.2013