

УДК 539.89

С. А. Виноградов, канд. техн. наук

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТИПА «НАКОВАЛЬНИ С УГЛУБЛЕНИЕМ»

The geometrical characteristics of the high pressure apparatuses of “anvil with recess” type were analyzed. There was shown that the wide variety of dimension types of HPA can be reduced in the frames of dimensionless analysis to three types of HPA. The physical mechanism of each type should be described as relations among similarity criteria.

В течение более чем 50-летний срок эксплуатации аппаратов высокого давления (АВД) типа “наковальня с углублением” было сконструировано большое количество типоразмеров АВД, которые в зависимости от геометрии углубления разделяются на два типа: «чечевица» и «тороид». Предложено много АВД этих разновидностей, различающихся характерными размерами.

Проектирование нового АВД в рамках одного типа осуществляется в целях увеличения полезного объема при сохранении либо увеличении рабочих P-T параметров без изменения рабочего объема, а также повышения надежности удержания в реакционном объеме достигнутого давления и температуры или увеличения срока службы АВД.

Основной эксплуатационной характеристикой АВД является мультипликация давления, т. е. отношение давления в реакционном объеме к удельному усилию (отнесенному к единице площади), действующему на АВД. Эта характеристика определяется экспериментально для каждого типоразмера АВД. Для этого определяют тарировочную характеристику: зависимость давления в реакционной ячейке от действующего на АВД усилия. Такой подход требует затрат времени и средств для изготовления АВД, необходимой оснастки и деталей реакционной ячейки. Представляет интерес возможность прогнозирования характеристик проектируемого АВД без трудоемких экспериментов.

Научно- обоснованные методы перенесения закономерностей работы или технических характеристик АВД одного типоразмера на другой базируется на теории подобия. Эта теория является основой для распространения закономерностей конкретной физической системы на все подобные. При этом нет необходимости экспериментально исследовать каждую конкретную систему, достаточно получить закономерности для обобщенного случая и выразить их через зависимости между безразмерными комплексами (критериями подобия), характерными для обобщенной системы.

Условия подобия систем приводятся в трех теоремах подобия [1]. Необходимые и достаточные условия подобия определяются третьей теоремой подобия, согласно которой для подобия физических явлений необходимо и достаточно, чтобы были постоянны определяющие критерии подобия, а также подобны условия однозначности природы и модели. Третью теорему доказал М.В. Кирпичев в 1931 г. [2]. Определяющими называются критерии, составленные из величин, входящих в условия однозначности. Условия однозначности выделяют конкретную задачу из класса подобных и включают [2]:

1. геометрическую характеристику рассматриваемой области;
2. задание физических констант, входящих в дифференциальные уравнения;
3. начальные условия (для нестационарных задач);
4. граничные условия.

Таким образом, необходимыми и достаточными условиями подобия являются следующие:

1. геометрическое подобие;
2. физическое подобие – подобие физических параметров среды;
3. подобие полей всех переменных в начальный момент процесса (только для нестационарных процессов);
4. подобие условий на границах системы;
5. равенство критериев подобия для соответственных точек полей и моментов.

Рассмотрим только одно из необходимых и достаточных условий подобия – геометрическое подобие применительно к разнообразию АД типа наковальни с углублением. Схемы АД типа «чечевицы» и «тороида» показаны на рис. 1–2. Аппараты типа «чечевицы» в зависимости от геометрии углубления разделяются на две подгруппы: АД с углублениями в виде сферы (рис. 1, а) и конуса, сопряженного со сферой (рис. 1, б).

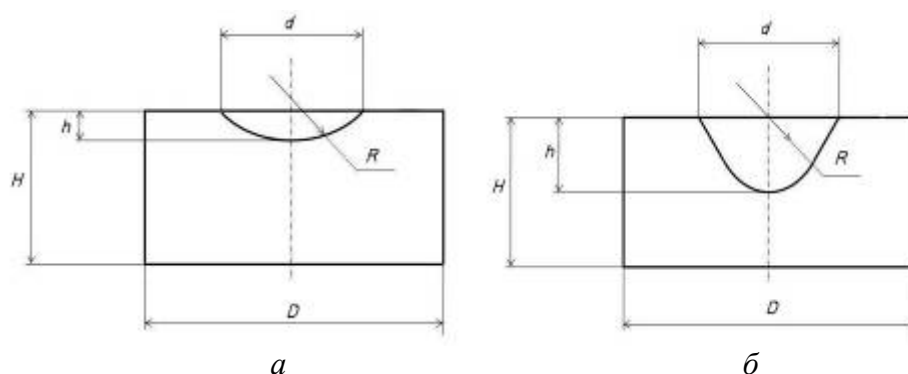


Рис. 1. Схема АД типа «чечевицы»: а – с углублением в виде сферы; б – с углублением в виде конуса, сопряженного со сферой

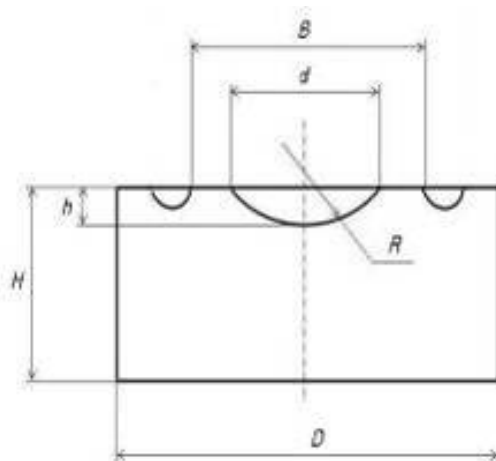


Рис. 3. Схема АД с углублением типа «тороид»

Также на рисунках 1–2 показаны характерные геометрические размеры рабочей поверхности матриц. Геометрическое подобие АД будет выражаться постоянством отношений характерных размеров.

Были проанализированы АД, спроектированные и используемые в исследовательских и промышленных целях ведущими научно-исследовательскими организациями – ИСМ и ИПМ НАН Украины. Безразмерные отношения геометрических размеров АД трех типов приведены в табл. 1–2. В качестве безразмерных отношений были взяты отношения характерных размеров к диаметру углубления (d). Исследовали АД с углублениями диаметром $d = 15,2 - 46$ мм (сфера), $d = 19,6$ мм – 55 мм (конус-сфера) и $d = 14 - 40$ мм (типа «тороид»).

Таблица 1. Отношения характерных геометрических размеров АД типа «чечевицы» – углубление в виде сферы

№ п/п	АД, спроектированные в ИСМ НАН Украины				АД, спроектированные в ИПМ НАН Украины			
	δh	δr	δD	δH	δh	δr	δD	δH
1	0,18	0,78	1,81	0,77	0,18	0,79	1,97	1,11
2	0,18	0,77	1,79	0,79	0,22	0,68	2,68	1,0
3	0,19	0,77	1,79	0,79	0,17	0,85	1,85	1,03
4	0,18	0,78	1,75	0,75	0,22	0,68	1,96	1,3
5	0,18	0,78	1,75	0,8	0,22	0,68	1,87	1,3
6	0,18	0,78	1,75	0,8				
7	0,18	0,78	1,74	0,79				
Среднее отклонение	0,001	0,003	0,04	0,02	0,03	0,06	0,18	0,15

Таблица 2. Отношения характерных геометрических размеров АД типа «тороида», спроектированных в ИСМ НАН Украины

№ п/п	δh	δr	δD	δH	δB
1	0,18	0,79	3	1,43	1,29
2	0,2	0,75	2,6	1,2	1,25
3	0,19	0,73	2,54	1,17	1,22
4	0,27	0,6	2,38	1,13	1,25
5	0,19	0,75	2,67	1,21	1,25
Среднее отклонение	0,03	0,14	0,31	0,07	0,01

Таблица 3. Отношения характерных геометрических размеров АД типа чечевицы – углубление в виде конуса, сопряженного со сферой

№ п/п	АД, спроектированные в ИСМ НАН Украины				АД, спроектированные в ИПМ НАН Украины							
	δh	δr	δD	δH	δh	δr	δD	δH				
1	0,28	0,46	1,78	0,79	0,28	0,46	1,81	0,79				
2	0,28	0,46	1,79	0,79	0,28	0,46	1,81	1,02				
3	0,28	0,46	1,75	0,8	0,24	0,6	1,81	1,02				
4	0,28	0,46	1,79	0,79	0,3	0,4	1,72	1				
5	0,28	0,47	1,62	0,72	–							
6	0,25	0,55	1,82	0,82								
7	0,28	0,46	1,74	0,78								
8	0,31	0,38	1,45	0,83								
5	0,28	0,47	1,62	0,72								
9	0,3	0,38	1,76	0,7								
10	0,3	0,4	1,76	0,7								
Среднее отклонение	0,01	0,035	0,09	0,04					0,02	0,05	0,02	0,11

Примечание: $\delta h = \frac{h}{a}$; $\delta r = \frac{r}{a}$; $\delta D = \frac{D}{a}$; $\delta H = \frac{H}{a}$; $\delta B = \frac{B}{a}$

Согласно данным табл. 1–3, АД одного типа (в пределах одной таблицы) можно считать приблизительно геометрически подобными, так как среднее отклонение отношений характерных размеров не превышает 10 %. Выполнение условия приближенного геометрического подобия приводит к выполнению условия приближенного механического подобия этих АД,

при соблюдении механического подобия используемых материалов и геометрического подобия конструкций реакционных ячеек.

Основной эксплуатационной характеристикой АД и применяемой ячейки является тарировочная зависимость, т. е. зависимость давления в реакционной ячейке от действующего на АД усилия. Исходя из механического подобия АД одного типа, приходим к выводу, что тарировочные зависимости этих АД также подобны с некоторым коэффициентом подобия по оси интегрального усилия (F). Этот коэффициент будет определяться через критерии подобия, которые рассчитываются на основе либо анализа размерностей, либо из дифференциальных уравнений [3], описывающих напряженное состояние контейнера и реакционной ячейки АД. Исходя из механической аналогии АД типа «плоских наковален Бриджмена» и «наковален с углублением» можно предположить, что критериев механического подобия последних АД также относится критерий [4]:

$$\frac{pR^2}{F} = idem ,$$

где p – давление в характерной точке АД (обычно внутри реакционной ячейки); R – характерный размер АД (например, радиус углубления); F – действующее на АД усилие.

Указанный критерий является выражением закона Барба – Кика [5] и показывает, что коэффициент подобия для тарировочной кривой пропорционален квадрату отношения линейных размеров. Сказанное справедливо при условии геометрического подобия конструкции реакционной ячейки и применения механически тождественных материалов для изготовления сходственных конструктивных элементов.

Таким образом, несмотря на многообразие типоразмеров АД, в рамках безразмерного анализа с приемлемой для практики точностью их можно свести к трем типам: «чечевица» с углублениями типа сферы, конуса, сопряженного со сферой, и «тороид». Закономерности, определенные экспериментально для одного типоразмера, можно распространить на все другие размеры, если выразить их в виде взаимозависимостей безразмерных комплексов – критериев подобия.

Литература

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
2. Кирпичев М. В., Конаков П. К. Математические основы теории подобия. – М.;Л., 1949. – 104 с.
3. П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. М. Минкевич, Б. А. Шеховцев. Теория подобия и размерностей. Моделирование / М.: Высш. шк. –1968. – 206 с.
4. Виноградов С. А. Критерии подобия для моделирования процесса сжатия тонкого диска между плоскими наковальнями Бриджмена // Сверхтвердые матер. – 2003. – № 1. – С. 36 – 46.
5. Давиденков Н. Н. Некоторые проблемы механики материалов. – Л.: Ленинград. газ. – журн. и книж. изд-во, 1943.

Поступила 19.05.09