

**УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КОНТЕЙНЕРА В АППАРАТАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПРОФИЛИРОВАННЫМИ НАКОВАЛЬНЯМИ, РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ В АППАРАТЕ ТИПА «КОНАК»**

*Николаев Николай Александрович*  
Старший научный сотрудник ИФВД РАН,  
г. Москва, г. Троицк

**ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF A CONTAINER IN HIGH-PRESSURE DEVICES WITH PROFILED ANVILS, CALCULATION OF THE BEARING CAPACITY OF THE COMPACTION IN A KONAK TYPE DEVICE**

*Nikolaev Nikolai Alexandrovich*  
Senior Researcher, IHPP RAS,  
Moscow, Troitsk

**Аннотация.** Процесс создания давления в устройствах с профилированными наковальнями связан с упругопластической деформацией материала контейнера-прокладки, располагаемой между пуансонами камеры, по мере их сближения друг к другу под действием нагрузки пресса. Полезный объем камеры, получаемые в ней высокие давления, прочностные качества пуансонов и несущая способность прокладки непосредственно зависят от характера профилирования обращенных друг к другу рабочих поверхностей пуансонов камеры. В предлагаемой работе представлена оценка геометрических параметров профилирования пуансонов камеры высокого давления типа «Конак».

**Abstract.** The process of creating pressure in devices with profiled anvils is associated with elastic-plastic deformation of the material of the container-gasket, located between the punches of the chamber, as they approach each other under the action of the press load. The useful volume of the chamber, the high pressures obtained in it, the strength qualities of the punches and the bearing capacity of the gasket directly depend on the nature of the profiling of the working surfaces of the chamber punches facing each other. The proposed work presents an assessment of the geometric parameters of the profiling of the punches of the high-pressure chamber of the "Konak" type.

**Ключевые слова:** камера высокого давления; упругопластическая деформация; профилированные наковальни.

**Keywords:** high pressure chamber; elastic-plastic deformation; profiled anvils.

Мы показали ранее [1], что усредненное контактное давление, действующее на центральную область пуансонов в камере с профилированными наковальнями при использовании принципа массивной поддержки нагружаемой части пуансонов, изготовленных из твердого сплава, может достигать ~ 10 ГПа. Оценим возможности создания такого давления в реакционном объеме камеры, который формируется центральными углублениями в пуансонах с размещением между пуансонами твердотельной среды.

По существу, способ создания давления в центральном реакционном объеме камеры заключается в увеличении в этом объеме средней плотности вещества. Для большинства твердых тел, в том числе и для литографского камня, который часто служит материалом контейнера образцов и уплотнений в аппаратах высокого давления, относительное увеличение плотности при давлении ~ 10 ГПа составляет около 20% (без учета начальной пористости). Так по данным П. Бриджмена [2] для графита это увеличение составляет ~ 15%, а для кальцита – ~ 20%. Если записать относительное изменение плотности вещества как  $\Delta\rho/\rho = \Delta m/m - \Delta V/V$  ( $\rho = m/V$ , где  $m$  – масса,  $V$  – объем), то её увеличение в центральном объеме камеры можно представить как результат конкуренции двух процессов – уменьшения реакционного объема камеры вследствие сближения пуансонов друг к другу,  $\Delta V/V$ , и истечения вещества из реакционного объема,  $\Delta m/m$ . На рис. 1 а) в качестве примера такой конкуренции изображена «чечевица» реакционного объема камеры, где со знаком "+" показано ~ 20%-ное изменение начального объема в результате сближения абсолютно жестких пуансонов, а со знаком "-" – тот же ~ 20%-ный объем вещества, истечение количества которого из центральной части камеры в боковом направлении может полностью компенсировать «работу пресса».

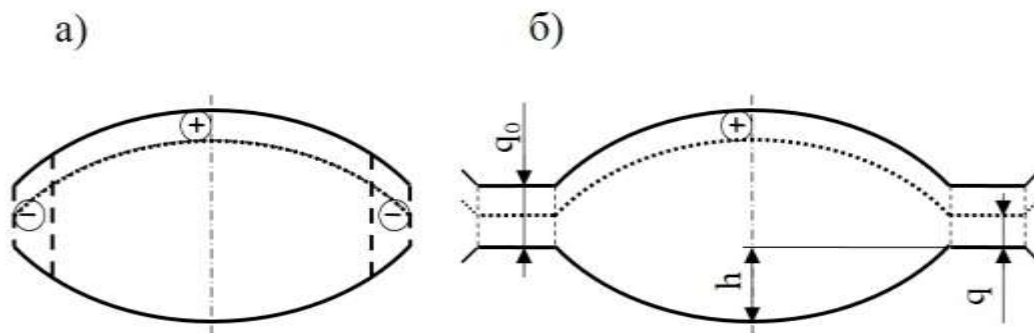


Рис. 1. а) – пример равновеликих объемов в «чечевице»: слоя, образованного смещением верхней сферической поверхности, и ее внешнего кольцевого слоя. б) – «чечевица» и плоский кольцевой слой деформируемого уплотнения камеры. Профили пуансонов даны схематически в аксиальном разрезе.

В аппаратах типа «Конак» (кольцевые наковальни) [3, 4] вокруг центральных углублений матриц выполнены выступы, которые, по аналогии с конструктивными особенностями открытых штампов, формируют кольцевой слой уплотнения, препятствующий истечению вещества из центрального объема камеры. (При штамповке изделий такой слой называют заусенцем). Пример «чечевицы» с кольцевым слоем уплотнения, показан на рис. 1 б). Если предположить, что в процессе сжатия истечение материала контейнера из внутреннего объема камеры отсутствует, то величина внутреннего давления в ней будет определяться сжимаемостью или средним объемным модулем упругости  $K_{\text{ср}}$  среды, заполняющей центральный объем:

$$P = -K_{\text{ср}} \int_{V_0}^V \frac{dV}{V},$$

где  $V_0$  – начальный центральный объем камеры,  $V$  – объем при давлении  $P$ . И если центральные углубления в пуансонах выполнены в виде шаровых сегментов с радиусом углублений  $r$  и высотой углублений  $h$ , так что при  $h \ll r$  полный реакционный объем в камере можно записать в виде  $V \approx \pi r^2(q + h)$ , то получается, что генерируемое давление в центральной области камеры можно оценивать по формуле:

$$P \approx -K_{\text{ср}} \ln \left( \frac{q+h}{q_0+h} \right), \quad (1)$$

где, в соответствии с рис. 1 б),  $q_0$  – начальное и  $q$  – при давлении  $P$  расстояния между пуансонами в заусенце. В качестве примера на рис. 2 представлены графики зависимости давления в камере от расстояния между пуансонами, построенные с помощью формулы (1) для различных высот центрального углубления в пуансонах при условии, что конечное давление величиной 10 ГПа будет достигаться в камере при расстоянии между пуансонами  $q_{\text{к}}$ , равном 1 мм. Среднее значение объемного модуля упругости при построении графиков было принято равным 50 ГПа (20%-ное уменьшение объема материала при давлении 10 ГПа).

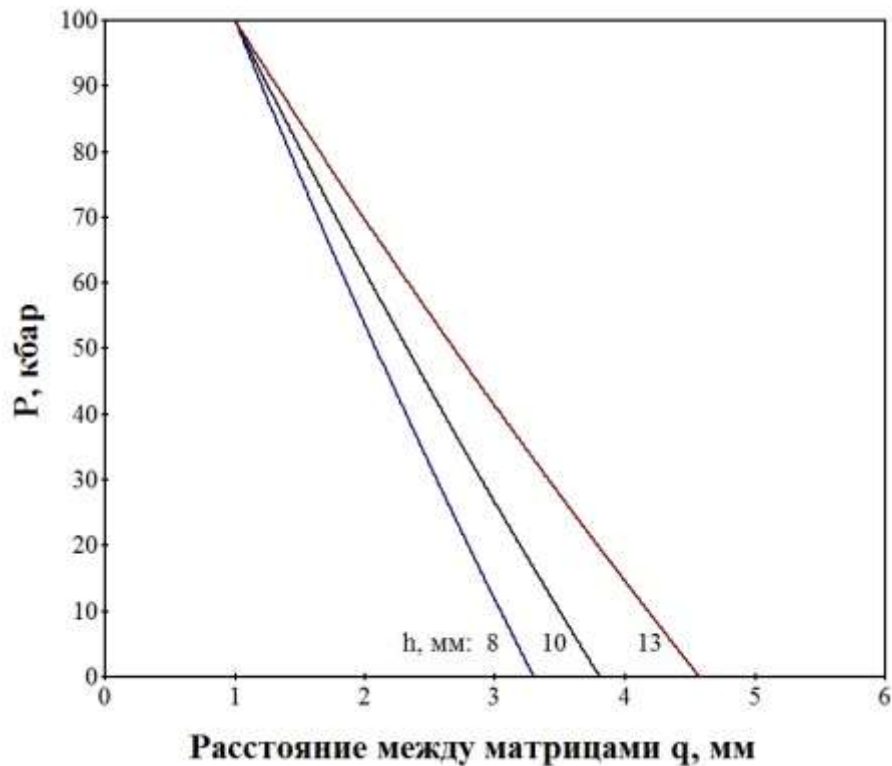


Рис. 2. Графики получаемого давления в камере в зависимости от расстояния между пуансонами при их сближении для различных высот центрального реакционного углубления в пуансонах  $h$ : 8, 10 и 13 мм.

Точки пересечения кривых с осью абсцисс на рис. 2 дают необходимые (минимальные) для сжимающего хода пуансонов значения начального расстояния между матрицами  $q_0$ . Для представленных примеров с высотами углублений в матрицах 8, 10 и 13 мм эти значения, соответственно, составляют ~ 3,3; 3,8 и 4,6 мм. Возникает вопрос, а какова должна быть минимальная ширина кольцевого слоя уплотнения, чтобы в процессе сжатия при требуемой начальной высоте слоя обеспечить удержание среды в центральном объеме камеры. Этот вопрос мы рассмотрим ниже.

Для оценки геометрических параметров запирающего кольцевого слоя уплотнения, формируемого плоскими выступами матриц вокруг центральных углублений в аппарате типа «Конак», рассмотрим задачу об экструзии материала контейнера сквозь кольцевую щель. Схема задачи представлена на рис. 3 (в цилиндрической системе координат  $\rho\theta z$ ).

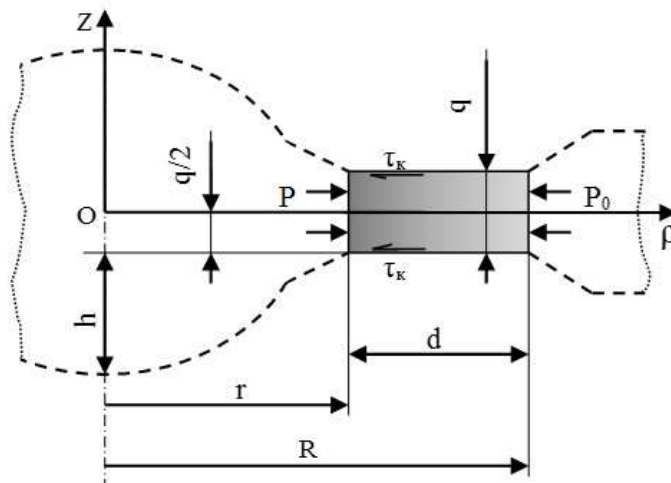


Рис. 3. Схема кольцевого слоя уплотнения в камере высокого давления типа «Конак», препятствующего истечению среды из центрального объема (в аксиальном разрезе). Штриховой линией обозначен профиль пуансона.

Слой материала прокладки высотой  $q$  и шириной  $d$  испытывает контактное трение с поверхностями пуансонов и находится под действием внутреннего и наружного давления, величиной  $P$  и  $P_0$ , соответственно. Задача состоит в определении предельного давления  $P$ , переводящего какое-либо горизонтальное сечение слоя полностью в пластическое состояние (начало экструзии). В задаче принимается, что пуансоны абсолютно жесткие и неподвижные (условие плоского деформированного состояния прокладки). Заметим, что такого типа задачи характерны для расчетов на прочность цилиндрических сосудов или определения удельных усилий для операций штамповки изделий в теории обработки металлов давлением [5]. И для решения подобных задач можно применять метод нижней оценки Хилла, который базируется на использовании уравнений пластичности и равновесия для напряжений в объекте с заданными граничными условиями [6]. В нашем случае в цилиндрической системе координат  $\rho\theta z$ , изображенной на рис. 3, такими исходными уравнениями будут:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)}{\rho} = 0 \quad (2)$$

– дифференциальное уравнение равновесия для компонент напряжений  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\tau_{\rho z}$ , действующих в радиальном направлении;

$$(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\rho z}^2 = 4\tau_s^2 \quad (3)$$

– энергетическое условие пластичности, где  $\tau_s$  – предел текучести материала на сдвиг;

$$\tau_s = k - \mu \sigma_0 \quad (4)$$

– условие упрочнения материала прокладки, где  $\sigma_0$  – среднее напряжение ( $\sigma_0 = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z}{3}$ ),  $k$  – предел текучести на сдвиг материала при  $\sigma_0 = 0$  и  $\mu$  – эмпирический коэффициент упрочнения;

$$\sigma_\rho(\rho=r) = -P, \quad \sigma_\rho(\rho=R) = -P_0, \quad (5)$$

$$\tau_{\rho z}(z=\pm \frac{q}{2}) = \mp \tau_k, \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (7)$$

– уравнения, описывающие граничные условия, где  $r$  и  $R$  – радиусы слоя,  $q/2$  – полувысота слоя,  $\varepsilon_z$  – деформация вдоль оси  $z$ .

Условие (7), отсутствие деформации в осевом направлении, вследствие применения обобщенного закона Гука для пластического состояния материала с коэффициентом Пуассона, равным  $1/2$ , дает дополнительное соотношение для напряжений в прокладке (уравнение связи):

$$\sigma_z = \frac{\sigma_\theta + \sigma_\rho}{2}. \quad (8)$$

Примем, что условие контактного трения материала прокладки с поверхностями пуансонов подчиняется закону Прандля-Зибеля, применимому при деформациях с достаточно выраженным всесторонним сжатием:

$$\tau_k = 2f\tau_s, \quad (9)$$

где  $f$  – фактор трения,  $0 \leq f \leq \frac{1}{2}$ . И в качестве приближения, справедливого для тонкого слоя, примем также линейную зависимость касательного напряжения  $\tau_{\rho z}$  от толщины прокладки:

$$\tau_{\rho z} = -2\tau_k \frac{z}{q}, \quad (10)$$

так что на поверхностях контакта материала с пунсонами удовлетворяется условие (6), а в плоскости симметрии,  $z = 0$ ,  $\tau_{\rho z} = 0$ .

Приведенные уравнения (2) – (10) статически определяют поставленную задачу. Для самосогласования граничных условий и условия пластичности следует принять, что  $P_0 \geq 2k$ . Уравнения позволяют в аналитической форме найти распределения напряжений в слое и на его границах.

После преобразований, выразив компоненты тензора напряжений через  $\sigma_\rho$ , дифференциальное уравнение равновесия (2) можно преобразовать к виду:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{2\mu}{1+\mu \sin \beta} \left( \frac{2f}{q} + \frac{\sin \beta}{\rho} \right) \left( \sigma_\rho - \frac{k}{\mu} \right) = 0, \quad (11)$$

где  $\sin \beta = \sqrt{1 - \left( \frac{4fz}{q} \right)^2}$ . В общей форме полученное уравнение (11) имеет вид:

$$y' + \left( a + \frac{b}{x} \right) y = 0, \text{ где } y = \sigma_\rho - \frac{k}{\mu}, x = \rho, a = \frac{4f\mu}{q(1+\mu \sin \beta)}, b = \frac{2\mu \sin \beta}{1+\mu \sin \beta}.$$

А его решением является функция:

$$y = C x^{-b} e^{-ax},$$

где  $C$  – постоянная интегрирования. После подстановки значений переменных с учетом граничного условия на наружной поверхности слоя (определения постоянной  $C$ ) мы можем получить следующую формулу для распределения радиальных напряжений в уплотнении:

$$\sigma_\rho = \frac{k}{\mu} - \left( P_0 + \frac{k}{\mu} \right) \left( \frac{R}{\rho} \right)^b e^{a(R-\rho)}.$$

Теперь, учитывая граничное условие на внутренней поверхности слоя, получим выражение для искомого предельного давления  $P$ , переводящего материал прокладки в произвольных ее сечениях в пластическое состояние:

$$P = -\frac{k}{\mu} + \left( P_0 + \frac{k}{\mu} \right) \left( 1 + \frac{d}{r} \right)^{\frac{2\mu \sin \beta}{1+\mu \sin \beta}} e^{\frac{4f\mu d}{(1+\mu \sin \beta)q}}, \quad (12)$$

здесь зависимость от  $z$  спрятана в выражении для  $\sin \beta$ . Поскольку наиболее отличительными в прокладке являются среднее ( $z = 0$ ) и приграничные сечения ( $z = \pm q/2$ ), выпишем для них величины предельного давления (12) в случае максимального трения прокладки с пунсонами ( $f = 0,5$ ) и упрочнения материала прокладки под давлением ( $\mu > 0$ ):

$$P_{(z=0, f=0,5)} = -\frac{k}{\mu} + \left( P_0 + \frac{k}{\mu} \right) \left( 1 + \frac{d}{r} \right)^{1+\mu} e^{\frac{2\mu d}{(1+\mu)q}}, \quad (13)$$

$$P_{(z=\pm\frac{q}{2}, f=0,5)} = -\frac{k}{\mu} + \left(P_0 + \frac{k}{\mu}\right) e^{\frac{2\mu d}{q}}. \quad (14)$$

При анализе выражений (13) и (14) обнаруживается тот факт, что при уменьшении толщины прокладки  $q$  сечение пластического состояния в прокладке меняется от приграничного к срединному, то есть, начиная с некоторой толщины прокладки более слабым становится сечение с  $z = 0$ . Высоту прокладки  $q_e$ , при которой рассматриваемые сечения становятся эквивалентными, можно получить, приравняв выражения (13) и (14) друг к другу. Вычисления показывают, что

$$q_e \approx \mu r.$$

В более общей форме, проводя рассмотрение смены пластических зон в прокладке для произвольного фактора трения и текущего радиуса, можно получить, что

$$q_e \approx 2f\mu r.$$

При  $q > q_e$  течение материала прокладки может происходить вдоль контактных поверхностей, а при  $q < q_e$  течение должно переходить в плоскость симметрии прокладки и мы должны оценивать предельное давление удержания материала в камере по формуле (13). Заметим, что в предельном случае задачи, когда  $r = \infty$ , выражение (13) всегда меньше выражения (14). То есть, пластическое состояние при выдавливании плоской полосы сквозь прямоугольную щель при увеличении давления с одной стороны должно достигаться в первую очередь в срединной плоскости. Для аппаратов высокого давления истечение прокладки в срединной плоскости предпочтительнее скольжения уплотнения вдоль границ, так как страхует камеру от резкого выброса материала прокладки, например, при разгрузке камеры. Можно конструктивно имитировать «условия плоской полосы», выполняя кольцевые наковальни вокруг центральных углублений в матрицах с приподнятым внешним краем.

Определим конкретные значения  $q_e$  для прокладки из блочного литографского камня и пирофиллита в аппарате типа «Конак» с диаметром реакционного углубления 48 мм ( $r = 24$  мм). По уточненным эмпирическим данным работы [7] значения коэффициента  $\mu$  для блочного литографского камня и пирофиллита можно принять равными, соответственно, 0,169 и 0,303. Тогда  $q_e \approx \mu r \approx 4$  мм для прокладки из литографского камня и  $q_e \approx 7$  мм для прокладки из пирофиллита. Полученные значения высоты удерживающего слоя прокладки достаточно велики.

На рис. 4 представлены примеры графиков зависимости давления удержания (13) от высоты рассматриваемого слоя уплотнения при различных значениях ширины этого слоя. При построении графиков мы принимали:  $k = 1,3$  кбар и  $\mu = 0,169$  (параметры, характерные для блочного литографского камня),  $P_0 = 10$  кбар,  $r = 24$  мм (значение внутреннего радиуса для камеры «Конак-48»).

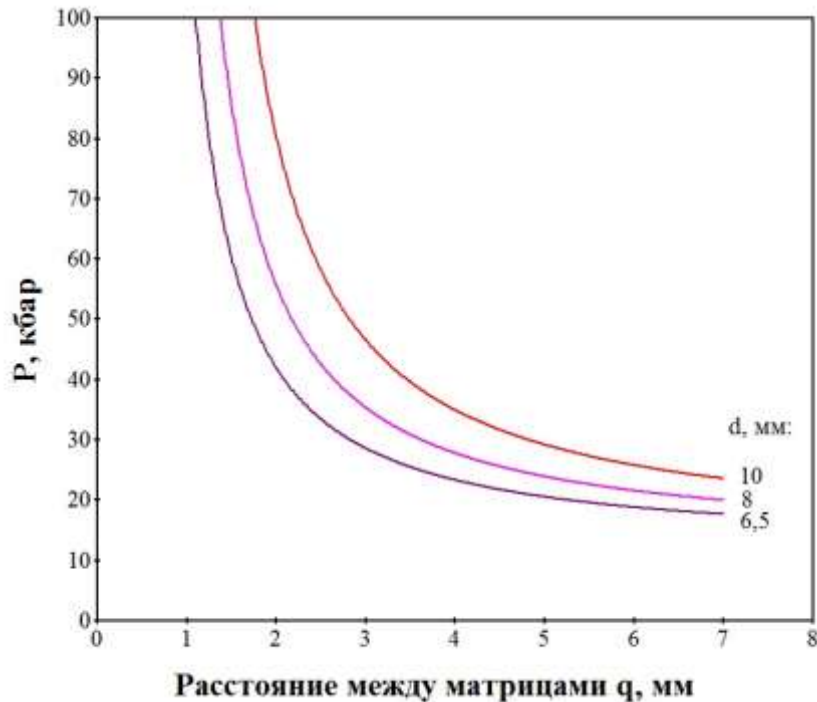


Рис. 4. Графики зависимости внутреннего давления в камере, которое удерживается кольцевым уплотнением (выполненного из блочного литографского камня), в зависимости от высоты слоя уплотнения при различных значениях ширины этого слоя  $d$ : 6,5; 8 и 10 мм.

Отметим, что экспоненциальный рост давления удержания с уменьшением  $q$  обусловлен отличными от нуля параметрами  $f$  и  $\mu$  в формуле (13), то есть наличием трения с поверхностью пуансонов и упрочнением материала прокладки под действием давления.

Если трение прокладки с поверхностью пуансонов отсутствует, то при подстановке  $f = 0$  в формулу (13) получим:

$$P_{(f=0)} = -\frac{k}{\mu} + \left(P_0 + \frac{k}{\mu}\right) \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2\mu}{1+\mu}}. \quad (15)$$

Здесь все сечения прокладки равнозначны и распределения напряжений в прокладке будут носить степенной характер.

Если в задаче отсутствуют трение и упрочнение,  $f = 0$  и  $\mu = 0$ , то, используя равенство

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{a^x - 1}{x} = \ln a,$$

из выражения (15) при  $\mu \rightarrow 0$  можно получить:

$$P_{(f=0, \mu=0)} = P_0 + 2k \ln \frac{R}{r}.$$

Это, по существу, известная формула для внутреннего давления, переводящего «толстостенную трубу» при плоской деформации в пластическое состояние. Таким образом, с помощью частного случая мы подтвердили справедливость общего решения поставленной задачи.

Сопоставим процессы сжатия среды в реакционном объеме камеры, рис. 2, с процессами увеличения несущей способности кольцевого запорного слоя, рис. 4, изобразив графики сжатия и удержания на одном рисунке, рис. 5. Можно заметить, что выбор ширины слоя  $d$ , достаточной для удержания генерируемого давления в камере, зависит от высоты реакционного углубления  $h$ . В аппаратах высокого давления типа «Конак» для оптимизации условий сжатия среды в реакционном объеме и повышения эффективности работы

камеры ширину кольцевых выступов вокруг углублений в матрицах выбирают в интервале  $0,5h \leq d \leq 1,5h$ , а еще предпочтительней – в интервале  $0,7h \leq d \leq 0,9h$ .

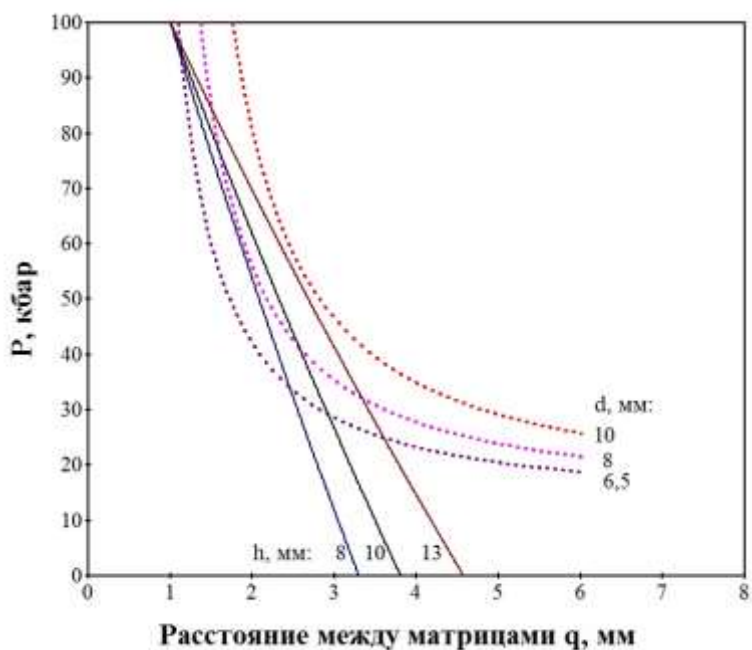


Рис. 5. Совместные графики сжатия среды в реакционном объеме камеры и предельного давления удержания среды с помощью кольцевого запорного слоя.

Для камер большого объема необязательным является полное предотвращение истечения материала из ее центральной части. На рис. 6 представлен вариант процесса получения давления в камере с частичным истечением среды сквозь кольцевую щель.

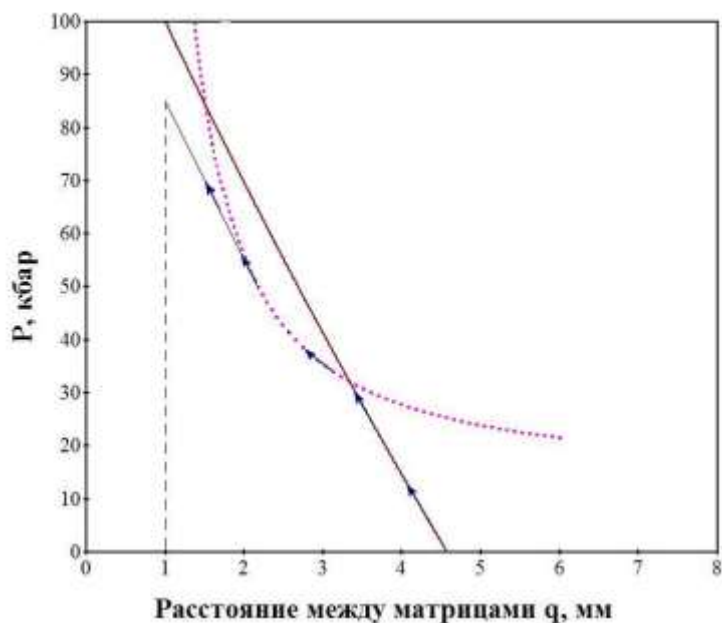


Рис. 6. Схема подъема давления в камере с частичным истечением среды из ее центрального объема.

Процесс подъема давления на рис. 6 обозначен стрелками. На начальном этапе подъем осуществляется по кривой сжатия, затем переходит на кривую удержания, а далее может продолжаться, переходя по касательной на новую кривую сжатия. При этом на конечном этапе камера надежно запирается. Существует еще ряд способов повышения надежности работы аппаратов высокого давления с профилированными наковальнями, выявленных на практике.



Мы провели рассмотрение процессов сжатия среды в реакционном объеме камеры и ее удержания путем формирования слоя уплотнения между плоскими выступами, выполненных вокруг центральных углублений в пуансонах. Это рассмотрение касалось принципов работы аппаратов высокого давления типа «Конак». Заметим, что частным случаем аппарата типа «Конак» является аппарат Бриджмена с плоскими наковальнями (когда высота центрального углубления в пуансонах равна нулю). Таким образом, представленное рассмотрение упругопластической деформации контейнера применимо и к анализу поведения прокладки в плоских наковальнях, к анализу формирования в ней центральной зоны упругой деформации, зоны удержания прокладки с экспоненциальным падением давления в ней и внешней зоны течения прокладки на различных стадиях нагружения камеры.

#### Список литературы

1. Н.А. Николаев. Анализ конструкционных принципов аппаратов высокого давления с профилированными наковальнями. Научный журнал «Globus: Технические науки». Выпуск 5 (29), с. 28-31, 2019.
2. P.W. Bridgman, Proc. Amer. Acad. Arts Sci., 76, 55-87 (1948).
3. Н.А. Николаев, М.Д. Шалимов, «Устройство для создания сверхвысокого давления и температуры». Патент РФ № 1332598 (от 2 февраля 1993 г.).
4. Н.А. Николаев. «Устройство для создания сверхвысокого давления и температуры». Патент РФ № 2571742 (от 25 ноября 2015 г.).
5. М.В. Сторожев, Е.А. Попов, Теория обработки металлов давлением. М., «Машиностроение», 1977.
6. Р. Хилл, Математическая теория пластичности. М., ГИФМЛ, 1956.
7. В.И. Левитас, Большие упругопластические деформации материалов при высоком давлении. Киев, «Наукова думка», 1987.

#### References

1. N. A. Nikolaev. Analysis of the structural principles of high-pressure apparatuses with profiled anvils. Scientific journal "Globus: Engineering Sciences". Issue 5 (29), Pp. 28-31, 2019.
2. P.W. Bridgman, Proc. Amer. Acad. Arts Sci., 76, 55-87 (1948).
3. N. A. Nikolaev, M.D. Shalimov, "A device for creating ultrahigh pressure and temperature." RF patent No. 1332598 (dated February 2, 1993).
4. N. A. Nikolaev. "Device for creating ultra-high pressure and temperature". RF patent No. 2571742 (November 25, 2015).
5. M.V. Storozhev, Ye.A. Popov, Teoriya obrabotki metallov davleniyem. M., «Mashinostroyeniye», 1977.
6. R. Hill, Matematicheskaya teoriya plastichnosti. M., GIFML, 1956.
7. V.I. Levitas, Bol'shiye uprugoplasticheskiye deformatsii materialov pri vysokom davlenii. Kiyev, «Naukova dumka», 1987.