



УДК 62-822

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов

ООО «Уральский инжиниринговый центр»

г. Челябинск, Россия

E-mail: goido@cheltec.ru

Дата поступления 09.11.2022

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАБОТЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

### Аннотация

Рассмотрен способ сохранения части потенциальной энергии упругих деформаций, накопленной к концу рабочего хода пресса в его металлоконструкциях и в рабочей жидкости, путем соединения полостей рабочих гидроцилиндров с жидкостной полостью пневмогидравлического аккумулятора. С использованием безразмерных параметров определены условия, при выполнении которых обеспечивается максимальное приращение энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе после соединения его жидкостной полости с полостями рабочих гидроцилиндров подвижной траверсы пресса по окончании рабочего хода.

**Ключевые слова:** гидравлический пресс; пневмогидравлический аккумулятор; сохранение энергии упругих деформаций.

### Введение

Во время рабочего хода подвижной траверсы гидравлического пресса из-за упругих деформаций нагружаемых металлоконструкций пресса и сжимаемости рабочей жидкости в рабочих гидроцилиндрах и трубопроводах, в указанных компонентах пресса накапливается значительная потенциальная энергия  $\mathcal{E}_1$  [1, 2]. Существуют различные предложения по сохранению энергии  $\mathcal{E}_1$  и ее использованию для выполнения полезной работы и тем самым снижения потерь энергии при работе пресса: применением маховика [2], путем специфического исполнения пресса [3], посредством гидропреобразователя, работающего как мультипликатор давления с автоматически изменяемым коэффициентом преобразования [4], с помощью пневмогидравлического аккумулятора [5]. С точки зрения простоты реализации и минимизации материальных затрат наиболее рациональным представляется техническое решение, основанное на применении пневмогидравлического аккумулятора.

Энергия, сохраненная путем соединения полостей рабочих гидроцилиндров по

окончании рабочего хода пресса с жидкостной полостью пневмогидравлического аккумулятора, в последующем может использоваться для повышения давления в соответствующих гидроцилиндрах на начальном этапе, например, рабочего хода подвижной траверсы пресса и выполнения таких вспомогательных операций как перемещение стола, выталкивателя или прошивня (при наличии упомянутых устройств в составе пресса). Эта энергия может также использоваться для управления клапанами наполнения, гидрораспределителями с электрогидравлическим управлением, регулируемые насосами с пропорциональным электрическим управлением и другими устройствами с гидроуправлением, входящими в состав гидросистемы пресса.

Однако на текущий момент отсутствуют какие-либо рекомендации относительно выбора параметров пневмогидравлического аккумулятора (его номинальной вместимости, давления зарядки газом, давления в аккумуляторе в момент соединения его жидкостной полости с полостями рабочих гидроцилиндров пресса) для рассматриваемого случая его применения. Данная статья в определенной степени должна восполнить указанный пробел.

**Целью настоящей работы** является определение условий, при выполнении которых, обеспечивается максимальное приращение энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе после соединения его жидкостной полости с полостями рабочих гидроцилиндров подвижной траверсы прессы по окончании рабочего хода.

### Основная часть

При изменении давления в полостях рабочих гидроцилиндров на величину  $\Delta p_{гц}$  объем  $\Delta V_{упр}$  рабочей жидкости, необходимой для компенсации упругих деформаций соответствующих металлоконструкций прессы и сжимаемости жидкости, содержащейся в полостях указанных гидроцилиндров и примыкающих к ним гидролиниях, в первом приближении составляет:

$$\Delta V_{упр} = k_{упр.пр} \Delta p_{гц}, \quad (1)$$

где  $k_{упр.пр}$  — приведенный коэффициент упругости, учитывающий сжимаемость рабочей жидкости, содержащейся в полостях рабочих гидроцилиндров и примыкающих к ним гидролиниях, а также упругие деформации металлоконструкций прессы, связанные с изменениями давления в полостях рабочих гидроцилиндров.

При проведении последующих математических выкладок будем считать:

коэффициент  $k_{упр.пр}$  постоянной величиной;

процесс изменения давления газа в пневмогидравлическом аккумуляторе политропным с постоянным показателем политропы  $n$ ;

в один и тот же момент времени значения давления в жидкостной и газовой полостях пневмогидравлического аккумулятора одинаковыми;

все значения давления, измеренными по абсолютной шкале.

После соединения полостей рабочих гидроцилиндров прессы при давлении в них, равном  $p_{раб}$ , и жидкостной полости пневмогидравлического аккумулятора при давлении в ней, равном  $p_{нач}$  ( $p_{нач} < p_{раб}$ ), и окончания переходного процесса, связанного с их соединением, давление жидкости

в этих полостях выравнивается и приобретает значение  $p_{кон}$ , которое может быть найдено из следующего уравнения:

$$k_{упр.пр} (p_{раб} - p_{кон}) = V_{а.ном} p_{зар}^{\frac{1}{n}} \left( p_{нач}^{\frac{1}{n}} - p_{кон}^{\frac{1}{n}} \right), \quad (2)$$

где  $V_{а.ном}$  — номинальная вместимость пневмогидравлического аккумулятора;  $p_{зар}$  — давление зарядки пневмогидравлического аккумулятора газом.

Физически давление  $p_{нач}$  не может быть меньше значения  $p_{зар}$ , то есть  $p_{нач} \geq p_{зар}$ . Таким образом, с учетом обоих приведенных выше неравенств:

$$p_{зар} \leq p_{нач} < p_{раб}. \quad (3)$$

Энергия  $\Delta \mathcal{E}_{а.п}$ , накапливаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе при политропном процессе изменения давления газа в нем от значения  $p_{нач}$  до значения  $p_{кон}$ , определяется с помощью выражения [6]:

$$\Delta \mathcal{E}_{а.п} = V_{а.ном} p_{зар}^{\frac{1}{n}} (p_{кон}^{1-\frac{1}{n}} - p_{нач}^{1-\frac{1}{n}}) / (n-1). \quad (4)$$

При переходе к безразмерным параметрам:

$$B = V_{а.ном} / (k_{упр.пр} p_{раб});$$

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п} = \Delta \mathcal{E}_{а.п} / (p_{раб} V_{а.ном});$$

$$\bar{p}_{зар} = p_{зар} / p_{раб};$$

$$\bar{p}_{нач} = p_{нач} / p_{раб};$$

$$\bar{p}_{кон} = p_{кон} / p_{раб};$$

система уравнений (2), (4) приобретает вид:

$$B \bar{p}_{зар}^{\frac{1}{n}} (\bar{p}_{нач}^{-\frac{1}{n}} - \bar{p}_{кон}^{-\frac{1}{n}}) + \bar{p}_{кон} - 1 = 0, \quad (5)$$

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п} = \bar{p}_{зар}^{\frac{1}{n}} (\bar{p}_{кон}^{1-\frac{1}{n}} - \bar{p}_{нач}^{1-\frac{1}{n}}) / (n-1). \quad (6)$$

В соответствии с уравнением (6) имеем:

$$\bar{p}_{кон} = \left[ (n-1) \bar{p}_{зар}^{\frac{1}{n}} \Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п} + \bar{p}_{нач}^{1-\frac{1}{n}} \right]^{n/(n-1)}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) уравнение (5) представляет собой уравнение относительно величины  $\Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п}$  при фиксированных безразмерных параметрах  $B$ ,  $\bar{p}_{зар}$ ,  $\bar{p}_{нач}$  и  $n$ .

Размерное значение приращения энергии  $\Delta\mathcal{E}_{a.p}$  связано с безразмерными величинами  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p}$  и  $B$  следующим образом:

$$\Delta\mathcal{E}_{a.p} = \Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p} B k_{упр.пр} p_{раб}^2 = 2\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p} B \mathcal{E}_{упр}, \quad (8)$$

где  $\mathcal{E}_{упр} = k_{упр.пр} p_{раб}^2 / 2$  — потенциальная энергия упругих деформаций напряженных металлоконструкций прессы, находящихся под высоким давлением жидкости и стенок каналов, в которые она заключена.

В соответствии с выражением (8) при прочих равных условиях значение  $\Delta\mathcal{E}_{a.p}$  тем больше, чем больше произведение  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p} B$ . Очевидно, что при фиксированных значениях  $B$ ,  $k_{упр.пр}$  и  $p_{раб}$  значение  $\Delta\mathcal{E}_{a.p}$  тем больше, чем больше  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p}$ . Поэтому, с использованием уравнения (5), с учетом выражения (7) и неравенства (3) численными методами решалась задача определения значения  $\bar{p}_{нач.э}$ , которому при фиксированных значениях  $B$ ,  $\bar{p}_{зар}$  и  $n$  соответствует максимальное значение  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э}$ .

Расчеты проводились при варьировании параметров  $B$ ,  $\bar{p}_{зар}$  и  $n$  в следующих диапазонах, представляющих интерес с практической точки зрения:  $B \in [0, 25; 5]$ ,  $\bar{p}_{зар} \in [0, 1; 0, 55]$ ,  $n \in [1, 1; 1, 4]$ .

Согласно полученным результатам при прочих равных условиях произведение  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$  увеличивается с увеличением безразмерного параметра  $B$  (рисунок 1) и, соответственно, с увеличением номинальной вместимости  $V_{a.ном}$  пневмогидравлического аккумулятора  $[B = V_{a.ном} / (k_{упр.пр} p_{раб})]$ .

На графике зависимости  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$  от  $B$  (см. рисунок 1) можно выделить два характерных участка. На первом участке, который соответствует значениям параметра  $B$ , меньшим некоторого граничного значения  $B_{гр}$ , незначительные изменения параметра  $B$  в сторону его увеличения приводят к ощутимому увеличению произведения  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$ . На втором участке, соответ-

ствующим значениям параметра  $B$ , большим величины  $B_{гр}$ , увеличение параметра  $B$  сопровождается незначительным увеличением произведения  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$ . Другими словами, упомянутым участкам зависимости  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$  от  $B$  соответствуют существенно отличающиеся в среднем по абсолютной величине значения производной  $\partial(\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B) / \partial B$ . В силу отмеченного обстоятельства увеличение параметра  $B$  сверх значения  $B_{гр}$  является малоэффективным с точки зрения увеличения сохраняемой энергии  $\Delta\mathcal{E}_{a.p}$  поскольку влечет за собой при прочих равных условиях необходимость более существенного увеличения номинальной вместимости  $V_{a.ном}$  пневмогидравлического аккумулятора.

Зависимость произведения  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$  от безразмерного давления зарядки  $\bar{p}_{зар}$  имеет экстремум (максимум), который становится менее ярко выраженным с увеличением безразмерного параметра  $B$  (рисунок 2). При этом, чем больше значение параметра  $B$ , тем больше максимальное значение функции  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$  от  $\bar{p}_{зар}$  и тем больше значение  $\bar{p}_{зар}$ , при котором экстремум данной функции при прочих равных условиях имеет место (см. рисунок 2).

При прочих равных условиях меньшим значениям  $n$  соответствуют повышенные значения произведения  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$  (рисунок 3). В целом же значение показателя политропы  $n$  в диапазоне его изменения от 1,1 до 1,4 оказывает незначительное влияние на произведение  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.p.э} B$ , особенно при  $B \geq 2$  (см. рисунок 3).

При фиксированном значении безразмерного параметра  $B$  при некотором граничном значении  $\bar{p}_{зар.гр}$  безразмерного давления зарядки  $\bar{p}_{зар}$  значение безразмерного давления  $\bar{p}_{нач.э}$  оказывается равным  $\bar{p}_{зар}$ . При значениях  $\bar{p}_{зар} > \bar{p}_{зар.гр}$  без учета неравенства (3) решение рассматриваемой задачи оптимизации приводит к значениям  $\bar{p}_{нач.э} < \bar{p}_{зар}$ , что физически невозможно.

В связи с этим при  $\bar{p}_{зар} > \bar{p}_{зар.гр}$  с учетом неравенства (3) принималось:  $\bar{p}_{нач.э} = \bar{p}_{зар}$ . Следует отметить, что чем больше значение  $\bar{p}_{зар}$ , тем при большем значении безразмерного параметра  $B$  значение  $\bar{p}_{нач.э}$  становится больше  $\bar{p}_{зар}$  (см. рисунки 1, 2).

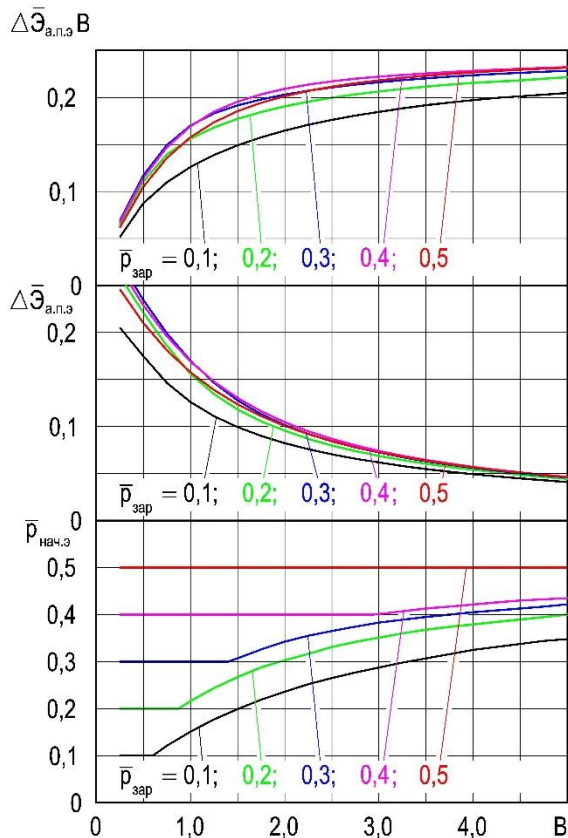


Рисунок 1. Графики зависимости  $\bar{p}_{нач.э}$ ,  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}$  и  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}B$  от безразмерного параметра  $B$  при  $n=1,3$  и ряде значений безразмерного давления  $\bar{p}_{зар}$

При  $\bar{p}_{нач.э} = \bar{p}_{зар}$  выражение (7) для  $\bar{p}_{кон}$  приобретает вид:

$$\bar{p}_{кон} = \bar{p}_{зар}^{-1/(n-1)} \left[ (n-1)\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э} + \bar{p}_{зар} \right]^{n/(n-1)}. \quad (8)$$

В результате подстановки выражения (8) в уравнение (5) получаем:

$$B \left\{ 1 - \bar{p}_{зар}^{-1/(n-1)} \left[ (n-1)\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э} + \bar{p}_{зар} \right]^{-1/(n-1)} \right\} + \bar{p}_{зар}^{-1/(n-1)} \left[ (n-1)\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э} + \bar{p}_{зар} \right]^{n/(n-1)} - 1 = 0, \quad (9)$$

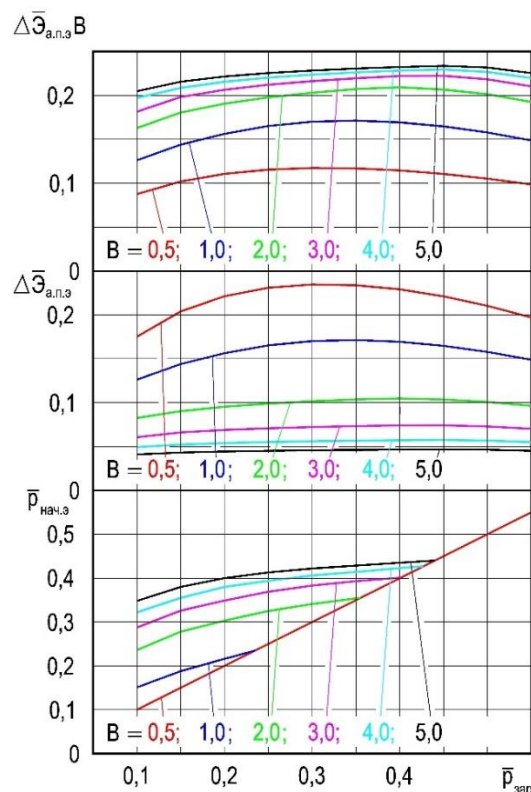


Рисунок 2. Графики зависимости  $\bar{p}_{нач.э}$ ,  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}$  и  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}B$  от безразмерного давления  $\bar{p}_{зар}$  при  $n=1,3$  и ряде значений безразмерного параметра  $B$

В рассматриваемом случае значение  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}$  определяется просто как решение уравнения (9).

В соответствии с полученными результатами в первом приближении можно считать:  $B_{гр} \approx 2,0$ . При  $B=2,0$  и  $n=1,3$  максимальное значение  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}B$  имеет место при условии, что  $\bar{p}_{зар} = 0,4$  и  $\bar{p}_{нач.э} = \bar{p}_{зар} = 0,4$ , и составляет  $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{а.п.э}B = 0,209$  (см. рис. 1, 2), а  $\bar{p}_{кон} = 0,555$ .

Поскольку при разгрузке рабочих полостей рабочих гидроцилиндров пресса от давления желательно сохранить как можно больше энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе для ее последующего использования, то расходовать жидкость из аккумулятора следует вплоть до понижения давления в аккумуляторе до значения  $P_{нач.э} = \bar{p}_{нач.э}P_{раб}$ .

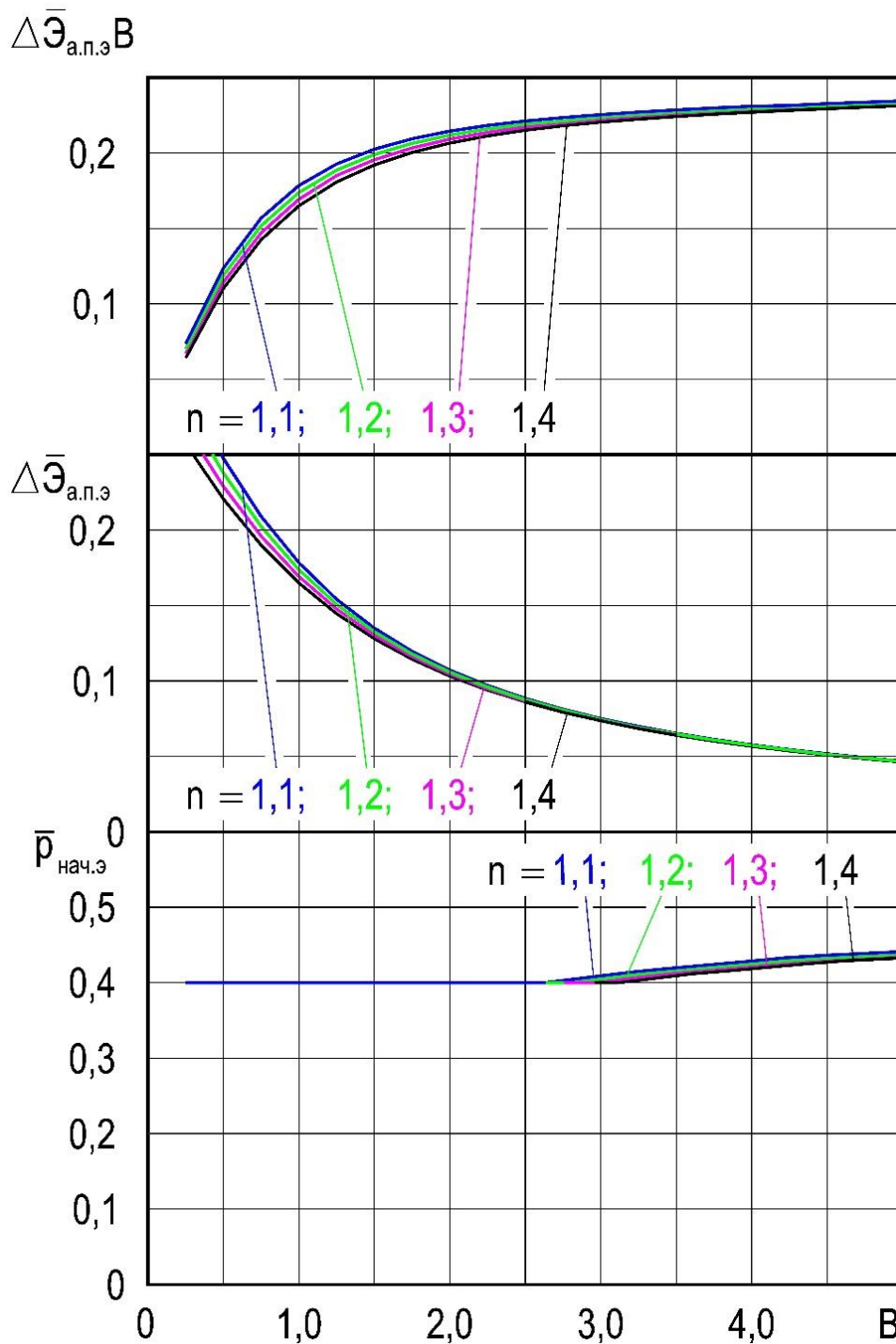


Рисунок 3. Графики зависимости  $\bar{p}_{нач.\varepsilon}$ ,  $\Delta \bar{\mathcal{E}}_{a.p.\varepsilon}$  и  $\Delta \bar{\mathcal{E}}_{a.p.\varepsilon} B$  от безразмерного параметра  $B$  при  $\bar{p}_{зар} = 0,4$  и ряде значений показателя политропы  $n$

Следует отметить, что при использовании энергии, сохраненной в пневмогидравлическом аккумуляторе, для управления клапанами наполнения, гидрораспределителями с электрогидравлическим управлением, регулируемые насосы с пропорциональным электрическим управлением и другими устройствами с гидроуправлением, входящими в состав гидросистемы

пресса, значение давления  $p_{нач.\varepsilon} = \bar{p}_{нач.\varepsilon} p_{раб}$  должно быть достаточным для решения задач управления и, соответственно, значение  $\bar{p}_{зар}$  должно выбираться с учетом требования к минимально допустимому значению давления  $p_{нач.доп}$ , необходимому для указанного управления.

## Заклучение

В соответствии с вышеизложенным при выборе параметров пневмогидравлического аккумулятора, используемого для сохранения энергии упругих деформаций, накопленной в металлоконструкциях и рабочей жидкости к концу рабочего хода пресса, можно рекомендовать следующие значения безразмерных параметров:

$$B = V_{a.ном} / k_{упр.пр} p_{раб} = 2, 0;$$

$$\bar{p}_{зар} = p_{зар} / p_{раб} = 0, 4.$$

Рекомендуемое значение  $\bar{p}_{зар}$  должно быть увеличено, если существует ограничение на минимально допустимое значение  $p_{нач}$  и при  $\bar{p}_{зар} = 0, 4$  это ограничение не выполняется, то есть  $p_{нач.э}$  ( $p_{нач.э} = \bar{p}_{нач.э} p_{раб}$ ) получилось меньше  $p_{нач.доп}$ .

Поскольку при разгрузке полостей рабочих гидроцилиндров пресса от давления желательно сохранить как можно больше энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе для ее последующего использования, то расходовать жидкость из аккумулятора следует вплоть до понижения давления в аккумуляторе до значения  $p_{нач.э} = \bar{p}_{нач.э} p_{раб}$ .

## Библиографический список

1. Добринский Н.С. Гидравлический привод прессов. М.: Машиностроение, 1975. 222 с.
2. Гидравлические прессы. Некоторые конструкции и расчеты / Под ред. Б.П. Васильева. М.: Машиностроение, 1966. 436 с.
3. А. с. 461778 СССР. МПК В21J9/12. Гидравлический пресс / Л.Л. Роганов. № 1793097/25-27; заявл. 02.06.1972; опубл. 28.02.1975.
4. Пат. 2515779 Российская Федерация. МПК В30В15/24 В30В1/34. Гидравлический привод подвижной траверсы пресса / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов; заявитель и патентообладатель В.В. Бодров. № 2013106309/02; заявл. 13.02.2013; опубл. 20.05.2014.
5. Пат. 2078640 Российская Федерация. МПК В21J9/12 В30В15/16. Гидравлический привод пресса / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов; заявитель и патентообладатель Челябинский государственный технический университет. № 95113523/02; заявл. 08.08.1995; опубл. 10.05.1997.
6. Гойдо М.Е. Проектирование объемных гидроприводов (Б-ка конструктора). М.: Машиностроение, 2009. 304 с.

---

### Information about the paper in English

**M.E. Goido, V.V. Bodrov, R.M. Bagautdinov**  
LLC Ural Engineering Center, Chelyabinsk, Russia  
E-mail: goido@cheltec.ru  
Receipt date: November 09, 2022

### USING A HYDROPNEUMATIC ACCUMULATOR TO SAVE ELASTIC STRAIN ENERGY IN THE OPERATION OF HYDRAULIC PRESSES

#### Abstract

The paper describes a method of saving a share of potential elastic strain energy accumulated by the end of working strokes of the press in its steel structures and actuation fluid by connecting chambers of operating hydraulic cylinders with a fluid chamber of a hydropneumatic accumulator. By using non-dimensional parameters, the authors have identified conditions of ensuring maximum energy gain in the hydropneumatic accumulator, when its fluid chamber is connected with chambers of operating hydraulic cylinders of a press frame cross-head upon completion of working strokes.

**Keywords:** hydraulic press, hydropneumatic accumulator, saving elastic strain energy.

---