

УДК 621.05

Атаманов Ю.Л., Крутиков Г.А., Стрижак М.Г.

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНЫХ ПНЕВМОАГРЕГАТОВ СО ВСТРОЕННЫМ РЕЗЕРВУАРОМ

**Введение.** Ударный эффект в пневмоагрегатах (ПА) со встроенным резервуаром создаётся за счёт практически ступенчатого наращивания значительного усилия на поршне при разгерметизации поршня-клапана с седлом (рис. 1). Быстрому наращиванию скорости поршня способствует невысокое противодействие в выхлопной полости в начале движения поршня. Однако, быстрое увеличение скорости приводит также и к быстрому увеличению давления в выхлопной полости и падению давления в рабочей полости, что вызывает режим автоторможения и появление развитого колебательного процесса [1].

**Цель работы.** Ввиду колебательного характера движения поршня координата расположения заготовки, при которой достигается максимальная скорость удара, строго обусловлена конструктивными и настроечными параметрами ПА [2].

При этом необходимо учитывать эффективность использования работоспособности сжатого воздуха, т.е. степень энергетического совершенства ПА.

Для оценки степени энергетического совершенства проектируемого ПА необходимо выработать критерий такой оценки и провести качественный и количественный анализ потерь энергии сжатого воздуха при срабатывании ударного ПА с целью определения соотношения параметров ПА, обеспечивающих минимум этих потерь.

**Основное содержание.** Для обобщения результатов исследований и минимизации независимых параметров, влияющих на внутренние переходные процессы, запишем математическую модель ПА со встроенным резервуаром в безразмерной форме. При этом накопительная ёмкость и неиспользуемый объём выхлопной полости (ввиду того, что координата нанесения удара  $x^* < L$ ) интерпретируются как начальные ("паразитные") объёмы полостей пневмоцилиндра (ПЦ).

При решении поставленной задачи можно ограничиться рассмотрением только двух фаз срабатывания ПА (накопления воздуха в ёмкости и движения поршня до момента удара). Учитывая временную задержку в срабатывании распределителя по каналу пневмоуправления  $0,03 \div 0,06$  с в математической модели можно не учитывать возможность перемены знака расхода и переходов от процессов опорожнения к процессам заполнения в полостях ПА и наоборот, т.е. рассматривать упрощённый вариант математической модели.

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k}{\lambda_{01} + \lambda} [\varphi(\sigma_1) - \sigma_1 \nu]; \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} = \frac{-k}{1 + \lambda_{02} - \lambda} \left[ \frac{\Omega \sigma_2^{2k}}{\Pi_{21}} \varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right) - \sigma_2 \nu \right]; \\ \beta \frac{d\nu}{d\tau} = \sigma_1 - \Pi_{21} \sigma_2 - \chi. \end{cases} \quad (1)$$

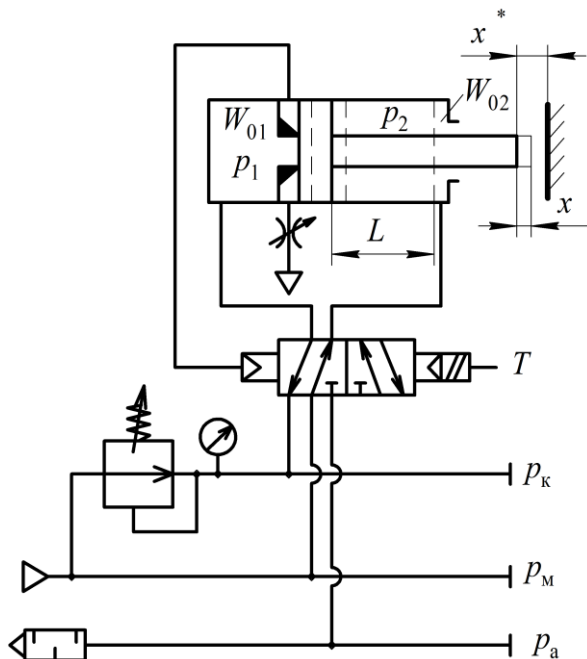


Рисунок 1 – Схема ударного пневмоагрегата с синхронным управлением контура питания

Условие отрыва поршня от седла в безразмерной форме имеет вид:

$$\Pi_{21} \sigma_2^* + \chi = \sigma_1^* \varphi + (1 - \varphi) \sigma_a, \quad (2)$$

где  $\sigma_1 = \frac{P_1}{P_M}$ ;  $\sigma_2 = \frac{P_2}{P_M}$ ;  $\sigma_a = \frac{P_a}{P_M}$  – безразмерные давления;  $\lambda = \frac{x}{L}$ ,  $\nu = \frac{v}{L} t_6$  – безразмерные координата и скорость поршня;  $\tau = \frac{t}{t_6}$  – безразмерное время;

$t_6 = \frac{F_1 L}{f_1^3 \sqrt{k R T_M}}$  – базовая единица времени;  $f_1^3$  – эффективная площадь впускного тракта;  $\sqrt{k R T_M}$  – скорость звука;  $\varphi(\sigma)$  – расходная функция;  $\chi = P_{тр} / F_1 P_M$  – параметр нагрузки;  $\sigma_1^*$ ,  $\sigma_2^*$  – безразмерные значения давлений, при которых происходит разгерметизация;  $\Pi_{21} = F_2 / F_1$ ;  $\varphi(\sigma)$  – расходная функция [2].

Критериями динамического подобия являются  $\lambda_{01} = W_{01}/F_1 L$  – безразмерный объём встроенного резервуара;  $\varphi = F_c/F_1$  – безразмерная площадь сопла;  $\Omega = f_2^3/f_1^3$  – отношение эффективных площадей выпускного и впускного трактов;  $\beta = \frac{mL}{t_0^2 F p_m}$  – критерий инерционности (безразмерная масса).

Введём некоторые допущения. Первое допущение связано с тем, что после отрыва поршня от седла он быстро набирает большую скорость, вследствие чего массовый расход, обусловленный движением поршня, на порядок превосходит расход, поступающий в накопительную полость и уходящий из выхлопной полости [4].

Поэтому при работе ПА в этой фазе допустимо считать как рабочую, так и выхлопную полости замкнутыми.

Интегрирование первых двух уравнений в этом случае приводит к уравнениям адиабатических процессов расширения и сжатия воздуха соответственно в рабочей и выхлопной полостях

$$\sigma_1 (\lambda_{01} + \lambda)^k \cong \lambda_{01}^k; \quad \sigma_2 (1 + \lambda_{02} - \lambda)^k \cong \frac{1}{\Pi_{21}} [\varphi + \sigma_a (1 - \varphi)] (1 + \lambda_{02})^k. \quad (3)$$

Начальные значения безразмерных давлений в правых частях уравнений (3) соответственно равны  $\sigma_{1н} = 1$  и, в соответствии с (2),  $\sigma_{2н} = \frac{\varphi}{\Pi_{21}} + \frac{\sigma_a}{\Pi_{21}} (1 - \varphi)$ .

Следовательно, главные составляющие работы расширения и сжатия могут быть определены как

$$\Pi_p = \int_0^{\lambda^*} \sigma_1 d\lambda = \frac{\lambda_{01}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda} \right)^{k-1} \right]; \quad (4)$$

$$\Pi_c = \int_0^{\lambda^*} \sigma_2 d\lambda = \frac{1}{\Pi_{21}} [\varphi + \sigma_a (1 - \varphi)] \left( \frac{1 + \lambda_{02}}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{\lambda_{02} + 1}{\lambda_{02} + 1 - \lambda^*} \right)^{k-1} - 1 \right], \quad (5)$$

где  $\Pi_p$  – потенциальная энергия расширения воздуха в рабочей полости ПА в безразмерной форме;  $\Pi_c$  – потенциальная энергия сжатия воздуха в выхлопной полости ПА в безразмерной форме, причём, в первом и втором случае используется базовое значение работы  $A_0 = F_1 p_m L$ .

Максимально полезную работу, которую может совершить сжатый воздух, находящийся в накопительной ёмкости, определим, используя понятие удельной работоспособности сжатого воздуха (эксергии) [3].

Из теории компрессорных машин известно, что сообщенная единице массы газа работа  $l$  может быть определена как:

$$l = c_p (T_k - T_a) - q = c_p (T_k - T_a) + \int_{S_a}^{S_k} T ds, \quad (6)$$

где  $c_p$  – теплоёмкость при изобарическом процессе;  $T_a$ ,  $S_a$ ,  $T_k$ ,  $S_k$  – температура и энтропия в начале и конце процесса сжатия воздуха в компрессоре.

Согласно одному из свойств  $T-S$  диаграммы (рис. 2) изменение теплосодержания газа  $c_p(T_k - T_a)$  эквивалентно площади фигуры, расположенной под отрезком изобары  $p_k = \text{const}$  в интервале температур  $T_k - T_a$ :  $c_p(T_k - T_a) \sim S_{233'12}$ . Отведенное тепло  $q$  эквивалентно площади под политропой 3-5 в интервале температур  $T_k - T_a$ :  $q \sim S_{3563'}$ . Таким образом, удельная работа сжатия в  $T-S$  координатах определяется площадью  $S_{123561} = S_{723587}$ .

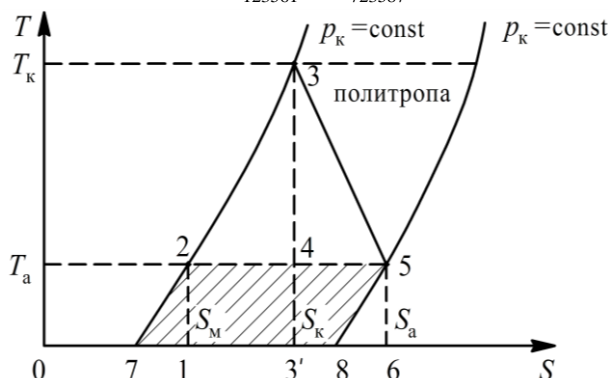


Рисунок 2 – Процесс сжатия воздуха в компрессоре в  $T-S$  координатах

Удельная работоспособность потока газа  $l_p$ , т.е. та часть удельной работы сжатия в компрессоре, которая в дальнейшем может быть использована для производства внешней механической работы, определим исходя из того, что в холодильнике компрессора и ресивере поток сжатого воздуха приходит в термическое равновесие с окружающей средой. После изобарного охлаждения потока сжатого воздуха его удельная работоспособность будет определяться площадью 1-2-5-6-1 или 7-2-5-8-7 (рис. 2)

$$l_p = T_a(S_a - S_M) = c_p T_M \ln \left[ \frac{T_a}{T_M} \left( \frac{p_M}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (7)$$

где  $T_M$  – температура сжатого воздуха в питающей магистрали.

Ввиду того, что после охлаждения  $T_M = T_a$  и, кроме того, энтальпия воздуха

$$i = c_p T_M = \frac{k}{k-1} RT_M$$

$$l_p = RT_M \ln \frac{p_M}{p_a}; \quad (8)$$

Удельная работоспособность в этом случае в  $p-V$  координатах изображается площадью  $a-b-e-d$ , что позволяет выделить две части, две разные составляющие

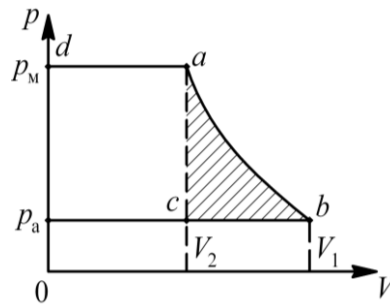


Рисунок 3 – Потенціальна енергія стисненого повітря механічної роботи, що виконується газом. Робота, визначена площею  $a-c-e-d$  і рівна  $V_2(p_m - p_a)$ , характерна для потоку і виконується не за рахунок зміни стану газу в ньому, а за рахунок енергії, передаваної через газ в потік від зовнішнього джерела (компресора), т. є. в цьому випадку повітря виступає як кінематичне ланка, що зв'язує компресор з робочою порожниною пневмопривода. Цю частину роботи прийнято називати *транзитною* [5]. Площа  $a-b-c$  буде відповідати потенціальній енергії  $u$  стисненого повітря, яка відповідає роботі ідеального компресора при ізотермічному процесі стиснення одиниці маси повітря від початкових умов до вказаного об'єму.

$$u = l_p - V_2(p_m - p_a) = RT_m \ln \frac{p_m}{p_a} - \frac{RT_m}{p_m}(p_m - p_a); \quad (9)$$

$$u = RT_m \left[ \ln \frac{1}{\sigma_a} - (1 - \sigma_a) \right]. \quad (10)$$

В пневмоагрегатах зі вбудованим резервуаром роботу виконує спокійний стиснений повітря в накопичувальній ємкості (рис. 1). Тому для визначення питомої роботи (ексергії) будемо використовувати вираження (10).

Повна робота стисненого повітря в накопичувальному резервуарі

$$E_s = uM = \frac{uW_{01}p_m}{RT_m}. \quad (11)$$

Або в безрозмірній формі

$$\bar{E}_s = \frac{E_s}{A_0} = \lambda_{01} \left[ \ln \frac{1}{\sigma_a} - (1 - \sigma_a) \right]. \quad (12)$$

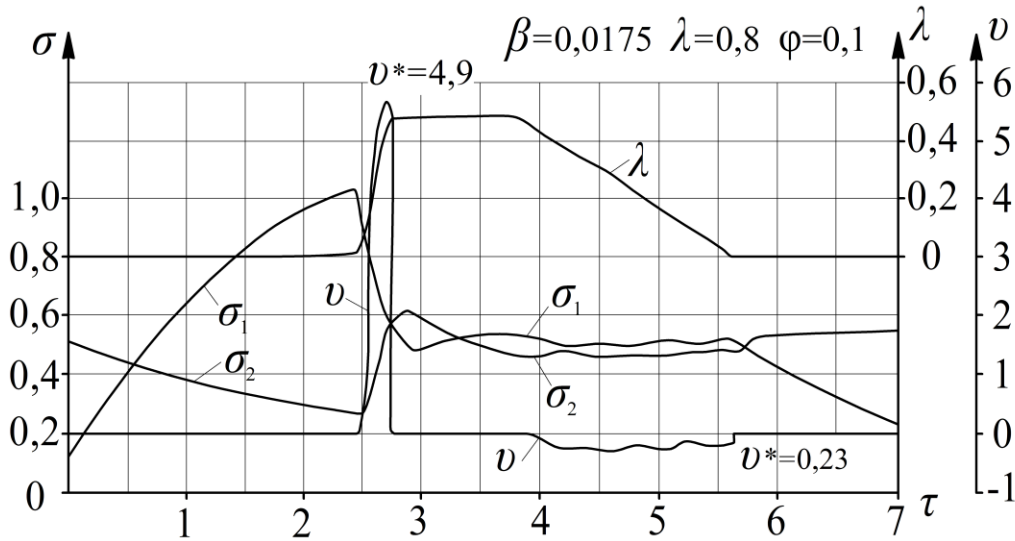


Рисунок 4 – Барохонная и динамическая диаграмма ударного пневмоагрегата

Барохонная и динамическая диаграмма ударного пневмоагрегата в безразмерной форме при критериях динамического подобия  $\beta = 0,0175$ ,  $\lambda_{01} = 0,8$ ,  $\varphi = 0,1$  представлена на рис. 4. На её основе получена  $p-V$  ( $\sigma - \lambda$ ) диаграмма, которая позволяет получить качественную и количественную оценку компонентов энергозатрат (рис. 5). На рис. 5  $S_{abcd} \sim \lambda_{01} \ln 1/\sigma_a$  – полная работоспособность потока сжатого воздуха, поступившего в накопительную ёмкость.  $S_{ldcl} \sim \bar{E}_s$  – работоспособность покоящегося сжатого воздуха в накопительной ёмкости. Остальные компоненты энергозатрат сжатого воздуха представлены в таблице 1.

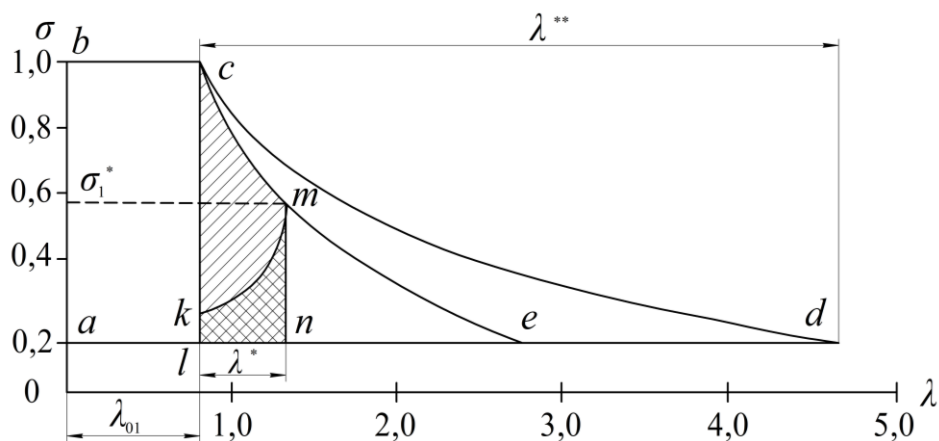


Рисунок 5 –  $p-V$  ( $\sigma - \lambda$ ) диаграмма процесса срабатывания ударного ПА

Таблица 1 – Компоненты потерь работоспособности сжатого воздуха

№ п/п	Вид потерь	Изображение в $\sigma - \lambda$ координатах	Расчётная формула
-------	------------	--	-------------------

1	2	3	4
1	Полная работоспособность сжатого воздуха в накопительном резервуаре	$S_{icdl}$	$\bar{E}_s = \lambda_{01} [\ln 1/\sigma_a - (1 - \sigma_a)]$
2	Полная работа расширения воздуха в рабочей полости	$S_{ecel}$	$\bar{E}_s = \frac{\lambda_{01}}{k-1} \left[ 1 - \sigma_a^{\frac{k-1}{k}} \right] - \lambda_{01} \left( \frac{1 - \sigma_a^{1/k}}{\sigma_a^{1/k}} - 1 \right) \sigma_a$
3	Потеря работоспособности из-за несоответствия фактического процесса расширения идеальному	$S_{ecde}$	$\Delta \bar{E}_{\text{нп}} = \lambda_{01} \left[ \ln 1/\sigma_a - (1 - \sigma_a) - \frac{1 - \sigma_a^{1/k}}{k-1} + \sigma_a \left( \frac{1 - \sigma_a^{1/k}}{\sigma_a^{1/k}} - 1 \right) \right]$

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
4	Потеря работоспособности из-за неполноты расширения	$S_{nmen}$	$\Delta \bar{E}_{\text{нп}} = \frac{(\lambda_{01} + \lambda^*) \sigma_a^*}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{01} + \lambda^*}{\lambda_{01} + \lambda^{**}} \right)^{k-1} \right] - (\lambda^{**} - \lambda^*) \sigma_a,$ Где $\lambda^{**} = \frac{\lambda_{01} (1 - \sigma_a^{1/k})}{\sigma_a^{k-1}};$ $\lambda^*$ – безразмерная координата расположения заготовки
5	Работа расширения сжатого воздуха при срабатывании ударного ПА	$S_{lcmn}$	$\bar{E}_{\text{рас}} = \frac{\lambda_{01}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda^*} \right)^{k-1} \right] - \lambda^* \sigma_a$
6	Работа вытеснения сжатого воздуха из выхлопной полости	$S_{lkmn}$	$\bar{R}_b = \frac{1}{\Pi_{21}} [\varphi + \sigma_a (1 - \varphi)] \frac{1 + \lambda_{02}}{k-1} \times \left[ \left( \frac{\lambda_{02} + 1}{\lambda_{02} + 1 - \lambda^*} \right)^{k-1} - 1 \right] - \lambda^* \sigma_a$
7	Полезная работа расширения сжатого воздуха в рабочей полости	$S_{kcmk}$	$\bar{R} = \bar{E}_{\text{рас}} - \bar{R}_b$

В основе расчётных формул табл. 1 лежат зависимости (4) и (5).

Количественные значения компонент энергозатрат применительно к безразмерным параметрам  $\beta = 0,0175$ ,  $\lambda_{01} = 0,8$ ,  $\varphi = 0,1$  даны в виде процентной диаграммы на рис. 6.

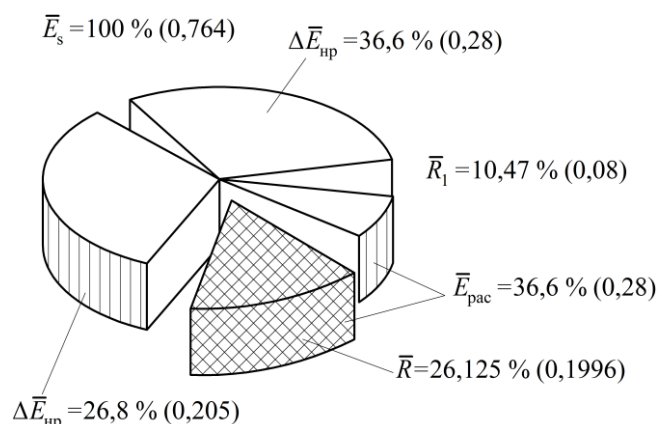


Рисунок 6 – Процентная диаграмма энергопотерь сжатого воздуха в ударном ПА при  $\beta = 0,0175$ ,  $\varphi = 0,1$  и  $\lambda_{01} = 0,8$

Из диаграммы на рис. 6 следует, что непроизводительные потери, на которые можно влиять путём рационального выбора параметров ПА, являются потери, связанные с неполнотой расширения ( $\Delta \bar{E}_{нр}$ ) и непроизводительной работой выталкивания сжатого воздуха из выхлопной полости ( $\bar{R}_1$ ).

Эксергический КПД ударного пневмоагрегата может быть определён как

$$\eta_s = \frac{\bar{R}}{E_s}. \quad (13)$$

Графики-номограммы и расчётные формулы, устанавливающие зависимость основных кинематических параметров ударного ПА ( $\lambda^*$  – безразмерной координаты достижения максимальной скорости удара и  $v^*$  – максимальной безразмерной скорости удара при координате  $\lambda^*$ ) от основных критериев подобия  $\lambda_{01}$ ,  $\varphi$  и  $\sigma_a$  даны в работе [2] и представлены на рис. 7 и в виде зависимости (14).

$$\lambda^* = \frac{\left\{1 - [\varphi + \sigma_a (1 - \varphi)]^{1/k}\right\} (\lambda_{01} + \lambda_{02} \lambda_{01})}{\lambda_{01} + [\varphi + \sigma_a (1 - \varphi)]^{1/k} (1 + \lambda_{02})}. \quad (14)$$

Именно при этих значениях  $\lambda^*$  достигается не только максимальная скорость удара  $v^*$ , но и до минимума снижаются непроизводительные затраты работоспособности, связанные с неполнотой расширения воздуха в рабочей полости.

Зависимость основных энергетических показателей ударного ПА  $\eta_s$ ,  $\bar{M}$  и  $\bar{R}$  от основных критериев динамического подобия  $\lambda_{01}$  и  $\varphi$  представлена на рис. 8 в виде графиков- номограмм, которые построены при координате расположения заготовки, соответствующей оптимальному значению  $\lambda^*$  (14).



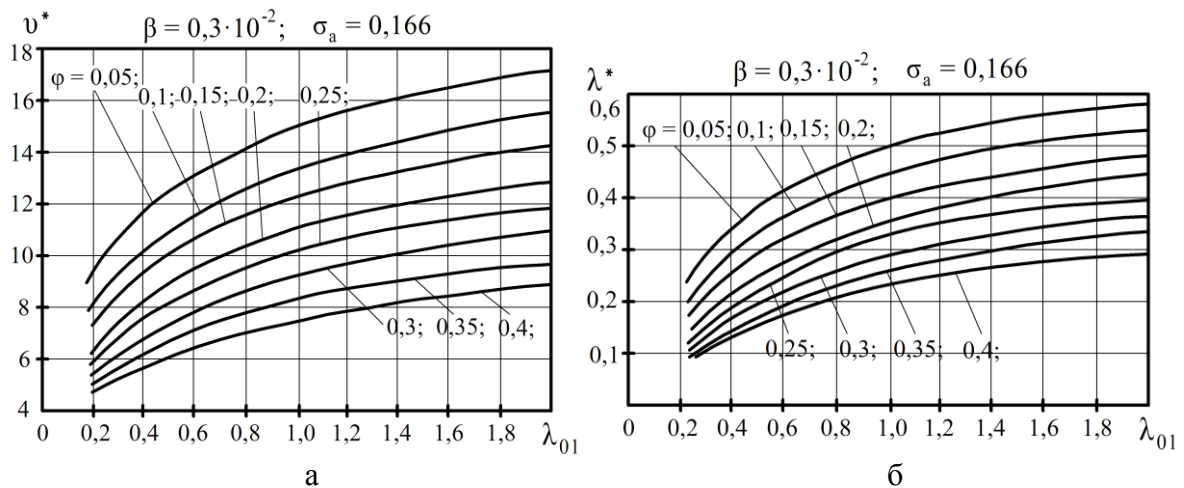


Рисунок 7 – Зависимость максимальной безразмерной скорости удара  $v^*$  (а) и координаты реализации максимальной скорости  $\lambda^*$  (б) от критериев подобия  $\lambda_{01}$  и  $\varphi$  при  $\sigma_a = 0,166$

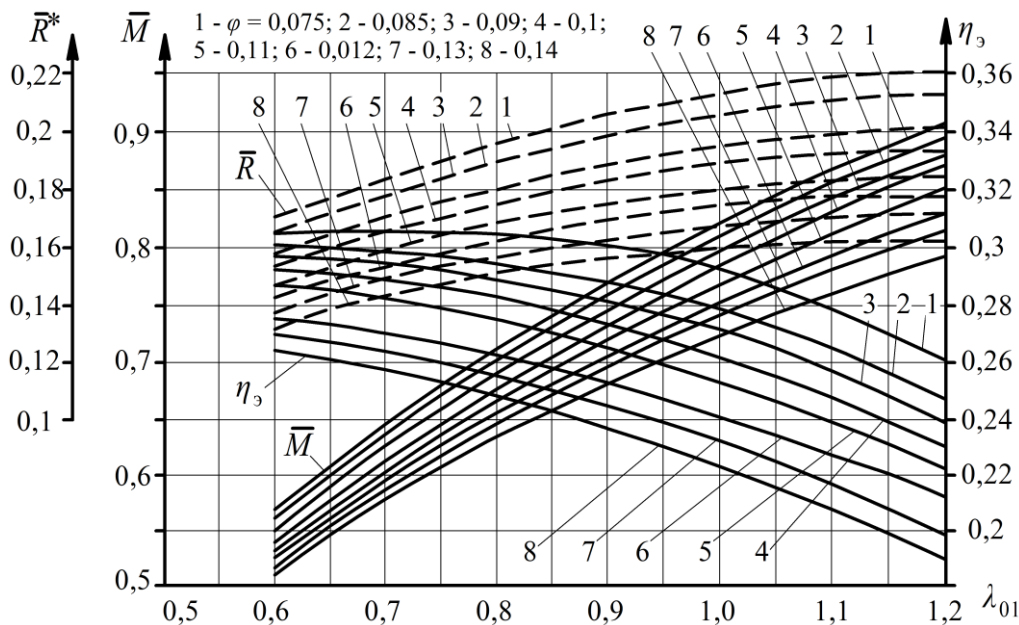


Рисунок 8 – Зависимости энергетических показателей ударного ПА от основных критериев динамического подобия

Графики-номограммы на рис. 8 позволяют расширить возможности оперативного инженерного анализа на основе выделения критериев динамического подобия и распространить его на оценку энергетических характеристик проектируемого ударного ПА.

**Выводы.** Изложенная методика и результаты анализа энергетических характеристик ударного ПА позволяют выявить основные источники непроизводительных энергозатрат и определить в пространстве безразмерных критериев динамического подобия область, обеспечивающую наиболее эффективную реализацию работоспособности сжатого воздуха.

## Литература

1. Атаманов Ю.Л. Использование пневмоагрегата со встроенным резервуаром в ударных пневмомеханизмах клеймения металлопроката [текст] / Ю.Л. Атаманов, Г.А. Крутиков, М.Г. Стрижак // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – №4/7(64). – С. 32–35.
2. Атаманов Ю.Л. Инженерная методика расчёта кинематических параметров ударного пневмоагрегата со встроенным резервуаром [текст] / Ю.Л. Атаманов, Г.А. Крутиков, М.Г. Стрижак // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – №5/7(65). – С. 54–58.
3. Бродянский В.М. Эксергический метод термодинамического анализа. – М.: Машиностроение. – 1985. – 272 с.
4. Перельцвайг М.И. Исследование динамики ударного пневматического поршневого привода // М.И. Перельцвайг. Анализ и синтез машин-автоматов. – М.: Наука, 1964. – С. 164–170.
5. Цейтлин Ю.А., Мурзин В.А. Пневматические установки шахт. – М.:Недра, 1985. – 354 с.

## Bibliography (transliterated)

1. Atamanov Yu.L. Ispolzovanie pnevmoagregata so vstroennym rezervuarom v udarnyih pnevмомеханизмах kleymeniya metalloprokata [tekst] Yu.L. Atamanov, G.A. Krutikov, M.G. Strizhak ShIdno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologIy. – 2013. – #4/7(64). – P. 32–35.
2. Atamanov Yu. L. Inzhenernaya metodika raschYota kinematicheskih parametrov udarnogo pnevmoagregata so vstroennym rezervuarom [tekst] Yu.L. Atamanov, G.A. Krutikov, M.G. Strizhak ShIdno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologIy. – 2013. – #5/7(65). – P. 54–58.
3. Brodyanskiy V.M. Eksergicheskiy metod termodinamicheskogo analiza. – М.: Mashinostroenie. – 1985. – 272 p.
4. Pereltsvayg M.I. Issledovanie dinamiki udarnogo pnevmaticheskogo porshneвого privoda M.I. Pereltsvayg. Analiz i sintez mashin-avtomatov. – М.: Nauka, 1964. – P. 164–170 p.
5. Tseytlin Yu.A., Murzin V.A. Pnevmaticheskie ustanovki shaht. – М.:Nedra, 1985. – 354 p.

УДК 621.05

Атаманов Ю.Л., Крутиков Г.А., Стрижак М.Г.

**АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНИХ ПНЕВМОАГРЕГАТИВ З ВБУДОВАНИМ РЕЗЕРВУАРОМ**

Викладена методика і результати аналізу енергетичних характеристик ударного ПА, що дозволяють виявити основні джерела непродуктивних енерговитрат і визначити

в просторі безрозмірних критеріїв динамічної подоби область, що забезпечує найбільш ефективну реалізацію працездатності стисненого повітря.

Atamanov J., Krutikov G., Strizhak M.

**ANALYSIS OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE SHOCK PNEUMONIT WITH INTEGRATED RESERVOIR**

The technique and the results of analysis of the energy characteristics of the shock PA, allowing to identify the main sources of energy and identify unproductive in the space of dimensionless criteria of dynamic similarity region, providing the most efficient implementation of compressed air efficiency.