

Рис. 4. Проекция предельных линий

Для передач, параметры которых указаны в таблице, по уравнениям (10) произведен расчет координат точек предельных линий (рис. 4).

Расположение линий 1, 2, 3 за пределами поля зацепления указывает на отсутствие опасности подрезания ножки витка червяка производящей плоскостью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчин Н.И. Метод винтового комплекса в теории пространственных зацеплений // Теория передач в машинах: Тр. III совещ. по основным проблемам теории машин и механизмов. – М., 1953. – С. 7–18.
2. Акулич В.К. Аналитическая геометрия и кинематика контакта в глобоидном зацеплении со шлифованным червяком и некоторые вопросы модификации зацепления: Дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1969. – 313 с.
3. Акулич В.К. Глобоидное зацепление с поверхностью витков червяка, шлифуемой плоскостью // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 1. – С. 81–84.
4. Сагин Л.И. Улучшение методов производства и эксплуатационных качеств глобоидных передач // Тр. ЦНИИТМАШ. – 1960. – № 14. – С. 6–63.
5. Колчин Н.И. Аналитические основы дифференциального метода исследования зубчатых зацеплений // Тр. Ин-та машиноведения АН СССР. Семинар по теории машин и механизмов. – 1957. – Т. 16. – Вып. 64. – С. 26–53.

УДК 622.233.5

### РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПНЕВМОУДАРНОГО МЕХАНИЗМА

А.Н. Глазов

Томский политехнический университет  
E-mail: ZVM@tpu.ru

*Рассматривается статическая модель рабочих процессов в камерах пневмоударного механизма. Получены расчетные зависимости для определения характеристик рабочих камер и пневмоударного механизма по теоретическим индикаторным диаграммам. Даны уравнения для определения оптимальной степени наполнения рабочих камер. Приведены результаты расчетов на ПЭВМ оптимальной степени наполнения и минимального удельного расхода газа задней от штанги камеры для показателей политропы равных 1,4 и 1,0 для процессов расширения и сжатия. Представлены формулы для определения удельного расхода воздуха.*

В основу методики исследования пневматических бурильных машин входит анализ индикаторных диаграмм [1]. Теоретическая индикаторная диаграмма идеального механизма является предельной статической моделью процессов в рабочей камере. Целью данной работы является получение

расчётных зависимостей характеристик рабочих камер и пневмоударного механизма от параметров статической модели процессов.

При рассмотрении теоретического рабочего процесса делаются следующие допущения: рабочее тело – идеальный газ; отсутствуют потери на тре-

ние и утечки сжатого воздуха; процесс расширения сжатого воздуха протекает при неизменном показателе политропы; воздух в цилиндре не содержит влаги; неизменное состояние воздуха в камере во время наполнения и выхлопа. Рабочие процессы пневмоударного механизма в определенной степени идеализируются и отождествляются с обратимыми термодинамическими процессами.

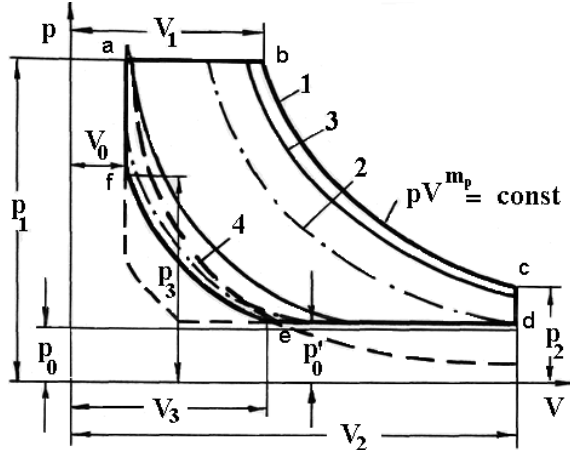


Рис. 1. Обобщенная диаграмма (1) и расчетные оптимальные циклы процессов для  $\varepsilon_0=0,12, \lambda_0=0,185, 2) \varepsilon=4,3$  3)  $\varepsilon=5,7$  4)  $\varepsilon=2,1$

Обобщенная теоретическая индикаторная диаграмма процессов для задней камеры пневмоударного механизма (ПУМ) имеет вид, приведенный на рис. 1 [1 и др.]. Она состоит из фаз: *a-b* – наполнение воздухом камеры; *b-c* – процесс расширения воздуха; *c-d* – выхлоп сжатого воздуха в атмосферу; *d-e* – выталкивание воздуха из цилиндра, при котором состояние рабочего тела не изменяется, а уменьшается его масса в камере; *e-f* – процесс сжатия газа; *f-a* – впуск сжатого воздуха. Давление воздуха в задней камере в период его выталкивания  $p'_0$ , как правило, выше атмосферного  $p_0$ .

Параметрами цикла процессов являются: степени сжатия  $\varepsilon=V_3/V_0$  и наполнения камеры  $\varepsilon_1=V_1/V_2$ ; относительные величины вредного пространства  $\varepsilon_0=V_0/V_2$  и давления наполнения  $\lambda_0=p'_0/p_1$ .

Здесь  $p_1$  – давление воздуха при наполнении; объём воздуха:  $V_3$  – в момент окончания выталкивания,  $V_0$  – вредного пространства,  $V_1$  – при наполнении;  $V_2$  – объём камеры.

Индикаторная работа задней камеры  $L_{T3}$  за цикл с учетом политропного характера процессов

$$L_{T3} = p_1 V_2 \left[ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_1^{m_p}}{m_p - 1} + \varepsilon_1 - \varepsilon_0 - \\ - \lambda_0 \left( \frac{\varepsilon^{m_c} - \varepsilon}{m_c - 1} \varepsilon_0 - \varepsilon \varepsilon_0 + 1 \right) \end{array} \right], \quad (1)$$

где  $m_p, m_c$  – показатели процессов расширения и сжатия воздуха. Если положить  $m_p=1,4, m_c=1$  [2] и учесть, что

$$\lim_{m_c \rightarrow 1} (\varepsilon^{m_c} - \varepsilon)(m_c - 1)^{-1} = \varepsilon \ln \varepsilon,$$

из (1) имеем

$$L_{T3} = p_1 V_2 \left[ \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_1^{1,4}}{0,4} + \varepsilon_1 - \varepsilon_0 - \lambda_0 (\varepsilon \ln \varepsilon_0 - \varepsilon \varepsilon_0 + 1) \right].$$

Теоретическое среднее индикаторное давление равно

$$p_{T3}^T = L_{T3} V_p^{-1} = L_{T3} [V_2 (1 - \varepsilon_0)]^{-1},$$

где  $V_p = V_2 - V_0$  – рабочий объём камеры.

Массовый расход воздуха за цикл

$$G_{T3} = p_1 V_1 (RT_1)^{-1} - p_0 V_3 (RT_0)^{-1}, \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_1$  – температура воздуха в процессе наполнения,  $T_0$  – температура воздуха в момент окончания выталкивания.

Используя зависимости между параметрами процессов цикла, можно записать

$$T_0 = \frac{T_1}{\left[ \frac{p_1}{p_0} \left( \frac{V_0}{V_3} \right)^{m_c} \right]^{\frac{m_b-1}{m_b}} \left( \frac{V_3}{V_0} \right)^{m_c-1}},$$

или, выделяя безразмерные параметры,

$$T_0 = T_1 \lambda_0^{\frac{m_b-1}{m_b}} \varepsilon^{\frac{1-m_c}{m_b}}, \quad (3)$$

где  $m_b$  – показатель процесса в период впуска воздуха. С учетом (3), формулу (2) можно представить в виде

$$G_{T3} = p_1 V_2 (RT_1)^{-1} \left( \varepsilon_1 - \lambda_0^{\frac{1}{m_b}} \varepsilon^{\frac{m_c}{m_b}} \varepsilon_0 \right). \quad (4)$$

Если  $m_b \rightarrow \infty, m_c=1$ , то

$$G_{T3} = p_1 V_2 (RT_1)^{-1} (\varepsilon - \varepsilon_0).$$

Теоретический удельный расход, т.е. полезный расход воздуха в задней камере на единицу теоретической индикаторной мощности равен

$$q_{T3} = \frac{G'}{N_T} = \frac{G_{T3}}{L_{T3}}, \quad (5)$$

где  $G'$  – расход воздуха в единицу времени,  $N_T$  – теоретическая индикаторная мощность.

После подстановки  $G_{T3}, L_{T3}$  из (4), (1) и некоторых преобразований формула (5) принимает вид

$$q_{T3} = \frac{\varepsilon_1 - \lambda_0^{\frac{1}{m_b}} \varepsilon^{\frac{m_c}{m_b}} \varepsilon_0}{RT_1 \left[ \varepsilon_1 \frac{m_p}{m_p-1} - \frac{\varepsilon_1^{m_p}}{m_p-1} - \varepsilon_0 - \lambda_0 \left( \frac{\varepsilon^{m_c} - \varepsilon}{m_c-1} \varepsilon_0 - \varepsilon \varepsilon_0 + 1 \right) \right]}.$$

На рис. 2 представлены два вида цикла передней камеры. Диаграмма, рис. 2, а, характерна для ПУМ, у которых управление выпуском воздуха осуществляется специальным распределителем. Это приводит к усложнению структуры механизма. При этом трудно обеспечить быстрый выхлоп воздуха, особенно у мощных ПУМ. Поэтому такой цикл применяется редко.

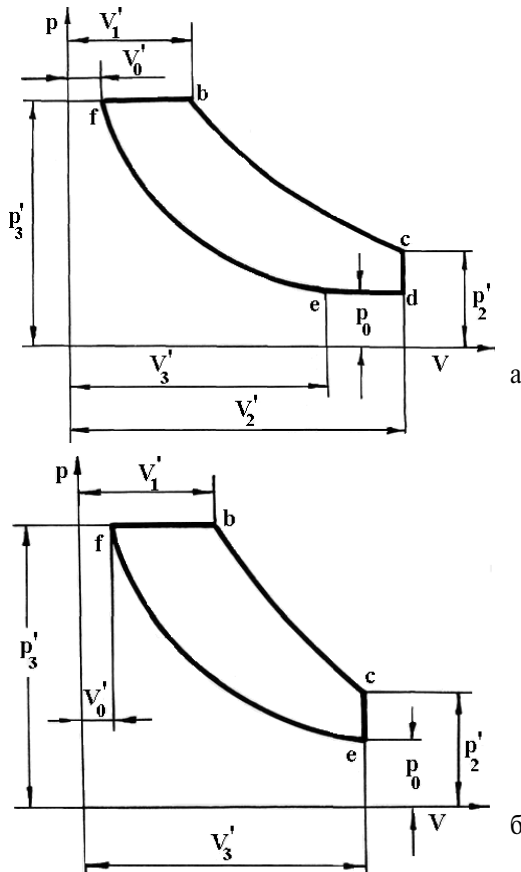


Рис. 2. Теоретические диаграммы передней камеры пневмодуарного механизма

Возможен цикл процессов без сжатия воздуха в передней камере в период прямого хода поршня. Но это приводит к усложнению структуры управления механизмом и к необходимости быстрой подачи довольно большого объема сжатого воздуха в начале обратного хода поршня. Поэтому в известных нам промышленных образцах ПУМ такой цикл не применяется.

Цикл с выталкиванием (рис. 2, а) характеризуется следующими параметрами:  $\varepsilon'_1 = V'_1/V'_2$  – степень наполнения камеры;  $\varepsilon' = V'_3/V'_0$  – степень сжатия;  $\varepsilon'_0 = V'_0/V'_2$  – относительная величина вредного пространства передней камеры.

Работа теоретического цикла камеры  $L_{III}$  выражается площадью, ограниченной контуром индикаторной диаграммы (рис. 2, а).

$$L_{III} = \frac{1}{m_p - 1} (p'_3 V'_1 - p'_2 V'_2) - \frac{1}{m_c - 1} (p'_3 V'_0 - p_0 V'_3) + p'_3 (V'_1 - V'_0) - p_0 (V'_2 - V'_3).$$

После введения безразмерных параметров цикла и некоторых преобразований, с учетом политропного характера процессов, получим

$$L_{III} = p_0 V'_2 \left[ \frac{\varepsilon'^{m_c} \varepsilon'_1 (1 - \varepsilon_1'^{m_p - 1})}{m_p - 1} - \frac{\varepsilon'_0 \varepsilon' (\varepsilon'^{m_c - 1} - 1)}{m_c - 1} + \varepsilon'^{m_c} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_0) - 1 + \varepsilon'_0 \varepsilon' \right].$$

Теоретический цикл (рис. 2, б) осуществляется на части длины хода поршня и имеет 4 фазы: f-b – наполнение камеры воздухом; b-c – процесс расширения воздуха; c-e – выхлоп воздуха; e-f – процесс сжатия воздуха. Его характеризуют параметры:  $\varepsilon'_1 = V'_1/V'_3$ ,  $\varepsilon' = V'_3/V'_0$ ,  $\varepsilon'_0 = V'_0/V'_3$ .

Работа теоретического цикла рабочих процессов в передней камере определяется как алгебраическая сумма работ с учетом политропного характера процессов.

$$L_{III} = \frac{1}{m_p - 1} (p'_3 V'_1 - p'_2 V'_3) - \frac{1}{m_c - 1} (p'_3 V'_0 - p_0 V'_3) + p_3 (V'_1 - V'_0)$$

или 
$$L_{III} = p_0 V'_3 \left[ \frac{\varepsilon'^{m_c} \varepsilon'_1 (1 - \varepsilon'^{m_p - 1})}{m_p - 1} - \frac{\varepsilon'^{m_c - 1} - 1}{m_c - 1} + \varepsilon'^{m_c} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'^{-1}) \right].$$

При  $m_p = m_c = 1,4$  работа равна

$$L_{III} = p_0 V'_3 \left[ \frac{\varepsilon'^{1,4} \varepsilon'_1 (1 - \varepsilon'^{0,4})}{0,4} - \frac{-2,5(\varepsilon'^{0,4} - 1) + \varepsilon'^{1,4} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'^{-1})}{-2,5(\varepsilon'^{0,4} - 1) + \varepsilon'^{1,4} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'^{-1})} \right].$$

Среднее индикаторное давление воздуха

$$p_{III}^T = L_{III} / V'_3 (1 - \varepsilon').$$

Массовый расход воздуха равен

$$G_{III} = \frac{p'_3 V'_1}{RT_1} - \frac{p_0 V'_3}{RT_0} = \frac{p_0 V'_3 \varepsilon'^{m_c}}{RT_1} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'^{-1}).$$

При анализе работы и проектировании пневматического механизма представляет значительный интерес определение оптимального значения степени наполнения. Как и при всякой оптимизации, результат может зависеть от выбора критерия оптимальности. Разумным критерием служит теоретический удельный расход воздуха  $q_T$ .

Очевидно, что при  $\varepsilon_1 = 1$  достигается максимум индикаторной работы цикла, но при этом увеличивается и расход сжатого воздуха. Представляет интерес, при каком значении  $\varepsilon_1$  достигается минимальный удельный расход воздуха. Математически задача оптимизации сводится к определению значения  $\varepsilon_1$ , минимизирующего  $q_T(\varepsilon_1)$ . Эта задача решена в работе [3] и получено уравнение

$$\varepsilon_1 = f(\varepsilon_1),$$

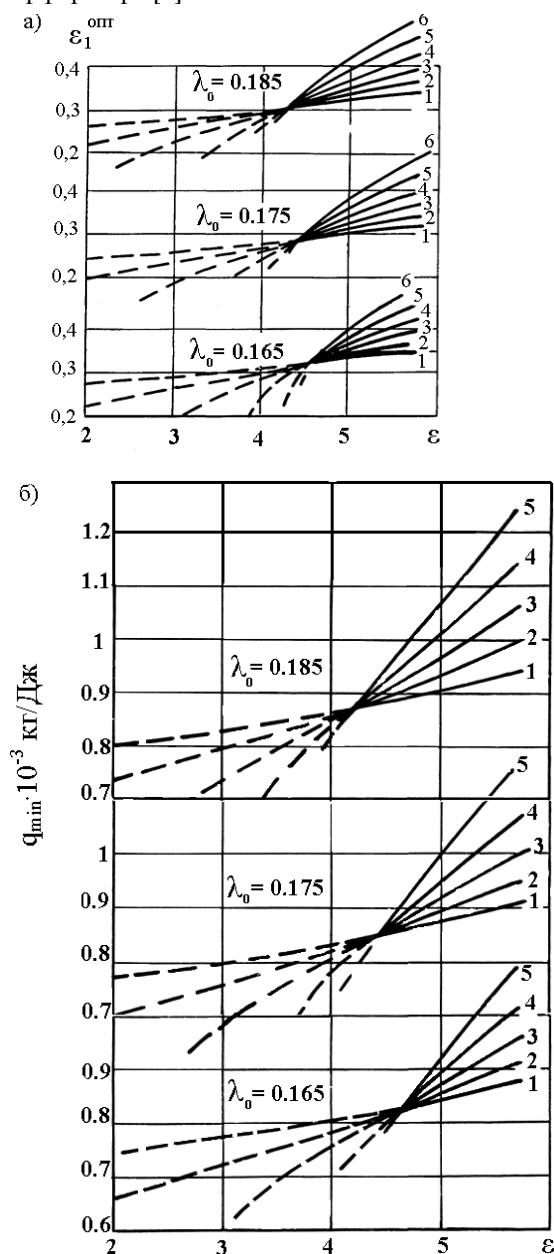
где 
$$f(\varepsilon_1) = \frac{m_p \lambda_0^{\frac{1}{m_B}} \varepsilon_0^{\frac{m_c}{m_B}} \varepsilon_0}{m_p - 1} +$$

$$\left[ \varepsilon_0 \lambda_0 \left( \frac{\varepsilon_0^{m_c} - \varepsilon_0}{m_c - 1} - \varepsilon_0 - \varepsilon_0 + 1 \right) - \left( \lambda_0^{\frac{1}{m_B}} \varepsilon_0^{\frac{m_c}{m_B}} \varepsilon_0 \right) \frac{m_p}{m_p - 1} \right] \varepsilon_1^{m_p - 1}.$$

Для его решения применяется метод последовательных приближений (метод итераций). Алгоритм

итераций сводится к вычислению по схеме  $(\varepsilon_1)_i = f[(\varepsilon_1)_{i-1}]$ ,  $i=1, 2, \dots$ ;  $(\varepsilon_1)_0$  – начальное значение  $\varepsilon_1$ .

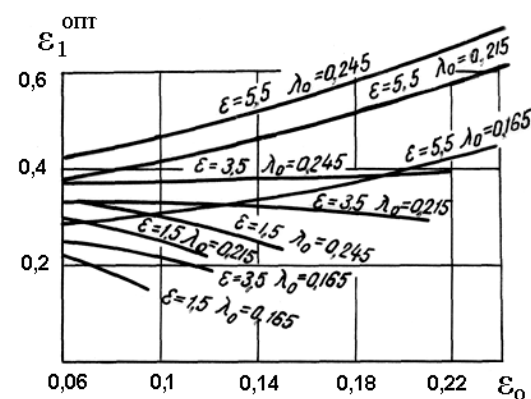
В соответствии с алгоритмом проведены расчеты на ПЭВМ оптимального параметра  $\varepsilon_1^{\text{опт}}$  и минимального удельного расхода воздуха  $q_{\text{min}}$  для широкого диапазона значений параметров цикла. Фрагменты результатов исследования представлены на рис. 3, 4 для случая  $m_p=1,4$ ;  $m_b=\infty$ ;  $m_c=1$ . Такие показатели близки к фактическим для ударного узла перфоратора [4].



**Рис. 3.** Зависимости а) оптимальной степени наполнения камеры и б) минимального удельного расхода воздуха от параметров цикла: 1-6)  $\varepsilon_0=0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21$

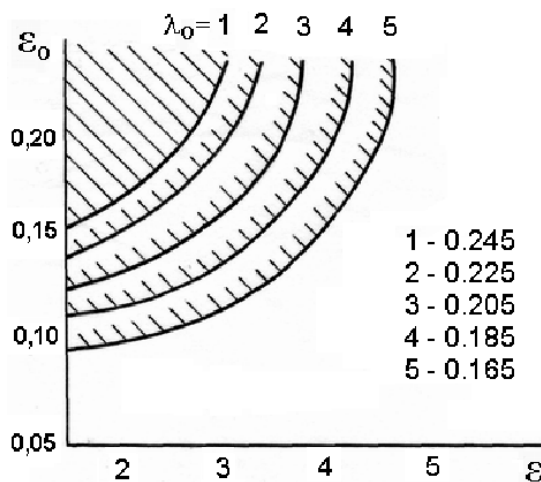
Точка пересечения кривых соответствует предельному значению  $\varepsilon_1$ , при котором происходит полное расширение сжатого воздуха от начального давления  $p_1$  до конечного  $p_0'$  (диагр. 2 на рис. 1). При

большем значении  $\varepsilon_1$  получается цикл процессов 3 (рис. 1) с неполным расширением воздуха. Уменьшение  $\varepsilon_1$  против предельного значения приводит к диаграмме с отрицательной петлей работы или к циклу работы на части рабочей длины цилиндра. Из графика (рис. 3) видно, что только при  $\varepsilon$  выше предельной величины, увеличение  $\varepsilon_0$  приводит к возрастанию  $\varepsilon_1$  и  $q_{\text{min}}$ .



**Рис. 4.** Зависимость оптимальной степени наполнения от относительной величины вредного пространства

Увеличение относительной величины давления выхлопа  $\lambda_0$ , степени обратного сжатия  $\varepsilon$  при постоянном  $\varepsilon_0$  приводит к увеличению  $\varepsilon_1^{\text{опт}}$  и  $q_{\text{min}}$ . Интенсивность возрастания  $\varepsilon_1^{\text{опт}}$  и  $q_{\text{min}}$  по  $\varepsilon$  тем выше, чем больше исходная величина  $\varepsilon_0$ . Это объясняется тем, что большим значениям  $\varepsilon_0$  соответствуют более высокие величины объема воздуха в начале его сжатия  $V_3 = \varepsilon V_0$ , что увеличивает работу обратного сжатия.



**Рис. 5.** Зоны существования  $\varepsilon_1^{\text{опт}}$

Расчеты показали, что есть область значений параметров цикла, заштрихованная на рис. 5, в которой  $q_{\text{min}}$  и  $\varepsilon_1^{\text{опт}}$  не существуют, т.е. задача оптимизации цикла не решается.

Степень наполнения передней камеры  $\varepsilon_1'$  можно определить методом итераций из следующего уравнения

$$\varepsilon_1' = \frac{\varepsilon_1^{m_p}}{m_p} + \left( \gamma + \frac{L_{\text{III}}}{p_0 V_3'} \right) \alpha^{-1},$$

где  $\gamma = \varepsilon^{m_c-1} \left( \frac{m_c}{m_c-1} \right) - \frac{1}{m_c-1}$ ,

при  $m_c=1,4$   $\gamma=3,5\varepsilon^{0,4}-2,5$ ;

$\alpha = \varepsilon^{m_c} \frac{m_p}{m_p-1}$ , при  $m_p=1,4$   $\alpha=3,5\varepsilon^{1,4}$ .

Теоретическая индикаторная работа сжатого воздуха по совершению прямого хода поршня равна

$$L_{T_p} = L_1 + L_3 - L_0 - L_{c_{жк}}, \quad (6)$$

где  $L_1=p_1V_2(m_p-1)^{-1}(\varepsilon_1-\varepsilon_1^{m_p})$  – работа расширения сжатого воздуха в задней камере,  $L_3=p_1V_2(\varepsilon_1-\varepsilon_0)$  – работа наполнения воздухом задней камеры,  $L_0=p_0V_2$  – работа газа при изменении объема с  $V_2$  до  $V_0$ ,

$$L_{c_{жк}} = p_0V_3'(m_c-1)^{-1}(\varepsilon'^{m_c-1}-1) - p_0V_3'(1-\varepsilon'^{-1}).$$

После подстановки в зависимость (6) выражений ее составляющих работ получим

$$L_{T_p} = p_1V_2 \left( \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_1^{m_p}}{m_p - 1} + \varepsilon_1 - \varepsilon_0 \right) - p_0V_2(1 - \varepsilon_0) - p_0V_3' \left( \frac{\varepsilon'^{m_c-1} - 1}{m_c - 1} - 1 + \varepsilon'^{-1} \right).$$

Энергия удара равна

$$A_y = L_{T_p} \eta_{мех.з} \eta_{П}',$$

где  $\eta_{мех.з}$  – механический КПД прямого хода поршня,  $\eta_{П}'$  – коэффициент полноты силовой диаграммы, равный отношению действительной и теоретической работ сжатого воздуха по перемещению поршня в период прямого хода.

Работа теоретического цикла передней камеры связана с индикаторной работой задней камеры

$$L_{ТП} = \frac{A_y}{\eta_{мех}} - L_{T_3},$$

где  $\eta_{мех}$  – механический КПД ПУМ.

Удельный расход воздуха пневмоударного механизма

$$q = \frac{G_T}{A_y \eta_y \rho_n} = \frac{G_{T_3} + G_{ТП}}{L_{T_p} \eta_{мех.з} \eta_{П}' \eta_y \rho_n}$$

или с учетом того, что часть энергии удара отражается

$$q = \frac{G_{T_3} + G_{ТП}}{A_y (1 - k_0^2) \eta_y \rho_n},$$

где  $G_T$  – теоретический расход воздуха ПУМ,  $\eta_y = G_T/G$  – коэффициент утечек,  $G$  – фактический расход воздуха,  $\rho_n$  – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях,  $k_0 = (A_0/A_y)^{1/2}$  – коэффициент отскока,  $A_0$  – энергия отскока поршня. Если принять КПД равными единице, то получатся значения энергетических параметров и удельного расхода воздуха идеального пневмоударного механизма, что позволяет, в частности, оценить совершенство реального устройства.

### Выводы

Получены зависимости для определения энергетических и расходных характеристик рабочих камер и пневмоударного механизма.

Показано, что задача определения оптимальной степени наполнения задней камеры имеет решение. Получены графические зависимости оптимальной степени наполнения и минимального удельного расхода воздуха от параметров цикла процессов. Увеличение объема вредного пространства приводит к возрастанию минимального удельного расхода при определенном интервале значений степени сжатия. Зависимость степени наполнения и удельного расхода воздуха от степени сжатия тем значительней, чем выше значение относительного давления вредного пространства и давление недовыхлопа. Показано, что существует область значений параметров цикла, при котором задача определения оптимальной степени наполнения и минимального расхода не имеет решения.

Получено уравнение для определения степени наполнения передней камеры, которая зависит от параметров и индикаторной работы задней камеры.

Представленные результаты будут полезны при синтезе и оценке совершенства конструкций пневмоударных механизмов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О.Д., Басов И.Г., Горбунов В.Ф., Маликов Д.Н. Бурильные машины. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 360 с.
2. Глазов А.Н. Снижение удельного расхода воздуха пневматических машин ударного действия // Известия вузов. Горный журнал. – 1977. – № 2. – С. 102–105.
3. Глазов А.Н., Глазов Г.Н. Оптимальная степень наполнения камеры сжатым воздухом // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – № 6. – С. 84–87.
4. Глазов А.Н. Рабочие процессы пневмоударного механизма перфоратора // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 132–136.