Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LX, вып. 1, 1970 г.

СТАТИЧЕСКИЕ РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОТБОЙНЫХ МОЛОТКОВ

Г. А. Терехов

Современные методы расчета пневматических молотков основываются на предположениях, что рабочие процессы их равновесны, а массообмен при наполнении и опорожнении рабочих полостей цилиндра происходит в соответствии с закономерностями установившегося течения сжатого воздуха. При этом массовый расход воздуха определяется по формуле Сен-Венана—Вантцеля

$$G = \mu S_0 \sqrt{2g\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{p_c}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_c}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_c}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, \qquad (1)$$

которая при надкритическом режиме истечения записывается в виде

$$G = \mu S_0 \sqrt{2g\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{p_c}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{k-1}{k+1}\right)}, \qquad (2)$$

где S_0 — площадь отверстия истечения; p_c, T_c — соответственно, давление и температура сжатого воздуха в камере перед отверстием; p — давление сжатого воздуха в камере за отверстием; k — отношение удельных теплоемкостей; g — ускорение

силы земного притяжения; R — газовая постоянная; μ — коэффициент расхода,

$$\mu = \mu_v \mu_c^*; \tag{3}$$

μ_v — коэффициент, учитывающий неравномерность поля скоростей в поперечном сечении струи; μ_c — коэффициент сжатия струи.

Уравнение (1) выведено для случая истечения сжимаемой жидкости через отверстие в тонкой стенке при отсутствии внешнего теплообмена. Поэтому применение этой зависимости для расчета истечения сжатого воздуха через сложную систему распределительных каналов пневматического молотка имеет условный характер. Такая система заменяется некоторым эквивалентным отверстием, аэродинамические свойства которого при течении сжатого воздуха дают такой же эффект. При этом μ в формулах (1) и (2) получает другой физический смысл и может быть выражено в виде

$$\mu = \frac{G_д}{S_0 c_т}, \tag{4}$$

где $G_д$ — действительный расход воздуха через распределительное устройство; S_0 — площадь сечения эквивалентного отверстия; $c_т$ — теоретическая массовая скорость воздуха в сечении эквивалентного отверстия,

$$c_т = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{p_c}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_c}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_c}\right)^{\frac{k+1}{k}}}. \tag{5}$$

Как следует из вида зависимости (4), множитель μ играет в ней роль некоторого коэффициента согласования с опытом.

Опытное определение расходных характеристик распределительных устройств пневматических молотков $G_д = \psi\left(\frac{p}{p_c}\right)$ производилось на специальной установке (рис. 1). Сжатый воздух из трубопровода *4* через запирающий вентиль *5* и нормальную диафрагму *7* поступает к входной футорке пневматического молотка *11*. Последний установлен в раме *1* и закреплен специальным пневматическим прижимом *2*. При этом передний торец молотка упирается в специальную прокладку сальника *12*, через который проходит стержень *14*, жестко связанный с

* Гинзбург И. П. Прикладная гидрогазодинамика. Изд. ЛГУ, 1958.

поршнем пневматического молотка. Поршень молотка при продувке распределительного устройства удерживается в неподвижном состоянии и играет роль регулирующего пробкового крана, так как, перекрывая определенную площадь выпускных

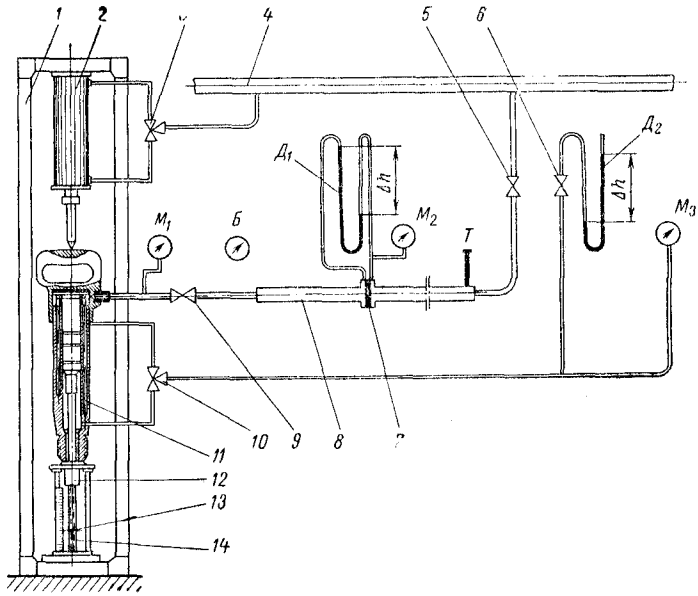


Рис. 1. Стенд для опытного определения статических расходных характеристик пневматических молотков

каналов, определяет расход воздуха через распределительное устройство. Для фиксации поршня в заданном положении служит винтовое устройство, снабженное лимбом с нониусным отсчетом *13*. Давление сжатого воздуха на входе в молоток регулируется краном *9* и замеряется образцовым манометром M_1. Давление сжатого воздуха в полостях цилиндра, куда истекает сжатый воздух, регулируется положением поршня относительно выпускных отверстий и измеряется манометром M_3 (или дифференциальным манометром $Д_2$ в случае малых давлений). Расходомерная труба *8* с нормальной диафрагмой *7*, дифференциальный манометр $Д_1$, ртутный термометр *Т* и манометр M_2 служат для измерения массового расхода сжатого воздуха.

Среднеквадратичная относительная погрешность измерения расхода $\sigma = 1{,}06 - 1{,}49\%$, а соответствующая погрешность измерения отношения давлений $\frac{p}{p_c}$ не превышала $\sigma = 0{,}47\%$. Поэтому при графической обработке результатов опыта точки кривой, определенные с относительной погрешностью, превышающей среднее значение максимальной погрешности в интервале измерений $\Delta = 3{,}5\%$, из рассмотрения исключались.

Было произведено опытное определение статических расходных характеристик клапанных и золотниковых распределительных устройств пневматических отбойных молотков конструкции завода «Пневматика». Определялись статические расходные характеристики воздухораспределения при истечении сжатого воздуха из пневматической сети в верхнюю и нижнюю полости цилиндра при постоянном давлении воздуха в сети

$$G_{д1} = \psi_1\left(\frac{p_1}{p_c}\right) \text{ и } G_{д2} = \psi_2\left(\frac{p_2}{p_c}\right),$$

а также расходные характеристики выпускных отверстий при истечении сжатого воздуха из полости цилиндра в атмосферу.

При проведении всех опытов давление в полости цилиндра задавалось так, чтобы отношения давлений $\frac{p_1}{p_c}$ и $\frac{p_2}{p_c}$ изменялись через каждые 0,05, а в пределах $1{,}0 > \frac{p}{p_c} > 0{,}9$ — через 0,025. Для каждой рабочей точки расходной характеристики принималось три замера.

На рис. 2 изображены экспериментальные статические расходные функции воздухораспределительных устройств отбойных молотков завода «Пневматика», определяемые по формуле

$$\Phi\left(\frac{p}{p_c}\right) = \frac{G_д}{S_0 p_c \sqrt{\frac{g}{RT_c}}}, \qquad (6)$$

где $G_д$ — величина действительного массового расхода сжатого воздуха через распределительное устройство пневматического молотка; S_0 — площадь характерного сечения воздухораспределительного тракта (для сопоставимости результатов величина S_0 принята равной площади проходного сечения футорки отбойного молотка, одинаковой для всех молотков, $S_0 = 1{,}77$ *см*^{2}).

Всем кривым на рис. 2 свойственно монотонное возрастание по мере уменьшения отношений давлений $\left(\text{увеличения } 1-\frac{p}{p_c}\right)$, т. е. ни в одном сечении воздухораспределительного устройства не достигается местная скорость звука. Такой характер установившегося течения можно объяснить особенностями устройства воздухораспределения пневматических молотков. Воздухораспределительное устройство их состоит из ряда воздушных емкостей, разделенных местными сужениями. В таком канале устанавливается массовый расход воздуха, зависящий от отношения давлений в смежных емкостях. В свою очередь, давление сжатого воздуха в промежуточных емкостях зависит от соотношения эффективных площадей местных сужений, разделяющих эти емкости. Если рассматривать такую схематизацию воздухораспределительного тракта, становится вполне объяснимой качественная природа полученных закономерностей. Последовательный рост $G_д$ при отношениях давлений в полости цилиндра и в сети ниже критических объясняется тем, что в отдельных сужениях истечение происходит при отношениях давлений выше критических.

Для проверки сделанных предположений были произведены расчеты. Воздухораспределительный тракт отбойного молотка при истечении воздуха в верхнюю полость цилиндра был схематически представлен в виде двух сужений (пусковой и распределительный клапаны), разделенных промежуточной емкостью (рис. 3, *а*). Относительно течения сжатого воздуха через каналы распределительного устройства было принято: а) воздух через местные сужения протекает без теплообмена со стенками канала (адиабатическое истечение); б) температура сжатого воздуха в междроссельной камере $T_в$ равна температуре воздуха в сети T_c и в верхней полости цилиндра T_1; в) кинетической энергией воздуха на входе в молоток и в междроссельной камере пренебрегаем.

Тогда массовое количество воздуха, протекающего через первое сужение,

$$G_1 = S_{01}\sqrt{2g\frac{k}{k-1}}\cdot\frac{p_c}{\sqrt{RT_c}}\sqrt{\left(\frac{p_b}{p_c}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p_b}{p_c}\right)^{\frac{k+1}{k}}},$$

через второе сужение

$$G_2 = S_{02}\sqrt{2g\frac{k}{k-1}}\cdot\frac{p_b}{\sqrt{RT_в}}\sqrt{\left(\frac{p_1}{p_b}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p_1}{p_b}\right)^{\frac{k+1}{k}}}.$$

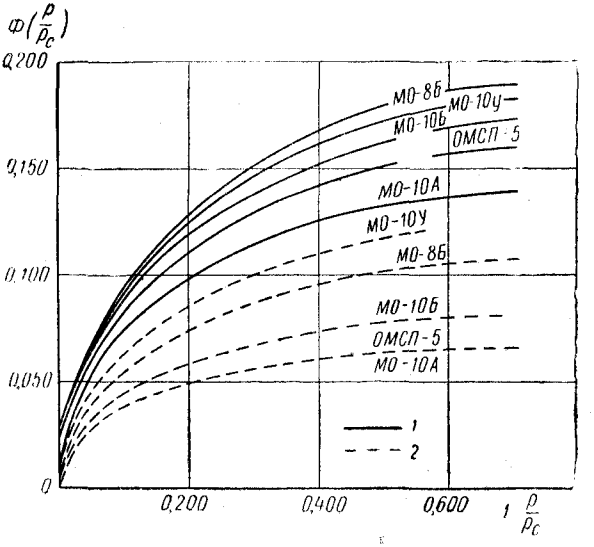


Рис. 2. Статические расходные характеристики пневматических молотков завода «Пневматика» при истечении сжатого воздуха в верхнюю (*1*) и нижнюю (*2*) полости цилиндра

При установившемся течении воздуха

$$G_1 = G_2 = G,$$

или

$$S_{01}p_c\sqrt{\left(\frac{p_b}{p_c}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_b}{p_c}\right)^{\frac{k+1}{k}}} = S_{02}p_b\sqrt{\left(\frac{p_1}{p_b}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_b}\right)^{\frac{k+1}{k}}}. \qquad (7)$$

Обозначим

$$\frac{p_1}{p_c} = \varepsilon = \varepsilon_1\varepsilon_2; \quad \varepsilon_1 = \frac{p_b}{p_c}; \quad \varepsilon_2 = \frac{p_1}{p_b}$$

и представим выражение (7) в виде

$$\left(\frac{S_{01}}{S_{02}}\right)^2 \frac{\varepsilon_1^{\frac{2}{k}} - \varepsilon_1^{\frac{k+1}{k}}}{\varepsilon_1^2} = \varepsilon_2^{\frac{2}{k}} - \varepsilon_2^{\frac{k+1}{k}}. \qquad (8)$$

Решение уравнения (8) для различных значений $\frac{S_{01}}{S_{02}}$ приведено в работе Л. А. Залманзона.* Результаты вычислений для случая истечения сжатого воздуха в верхнюю полость цилиндра отбойного молотка МО-10У ($S_{01}=0{,}785$; $S_{02}=1{,}13$ $см^2$) при сетевом давлении $p_c=5$ $кГ/см^2$ (абс) приведены на рис. 3, *б*.

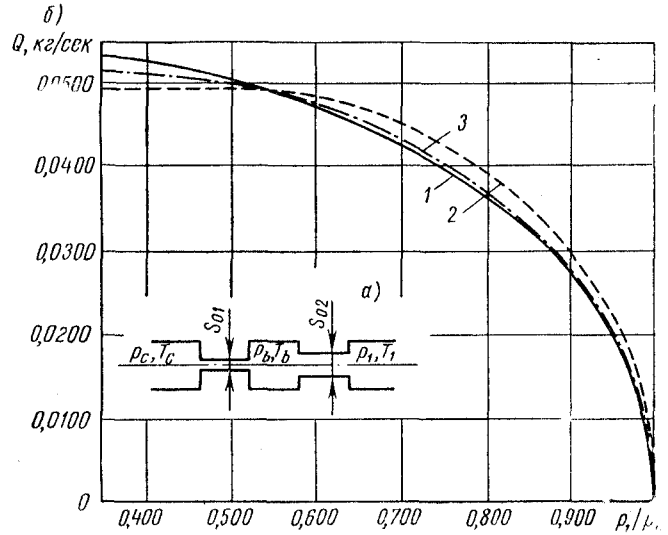


Рис. 3. Сравнение теоретической и действительной расходных характеристик пневматического отбойного молотка МО-10У при сетевом давлении 5 *ата*:

1 — теоретическая кривая; *2* — теоретическая кривая истечения через единичное отверстие; *3* — экспериментальная кривая

На этом рисунке изображены графики расчетной и действительной зависимости расхода воздуха от отношения давлений в верхней полости цилиндра к сетевому давлению, а также приведена кривая расхода воздуха, рассчитанная в предположении, что воздухораспределительный канал заменен некоторым единичным отверстием с эффективной площадью μS_0. Величина эффективной площади эквивалентного отверстия определена в предположении равенства расчетного и действительного расходов при критическом отношении давлений

* Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. Изд. АН СССР, 1961.

$\varepsilon_{кр} = \frac{p_1}{p_c} = 0{,}528$. Как следует из приведенных графиков (рис. 3, *б*), расчетное значение расхода, вычисленное на основании приведенной выше схематизации, хорошо совпадает с экспериментальными значениями.

Расходные характеристики выхлопных каналов пневматических отбойных молотков с известной степенью приближения можно выразить уравнением (1), что объясняется сравнительно небольшой их протяженностью. В уравнении (1) величина μ, вычисленная по формуле (4), получается переменной, зависящей от отношения давления $\frac{p}{p_c}$, однако пределы изменения невелики и ее можно принимать равной постоянному среднему значению на некотором интервале изменения $\frac{p}{p_c}$. Средние значения коэффициентов расхода выхлопных окон пневматических отбойных молотков завода «Пневматика» следующие:

Молоток	ОМСП-5	МО-10А	МО-8Б	МО-9У
S_0, *см*^{2}	2,31	2,31	3,02	1,15
μS_0, *см*^{2}	1,57	1,52	2,12	0,64
μ	0,68	0,66	0,70	0,56

Выводы

1. Статические расходные характеристики воздухораспределительных устройств пневматических отбойных молотков нельзя заменить без значительной погрешности расходными характеристиками эквивалентного отверстия — формула (1). Относительная погрешность определения расхода в результате такой замены может достигать 20% и зависит от интервала и способа осреднения μ, рассчитываемого по формуле (4). Для расчета массообмена сжатого воздуха через распределительные устройства отбойных молотков следует пользоваться экспериментальными расходными характеристиками (рис. 2).

2. Расходные характеристики выхлопных окон могут быть рассчитаны по формуле (1), с учетом осредненных экспериментальных значений коэффициентов расхода.

3. Статические расходные характеристики пневматических молотков можно определить расчетным путем, заменяя воздухораспределительный тракт молотка сочетанием воздушных емкостей, разделенных дросселями (рис. 3). Эффективные площади μS_0 промежуточных дросселей должны быть определены в этом случае экспериментально по результатам продувки от-

дельных элементов воздухораспределительного устройства молотка. Так как эти элементы в современных конструкциях молотков большей частью унифицированы, то такой путь открывает возможность получения расходных характеристик пневматических молотков по небольшому числу однажды определенных расходных характеристик отдельных элементов воздухораспределения этих машин.