

УДК 622.233.5

**РАБОТА КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО КЛАПАНА
В ПНЕВМОУДАРНОМ ПРИВОДЕ**

А. М. Петреев, А. Ю. Примычкин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: 808@nn.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Описываются результаты стендовых и расчетных экспериментов по определению влияния параметров кольцевого упругого клапана (КУК) на изменение среднего давления в клапанной щели при срабатывании КУК. Полученная информация позволяет уточнить расчетную модель КУК и скорректировать форму поперечного сечения упругого кольца с учетом установленных закономерностей.

Пневмоударная машина, упругий клапан, расчетная схема, клапанная щель, среднее давление

Внимание к кольцевому упругому клапану как элементу системы управления автоколебательным режимом работы пневмоударного привода обусловлено его конструктивными достоинствами — простотой, компактностью, высокой пропускной способностью при малом ходе. Он хорошо вписывается в конструкцию машины [1–3], однако примеров его успешного применения мало, поскольку, помимо прочего, расчет на стадии проектирования не может гарантировать устойчивую работу системы с КУК. Расчетная модель требует дальнейшего развития.

Вопросы, связанные с работой клапанных устройств в пневмомашинках затрагиваются во многих публикациях [4–9]. Первые подходы к расчету непосредственно КУК сделаны в работе [10], где рассматривается проточная камера с дросселем постоянного сечения и постоянным давлением на входе. Упругий клапан размещен на выходе из нее. Участие КУК в формировании течения газа через камеру представлено принятым допущением, согласно которому прикрытие проходного сечения КУК прямо пропорционально перепаду давления на клапане:

$$F = F_0(1 - \Delta p / \Delta p'), \quad \Delta p = p_1 - p_2, \quad (1)$$

где $\Delta p'$ — значение перепада Δp , при котором желателен срабатывание КУК; F_0 — проходное сечение КУК при полном открытии; p_1 — давление в проточной камере перед КУК; p_2 — давление в камере за клапаном.

Геометрические параметры и механические свойства реального упругого клапана здесь не фигурируют. По существу, рассмотрен вопрос: при каких соотношениях давлений p_1 и p_2 может закрыться гипотетический КУК, который удовлетворяет условию (1). Однако обоснованность этого условия и его связь с характеристиками реального упругого кольца не известны.

В работе [11] рассмотрена задача построения расчетной модели КУК, совместимой с расчетной моделью пневмоударного привода. Специфика в том, что все элементы механической системы привода описываются уравнениями динамики материальной точки, т. е. центров масс

подвижных звеньев, тогда как центр масс КУК при его срабатывании остается неподвижным. Разработанная базовая расчетная модель КУК снимает это противоречие и описывает движение КУК с учетом действующих на него сил и основных параметров клапана (масса, упругость, размеры и т. д.). Согласно ей, уравнение движения клапана с приведенной массой m имеет вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= S_1 p_1 - S_2 p^* - kx - F_t \operatorname{sign} \dot{x} - n\mu\dot{x}, \\ m &= r_0 s_0 \rho, \quad S_1 = br(1 - Z), \quad S_2 = br(1 + Z), \\ k &= Es/r, \quad F_t = (p_1 - p_2)rhf, \quad \mu = \sqrt{km}, \end{aligned} \quad (2)$$

ρ — плотность материала клапана; r — радиус инерции сечения клапана; f — коэффициент трения в паре “клапан–опорный бурт”; F_t — сила трения клапана о бурт; $s = bh$, $Z = h/2r$ — для клапана прямоугольного сечения, $s = \pi r_k^2$, $Z = \pi r_k / 4r$ — для клапана круглого сечения; при $n = 1$ вязкое демпфирование в 2 раза меньше критического. Смысл остальных параметров ясен из расчетной схемы, приведенной на рис. 1. Если КУК полностью открыт, то $x = 0$, если закрыт, то $x = \delta$. Здесь и везде в дальнейшем фигурируют не абсолютные значения давлений, а избыточные (технические).

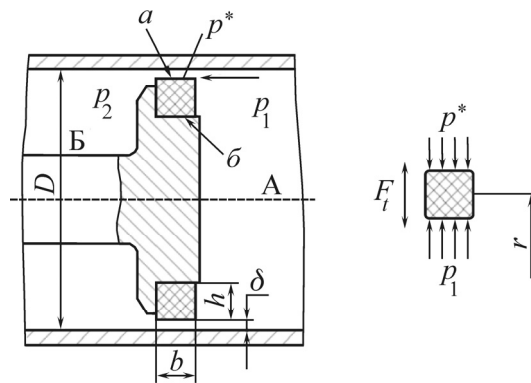


Рис. 1. Расчетная схема КУК: b — ширина клапана; h — высота клапана; D — внутренний диаметр цилиндра

Срабатывание КУК, т. е. открытие или закрытие кольцевого канала из камеры А в камеру Б, определяется соотношением сил давления сжатого воздуха на наружную (a) и внутреннюю (b) поверхности кольца, а также силы упругости, возникающей при его растяжении. В качестве первого приближения в базовой модели принято, что в проходном сечении на поверхности a действует усредненное по ширине кольца b давление p^* , равное среднему арифметическому от давлений p_1 и p_2 — до и после КУК. Для кольца круглого сечения (в силу симметричности выпуклого профиля, ограничивающего щель) такое допущение, на первый взгляд, может показаться естественным. Применительно к иным случаям, например при прямоугольном профиле, такого сказать нельзя. Чтобы достоверно знать значение p^* , необходимо иметь картину распределения давления по всей длине b клапанной щели.

КОЛЬЦЕВОЙ УПРУГИЙ КЛАПАН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Рассмотрим вариант КУК с прямоугольным профилем. Его достоинство обусловлено возможностью изготовления кольца не только методом горячей вулканизации в специальной форме, но и точением и высечкой. Последовательное измерение давления в точках кольцевого канала по ходу потока по всей ширине b кольца проводилось на стенде, схема и общий вид которого представлены на рис. 2.

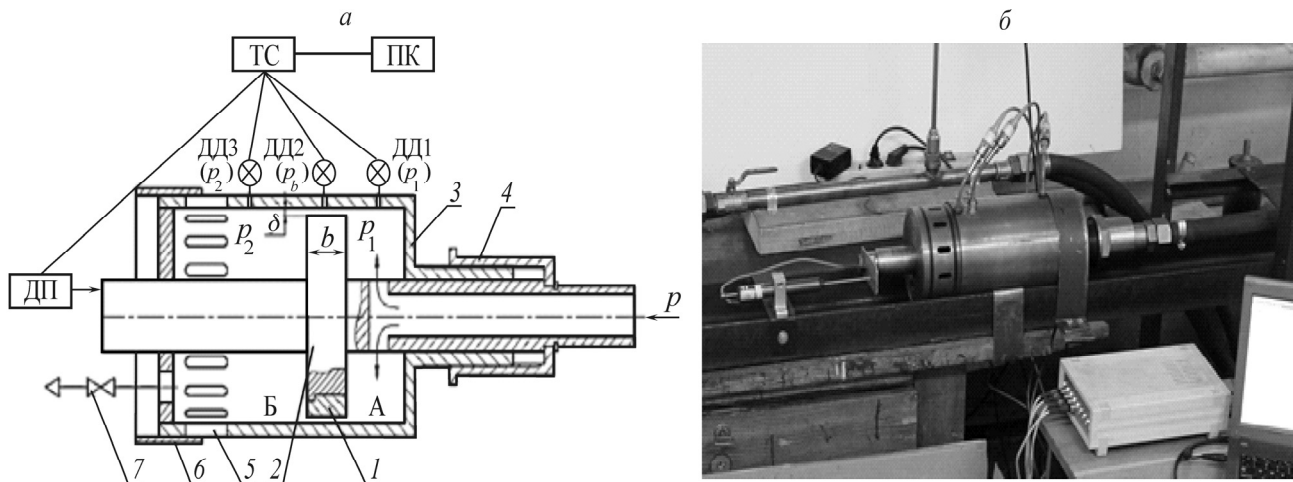


Рис. 2. Схема (а) и общий вид (б) экспериментального стенда

Как видно на схеме, зазор δ , определяющий проходное сечение канала, задается сменными кольцами 1 разной толщины, которые устанавливаются на поршне 2 . С помощью гайки 4 поршень может перемещаться в цилиндре 3 . При движении поршня мимо измерительного канала датчика давления ДД2 (P8AP, HBM) пошагово регистрируется давление p_b в зазоре δ , а также с помощью датчика перемещения ДП (LPS-100, Dacell) — осевая координата поршня. Для преобразования и регистрации сигналов датчиков используются тензостанция ТС (A17-T8, ZET) и ПК (Samsung R428). Давление p_1 в предклапанной камере контролируется датчиком ДД1, давление p_2 в камере за клапаном — датчиком ДД3. Для изменения давления p_2 в боковых стенках цилиндра 3 предусмотрены окна 5 , которые могут перекрываться кольцевой заслонкой 6 , а также кран 7 , который используется при полном перекрытии окон 5 . Такая установка позволяет изменять кольцевой зазор δ , ширину кольца b , перепад давления на кольце и измерять давление в любой точке по ширине кольца.

Наряду с измерениями на стенде, распределение давления определялось расчетным путем с помощью программного продукта Solid Works с приложением Flow Simulation. Это позволило получить данные для тех соотношений p_1 и p_2 , которые ввиду ограниченности производительности источника питания не могли быть реализованы на данном стенде. В первую очередь это относится к вариантам, когда $\delta > 1.5$ мм.

В качестве характерного примера сопоставления расчетных и стендовых экспериментов на рис. 3 приведены кривые распределения давления, полученные при одинаковых условиях двумя этими способами. Расхождения между значениями среднего давления p^* , полученными на основе стендовых и расчетных экспериментов, не превышают 5 %.

Эксперименты проводились с учетом особенностей функционирования КУК [11], обусловленных тем, управляет КУК впуском сжатого воздуха в рабочую камеру или выпуском из нее. Если клапан работает на впуске, то для снижения потерь энергоносителя подачу в рабочую камеру КУК должен прекратить с упреждением или минимальным запаздыванием относительно момента, когда выпускное устройство откроет выпуск из этой камеры. На практике это означает, что срабатывание такого клапана должно происходить в условиях, когда давление p_1 в подводящей камере А (см. рис. 1) близко к магистральному $p_m = 0.6$ МПа, а перепад $\Delta p = p_1 - p_2$ не превышает 0.3 МПа.

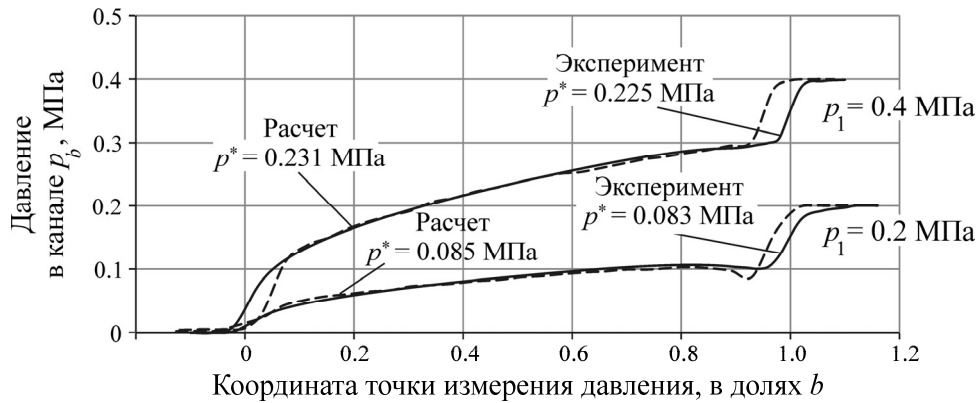


Рис. 3. Сопоставление распределений давления по длине b кольцевого канала, полученных при расчетном и стендовом экспериментах: $\delta = 1$ мм

Если КУК управляет выпуском, то применительно к схеме на рис. 1 камера Б является выпускной и давление p_2 в ней всегда близко к атмосферному, а p_1 — давление в рабочей камере. Исходя из этих особенностей, рассмотренная область значений параметров p_1 и p_2 в экспериментах ограничена условием: для впускного КУК $p_1 = 0.6$ МПа, $p_2 = 0.2 - 0.5$ МПа; для выпускного КУК $p_2 = 0$, $p_1 = 0.1 - 0.6$ МПа.

Ширина кольцевого канала δ менялась от 0.04 до 2 мм, ширина кольца b — от 15 до 25 мм. Диаметр измерительных каналов в стенке цилиндра 1 мм. Диаметр цилиндра 128 мм.

В рамках принятых ограничений решалась задача определения эмпирической функции, позволяющей вычислять среднее значение давления p^* в канале над КУК в зависимости от ширины канала δ и перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2$. Полученная при стендовых и расчетных экспериментах информация формировалась в виде таблиц и графиков распределения давления в канале.

На рис. 4 в качестве примера представлены характерные кривые изменения давления p_b по ширине кольца b прямоугольного сечения выпускного КУК при разных значениях ширины канала δ и разных перепадах давления $\Delta p = p_1 - p_2$. В результате обработки этой информации сформирован массив значений p^* , соответствующий области изменения исходных параметров для КУК, работающих на выпуске и на впуске.

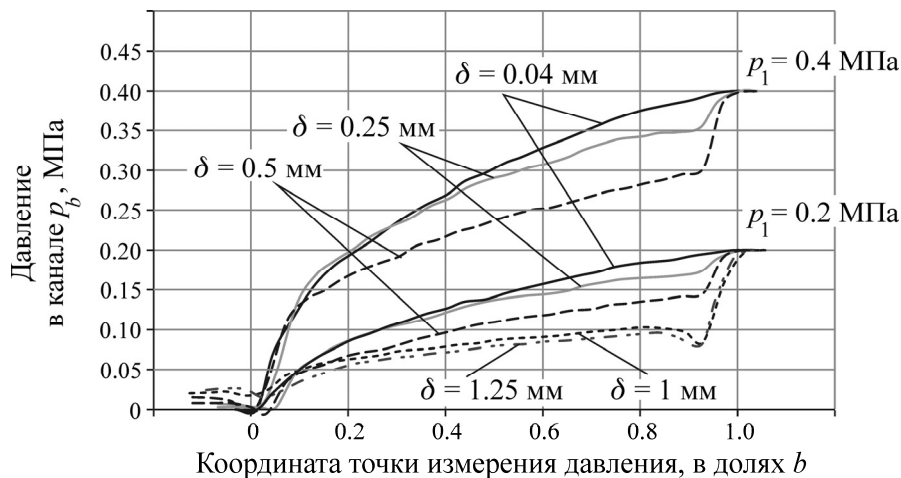


Рис. 4. Характер изменения давления p_b по длине канала b при различных значениях давления p_1 на входе и при различной ширине канала δ (выпускной КУК прямоугольного сечения)

Для удобства обработки полученных данных введен параметр

$$k = 2(p^* - p_2) / \Delta p. \quad (3)$$

Он может служить некоторым показателем отклонения истинного значения среднего давления p^* от значения p_{ca}^* , подсчитанного как среднее арифметическое $p_{ca}^* = (p_1 + p_2) / 2$. Подставив его в (3), имеем:

$$p^* = kp_{ca}^* + p_2(1 - k). \quad (4)$$

При $k = 1$ истинное среднее значение равно среднему арифметическому: $p^* = p_{ca}^*$.

На рис. 5 показаны результаты обработки зависимостей $k(\delta, \Delta p)$ для выпускного КУК прямоугольного сечения.

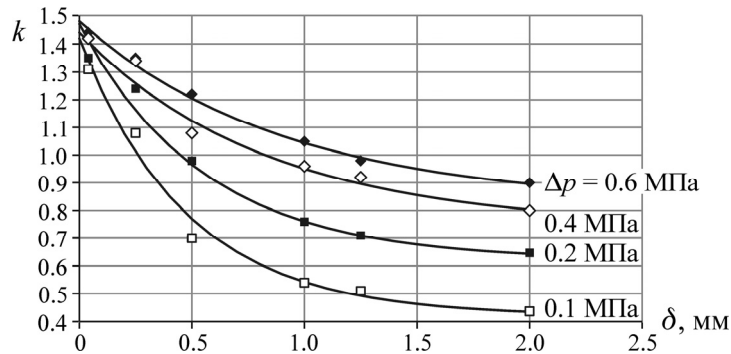


Рис. 5. Зависимость параметра k от ширины канала δ и перепада давления p на выпускном клапане

Точками разной формы обозначены экспериментальные значения k , соответствующие различным сочетаниям δ и Δp . Семейство аппроксимирующих кривых приемлемо описывается уравнением вида

$$k(\delta, \Delta p) = A + Be^{-C\delta}, \quad (5)$$

где A , B и C — переменные коэффициенты:

$$\begin{aligned} A &= 0.27 + 1.84\Delta p - 1.5\Delta p^2, \\ B &= 1.14 - 1.6\Delta p + 1.3\Delta p^2, \\ C &= 2.57 + 4.8\Delta p + 3.8\Delta p^2, \\ 0.04 &\leq \delta \leq 2, \quad 0.1 \leq \Delta p \leq 0.6. \end{aligned} \quad (6)$$

Кривые функций для коэффициентов A , B , C представлены на рис. 6. Погрешность аппроксимации не превышает 5 %.

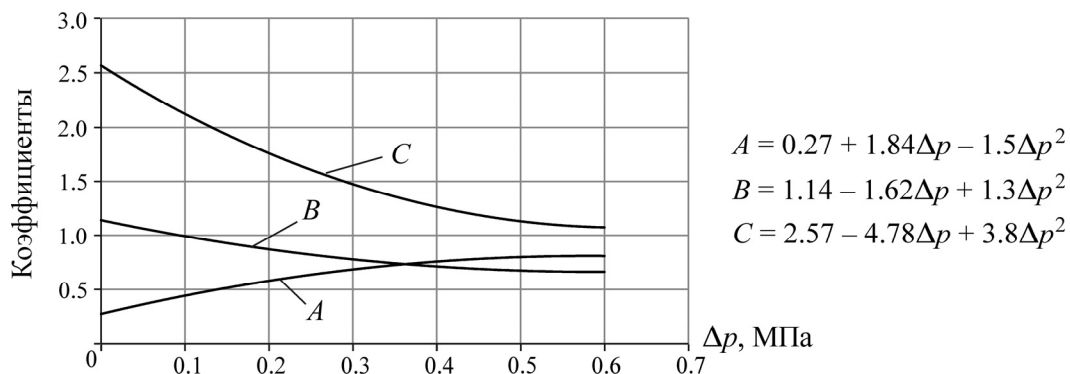


Рис. 6. Кривые функций A , B , C

Для КУК прямоугольного сечения, работающего на впуске в рабочую камеру, характер распределения давления p_b по ширине кольца (длине канала) b иллюстрируют кривые на рис. 7.

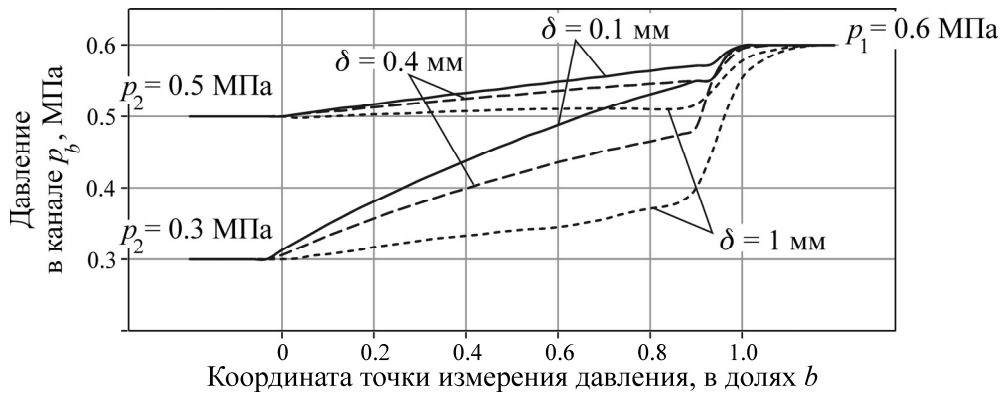


Рис. 7. Характер изменения давления p_b по длине канала b впускного клапана

Функция $k(\delta, \Delta p)$ для впускного клапана представлена на рис. 8. Видно, что в данном случае изменение перепада в диапазоне $0 < \Delta p \leq 0.2$ мало сказывается на значениях k . При переходе от $\Delta p = 0.2$ на уровень $\Delta p = 0.3$ и выше приращение k становится существенным.

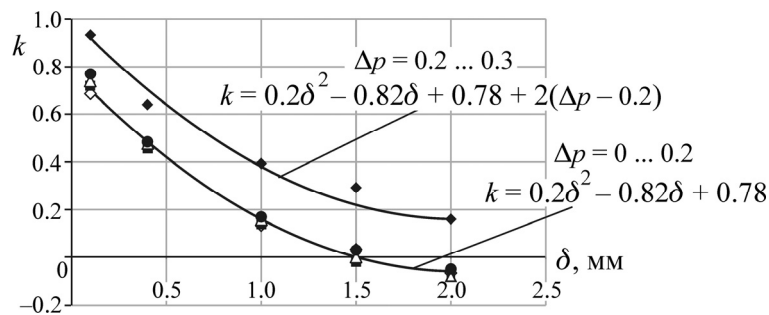


Рис. 8. Зависимость k от ширины канала δ и перепада давления на впускном клапане

Такое явление может быть связано с изменением характера течения в канале. Учитывая, что для впускного КУК рабочий диапазон давлений ограничен уровнем $\Delta p = 0.3$, для практических целей функция $k = f(\delta, \Delta p)$ может быть записана следующим образом:

$$k = k_1(\delta) + k_2(\Delta p), \tag{7}$$

$$k_1(\delta) = 0.78 - 0.82\delta + 0.2\delta^2, \tag{8}$$

$$k_2(\Delta p) = \begin{cases} 0, & 0 < \Delta p \leq 0.2, \\ 2(\Delta p - 0.2), & 0.2 < \Delta p \leq 0.3. \end{cases}$$

В диапазоне $0 < \Delta p \leq 0.2$ зависимость $k(\delta, \Delta p)$ аппроксимируется одной кривой. В промежутке $0.2 < \Delta p \leq 0.3$ используется линейная интерполяция.

Формулы (4)–(7) вписываются в расчетную модель (2) и позволяют с приемлемой для практики достоверностью охарактеризовать работу КУК прямоугольного сечения. Не претендуя на полноту учета всех действующих факторов, они раскрывают существование эффекта, учет которого имеет важное практическое значение. Речь идет о нарастающем увеличении среднего давления в канале по мере закрытия клапана (см. рис. 5 и рис. 8). Это означает, что

при растяжении кольца, т. е. с уменьшением ширины канала δ , к упругому сопротивлению материала кольца добавляется действие дополнительной отрицательной обратной связи пневматического происхождения, что существенно влияет на работу КУК.

Практическую важность этого фактора продемонстрировали расчеты в рамках модели (2), (4)–(8). Они показали, что клапан прямоугольного сечения, спроектированный для работы в пневмоударной машине, не способен надежно перекрыть канал. Можно обеспечить лишь контакт с цилиндром, но без должного для полной герметизации прижатия. Также существует вероятность возникновения автоколебаний. Эксперименты на стенде подтвердили эту особенность. Например, рабочий клапан сечением 15×9 мм ($\delta = 2$ мм, диаметр цилиндра 128 мм, $\Delta p = 0.6$ МПа), который в пневмоударной машине четко срабатывает на открытие и закрытие, дает в закрытом состоянии протечку 0.45 м³/мин (при общем потреблении работающей машины 4.2 м³/мин).

КОЛЬЦЕВОЙ УПРУГИЙ КЛАПАН С ФАСКОЙ

Для повышения герметизации и улучшения срабатывания клапана на закрытие необходимо снизить среднее значение давления на наружную поверхность кольца. Это можно обеспечить за счет изменения ее формы, например сделав фаску со стороны выхода потока. Тогда продольное сечение канала приобретает форму расширяющегося сопла (рис. 9).

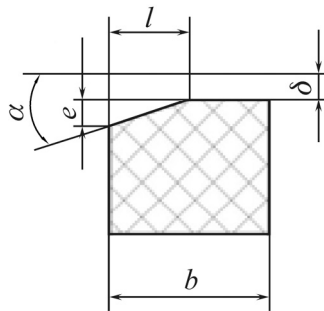


Рис. 9. Схема КУК с фаской

Как видно на рис. 5 и рис. 8, эффект торможения кольца прямоугольного сечения, вызываемый действием пневматической отрицательной обратной связи, усиливается с уменьшением перепада Δp и ширины канала δ . Наибольший интерес представляет возможность коррекции p^* при малых зазорах и перепадах давления. Например, изменение распределения давления вдоль канала, вносимое фаской, иллюстрируют экспериментальные кривые на рис. 10.

Обработка экспериментальных данных показала, что значение угла фаски α слабо влияет на изменение среднего давления в канале. На рис. 11а показано, что увеличение α с 3 до 10° приводит к изменению среднего давления не более чем на 3% . Угол более 10° применять нерационально, поскольку задняя кромка КУК может оказаться ниже опорного буртика. При $\alpha < 5^\circ$ затруднено формирование фаски точением.

В отличие от угла α , относительная длина фаски \tilde{l} ($\tilde{l} = l/b$) существенно влияет на среднее давление. С увеличением \tilde{l} среднее давление снижается, поскольку увеличивается поверхность, находящаяся под пониженным давлением. Однако при разных зазорах степень этого понижения различна. При большой клапанной щели, соответствующей моменту начала срабатывания на закрытие, влияние \tilde{l} мало. Например, изменение относительной длины \tilde{l} от 0.15 до 0.7 при $\delta = 1.5$ мм и перепаде $\Delta p = 0.1$ МПа приводит к понижению среднего давления не более чем на 5% (рис. 11б).

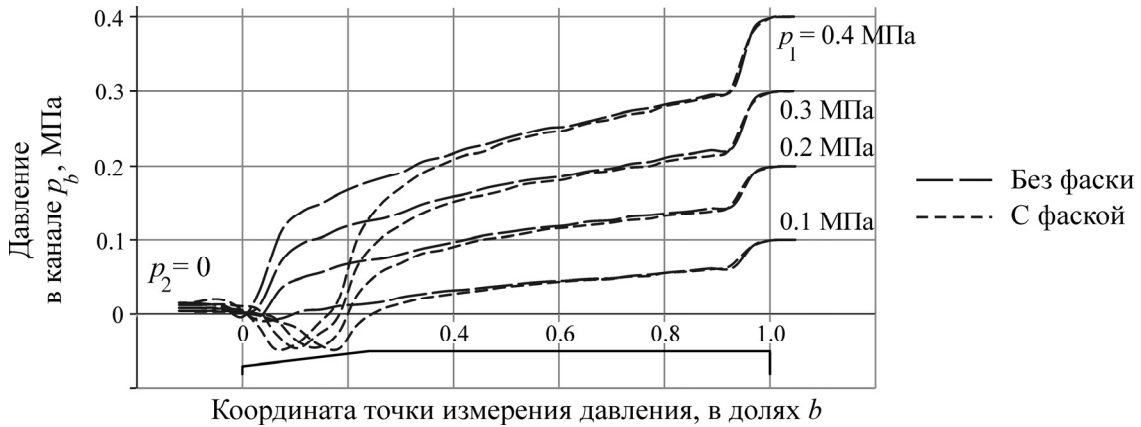


Рис. 10. Распределение давления в щели клапана без фаски и с фаской: $\delta = 0.5$ мм, $\alpha = 5^\circ$, $\tilde{l} = 0.25$

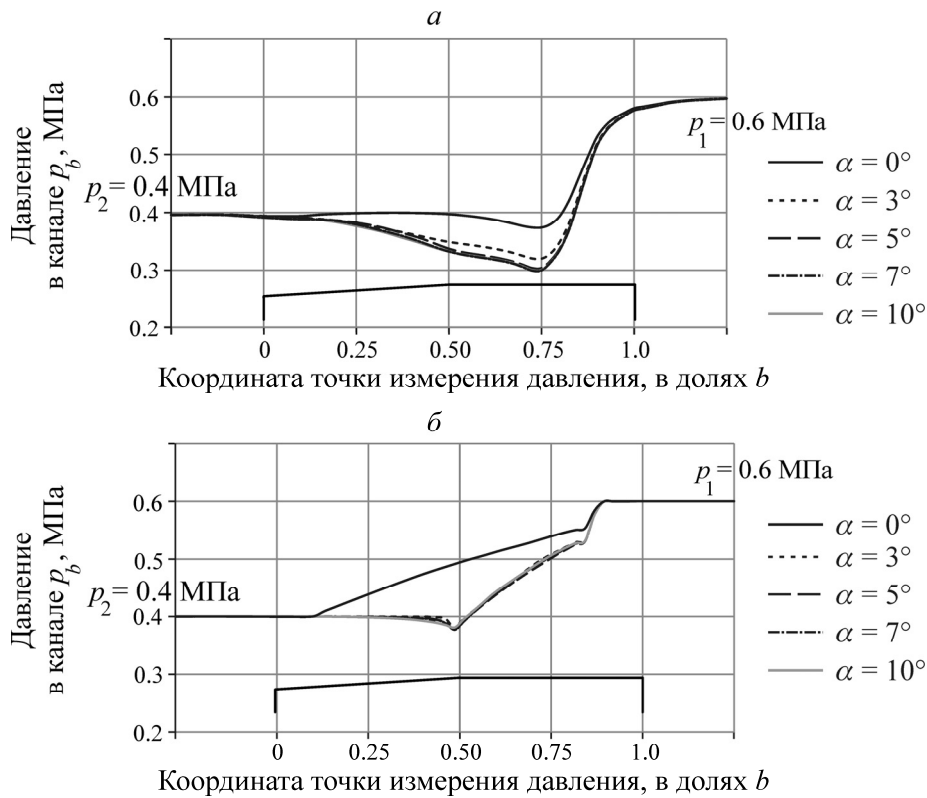


Рис. 11. Влияние угла фаски на распределение давления при перепаде $\Delta p = 0.2$ МПа и $\tilde{l} = 0.5$ в зависимости от размера щели клапана: а — $\delta = 1.5$; б — $\delta = 0.1$ мм

При малой щели (что соответствует моменту начала открытия) среднее давление в клапанной щели существенно снижается по мере увеличения длины фаски и роста перепада давления (рис. 12).

Для количественной оценки влияния фаски на изменение среднего давления введен коэффициент γ_ϕ . Он показывает, насколько изменяется среднее давление p_ϕ^* в щели клапана с фаской по сравнению со средним давлением p^* в щели клапана без фаски при тех же параметрах (зазор, перепад давления):

$$\gamma_\phi = (p_\phi^* - p_2) / (p^* - p_2). \tag{9}$$

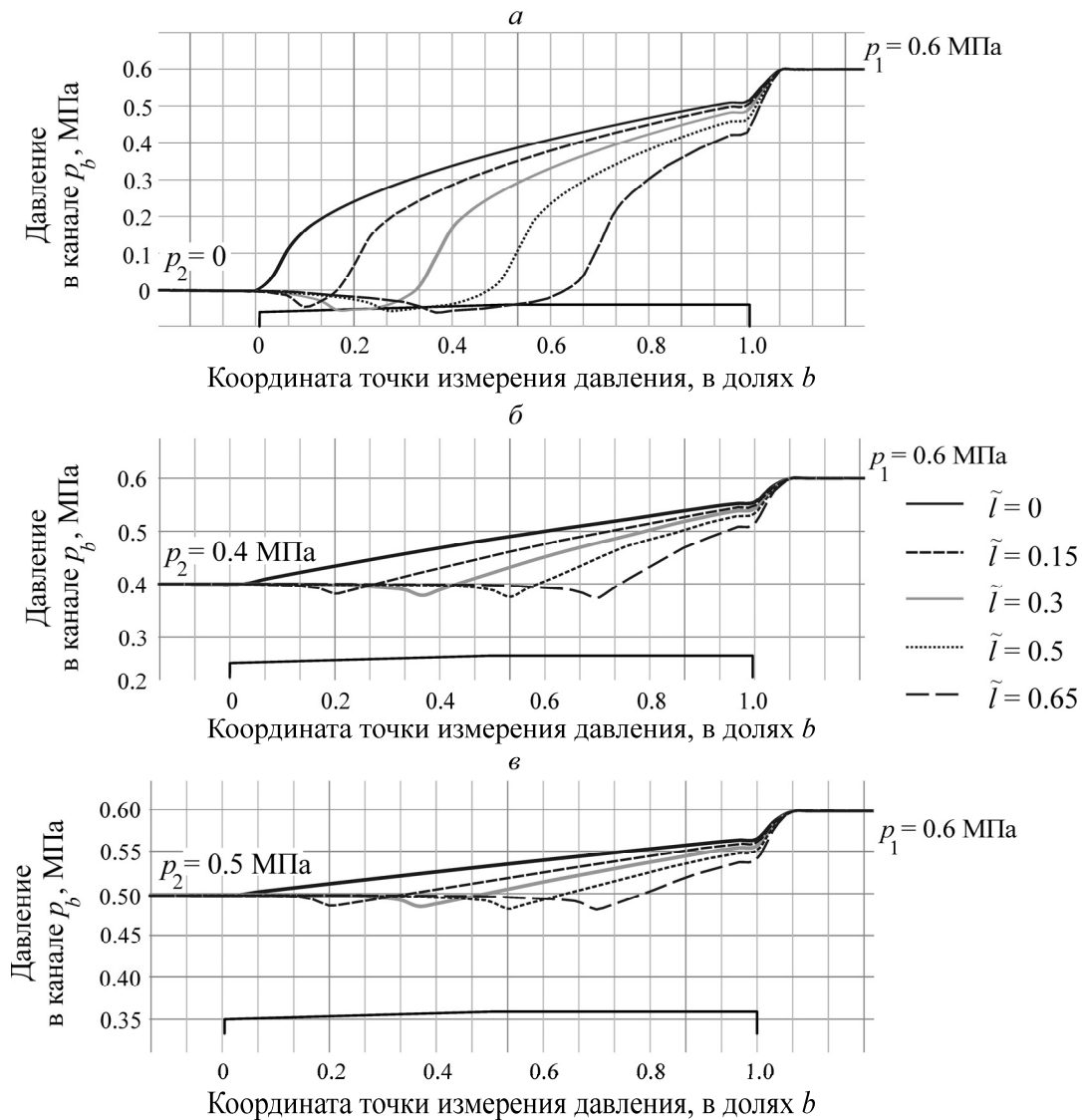


Рис. 12. Влияние длины фаски на распределение давления при перепаде 0.6 МПа (а), 0.2 МПа (б) и 0.1 МПа (в)

В результате обработки экспериментальных данных получена картина (рис. 13) изменения коэффициента γ_ϕ в зависимости от \tilde{l} и Δp при минимальной ширине клапанной щели $\delta = 0.1$ мм. Аппроксимирующая функция имеет вид

$$\gamma_\phi(\tilde{l}, \Delta p) = 1 - (1.1 - 0.02\Delta p)\tilde{l}, \quad \tilde{l} = (0.15 \dots 0.70). \tag{10}$$

Видно, что Δp влияет слабо. Это позволяет использовать формулу

$$\gamma_\phi(\tilde{l}) = 1 - \tilde{l}. \tag{11}$$

Разница определения γ_ϕ по (10) и (11) не превышает 8 %.

С увеличением ширины канала δ относительная величина его расширения, обусловленного фаской, при прочих равных условиях снижается. Соответственно влияние фаски ощущается меньше. Степень влияния δ оценивается отношением

$$\xi = \gamma_\phi / \gamma_{\delta=0.1}, \tag{12}$$

где γ_δ — значение γ_ϕ при некоторой ширине δ ; $\gamma_{\delta=0.1}$ — значение γ_ϕ при $\delta = 0.1$ мм (при прочих равных условиях). Представленные на рис. 14 результаты обработки экспериментальных данных показывают, что характер влияния ширины канала δ на параметр ξ — линейный. Естественно, чем больше δ , тем меньше положительный эффект, вносимый фаской.

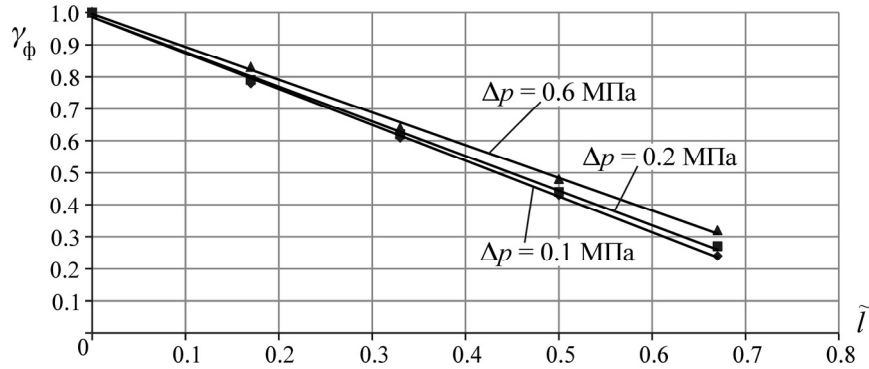


Рис. 13. Влияние относительной длины фаски и перепада давления на γ_ϕ ($\delta = 0.1$ мм)

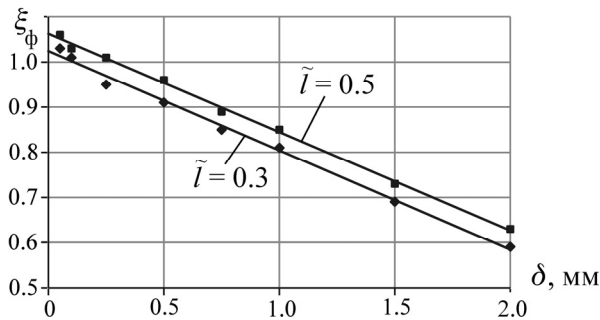


Рис. 14. Влияние зазора на изменение коэффициент ξ_ϕ

Разница в значении коэффициента ξ_ϕ при $\tilde{l} = 0.3$ и $\tilde{l} = 0.5$ составляет менее 5 %. Можно считать, что в этом диапазоне коэффициент влияния δ определяется по формуле

$$\xi_\phi = 1.05 - 0.2\delta. \quad (13)$$

Исходя из (11) и (13), общий эффект от влияния фаски с параметрами δ , \tilde{l} можно выразить так:

$$\gamma_\phi(\tilde{l}, \delta) = 1 - \tilde{l}\xi_\phi = 1 - \tilde{l}(1.05 - 0.2\delta). \quad (14)$$

Имея в виду (14), среднее давление в щели клапана с фаской будет определяться соотношением

$$p_\phi^* = k\gamma_\phi \frac{p_1 - p_2}{2} + p_2, \quad (15)$$

где k — коэффициент среднего давления в щели клапана без фаски; p_1 и p_2 — давление перед клапаном и за ним соответственно.

Результаты исследования КУК с фаской (КУК_ф) показывают, что введение фаски позволяет существенно повысить эффективность работы клапана, т. е. расширить диапазон настройки давлений его срабатывания и повысить герметичность перекрытия потока. Полученные эмпирические зависимости описывают (в рамках принятых ограничений) особенности поведения КУК_ф, которые заключаются в следующем:

- эффективность введения фаски возрастает с увеличением ее относительной длины \tilde{l} ,
- эффективность растет по мере уменьшения ширины клапанной щели δ , т. е. по мере закрытия КУК_ф;
- перепад давления на клапане слабо влияет на эффективность фаски $\gamma_{\text{ф}}$;
- изменение угла фаски в пределах от 3 до 10° на работу клапана практически не влияет.

Полученные результаты позволяют учесть в расчетной модели КУК дополнительные значимые факторы, повысить полноту и достоверность отражения процессов, происходящих в реальной системе. В качестве примера на рис. 15 представлены реальная и расчетная осциллограммы срабатывания КУК_ф ($b = 15$ мм, $l = 7$ мм, $h = 9$ мм). Клапан установлен на выходе из камеры постоянного объема. Зафиксировано начало процесса заполнения камеры сжатым воздухом и запираение клапаном выхода из нее в атмосферу.

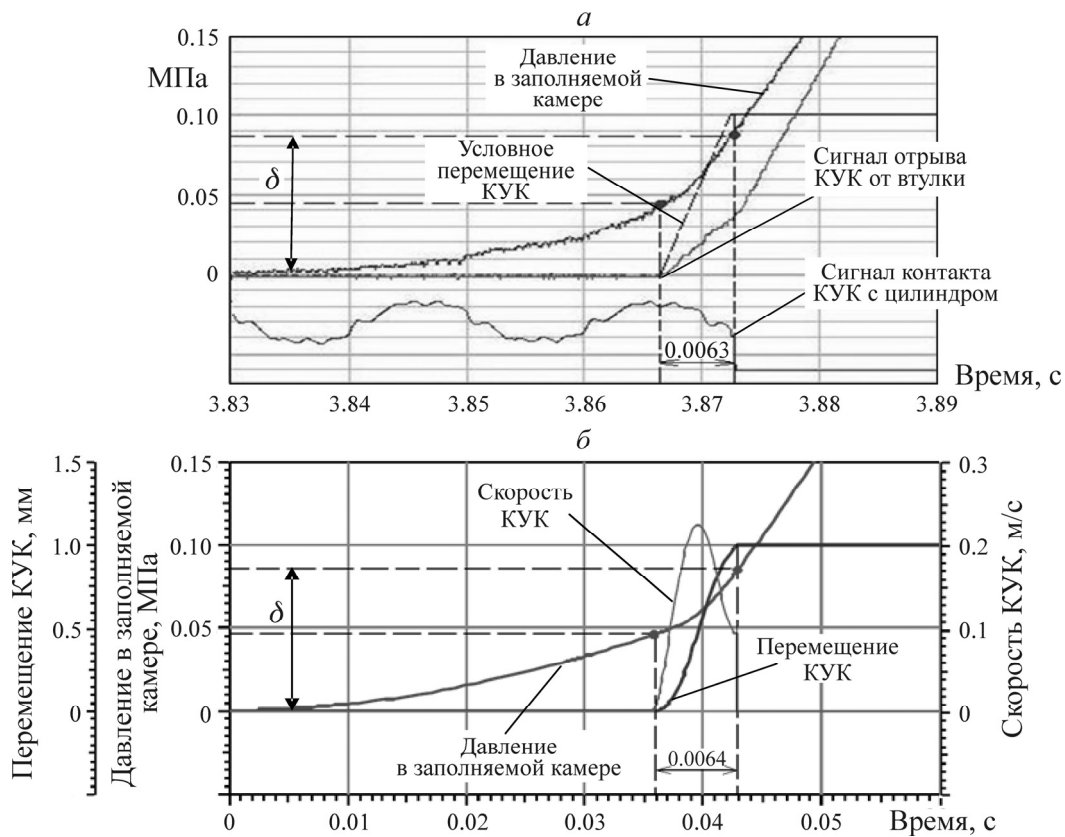


Рис. 15. Экспериментальная (а) и расчетная (б) осциллограммы, отражающие процесс закрытия КУК, установленного на выходе из камеры, которая заполняется сжатым воздухом

Сигналом отрыва клапана от оправки на осциллограмме реального процесса служит возрастание давления под клапаном, которое фиксируется датчиком. Нулевые показания датчика с момента начала заполнения камеры вплоть до отрыва КУК от поршня можно объяснить тем, что до подачи сжатого воздуха в камеру упругое кольцо в силу предварительного натяга плотно обжимает поршень и в податливый материал кольца вдавливаются кромка входного отверстия канала в поршне, связывающего его поверхность с рабочей полостью датчика. Вдавливание кромки отсекает эту полость от микрощели между КУК и поршнем. Так в полости “консервируется” атмосферное давление. “Откупоривание” полости происходит лишь в момент, когда нарастающее давление в микрощели между КУК и поршнем станет достаточным для отры-

ва клапана от поршня. Осциллограммы иллюстрируют вполне приемлемое совпадение расчетного и реального значений давления начала закрытия КУК_ф и окончание его движения, а также длительности процесса. На графиках перемещения и скорости КУК_ф видно, что с середины пути перемещение клапана замедляется и скорость его посадки в момент полного запираания канала вдвое меньше максимальной, наблюдаемой в середине хода, что отражает характер взаимодействия движущих сил, описываемых расчетной моделью.

ВЫВОДЫ

Получены эмпирические зависимости, позволяющие в рамках принятых допущений определить среднее давление p^* , действующее на наружную поверхность КУК строго прямоугольного сечения и прямоугольного с фаской.

Установлено, что при прочих равных условиях давление p^* возрастает по мере уменьшения ширины клапанной щели, что означает наличие дополнительной отрицательной обратной связи пневматического характера, действующей наряду с силой упругости и препятствующей закрытию КУК. Клапан прямоугольного сечения, обеспечивая работоспособность в принципе, не способен обеспечить отсутствие протечки через закрытую клапанную щель.

Показано, что создание на наружной поверхности КУК слабонаклонной фаски, обращенной по ходу потока, позволяет управлять срабатыванием клапана и протечкой через закрытый КУК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 848615 СССР. Пневматический ударный механизм / В. А. Гаун // Оpubл. в БИ. — 1981. — № 27.
2. Пат. 2105881 РФ. Устройство ударного действия / В. В. Червов, В. В. Трубицын, Б. Н. Смолянички, И. Э. Вебер // Оpubл. в БИ. — 1998. — № 6.
3. Пат. 2232242 РФ. Пневматическое ударное устройство / Патентообладатель ООО НПО “Трундо-маш”, СПб. // Оpubл. в БИ. — 2004. — № 19.
4. Захаренко С. Е. К вопросу о протечках газа через щели // Сборник трудов ЛПИ им. М. И. Калинина. — 1953. — № 2.
5. Захаренко С. Е. Экспериментальное исследование протечек газа через щели // Сборник трудов ЛПИ им. М. И. Калинина. — 1953. — № 2.
6. Суднишников Б. В., Есин Н. Н. Воздухораспределительные устройства пневматических машин ударного действия. — Новосибирск: ИГД СО АН, 1965.
7. Геде А. П. Влияние повышения давления на пропускную способность эластичного клапана // Повышение эффективности пневмоударных буровых машин. — Новосибирск: ИГД СО АН, 1987.
8. Петреев А. М., Примычкин А. Ю. Влияние типа системы воздухораспределения на энергетические показатели пневмоударного узла кольцевой ударной машины // ФТПРПИ. — 2015. — № 3.
9. Тимонин В. В. Погружные пневмоударники для подземных условий отработки месторождений // Горн. оборудование и электромеханика. — 2015. — № 2.
10. Гаун В. А. О пропускной способности воздухораспределения с упругим клапаном // Пневматические буровые машины. — Новосибирск: ИГД СО АН, 1984.
11. Петреев А. М., Воронцов Д. С., Примычкин А. Ю. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах // ФТПРПИ. — 2010. — № 4.

Поступила в редакцию 30/X 2015