

УДК 531.8, 532.1
PACS 51.35. + a, 89.20.Bb

Гидравлическое сопротивление системы управления движением инспекционного снаряда с клапаном обтекаемой формы в газопроводе низкого давления

Р. Р. Мугинов^{1†}, Д. А. Павлов², М. П. Пещеренко², С. Н. Пещеренко^{1‡},
А. В. Перминов^{1*}

¹ООО «ПСО «НефтеГазДиагностика», Москва

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

[†]muginov@gmail.com

[‡]peshcherenko@yandex.ru

^{*}perminov1973@mail.ru

При разработке инспекционных снарядов для газопроводов низкого давления необходимо решить проблему обеспечения его равномерного движения под действием перекачиваемого газа. В настоящей работе был предложен подход к ее решению, основанный на изменении сечения центрального проточного канала снаряда за счет перемещения аксиально симметричного клапана вдоль оси канала. Рассматриваются два вида клапанов с каплевидной (сферической) и конической формами передней части. Выбор формы и размера клапана может быть сделан путем расчета сил, действующих на снаряд при протекании газа. Задача решалась методами вычислительной гидродинамики в предположении аксиальной симметрии течения. Газ считали сжимаемым. В результате расчетов было выяснено, что суммарная сила, действующая на клапан и стенки проточного канала, не зависит от его формы и может в зависимости от положения клапана меняться более чем в два раза. При этом оптимальная длина каплевидного клапана почти в два раза меньше конического. Таким образом, каплевидный клапан, несмотря на большую неоднородность обтекающего потока, в сравнении с коническим клапаном является более приемлемым для регулирования потока газа через центральный канал инспекционного снаряда.

Ключевые слова: турбулентное течение; инспекционный снаряд; обтекание твердого тела.

Поступила в редакцию 27.06.2023; после рецензии 17.07.2023; принята к опубликованию 17.07.2023

Hydraulic resistance of an inspection projectile motion control system with a streamlined valve in a low-pressure gas pipeline

R. R. Muginov^{1†}, D. A. Pavlov², M. P. Peshcherenko², S. N. Peshcherenko^{2‡},
A. V. Perminov^{2*}

¹ PSO «NefteGasDiagnostika», Moscow, Russia

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

[†]muginov@gmail.com

[‡]peshcherenko@yandex.ru

^{*}perminov1973@mail.ru

The main problem while developing inspection shells for low-pressure gas pipelines is maintenance of their uniform motion under the action of the pumped gas. In the present work, we propose

a solution to this problem based on changing the cross-section of the central flow channel of the smart pig by moving an axially symmetric valve along the axis of the channel. Two types of valves with a drop-shaped and a cone-shaped front part were considered. The choice of the valve shape and size can be made by calculating the forces acting on the smart pig during gas flow. The problem was solved by the methods of computational fluid dynamics under the assumption of axial flow symmetry. The gas was considered to be compressible. The calculations showed that the total force acting on the valve and walls of the flow channel does not depend on its shape and, depending on the valve position, can change by more than two times. The optimum length of a drop-shaped valve is nearly half that of a conical valve. Although the drop-shaped valve produces a more inhomogeneous velocity field than the conical valve, the former is more acceptable for regulating gas flow through the central channel of the inspection smart pig.

Keywords: turbulent flow; inspection projectile; flow around a solid body

Received 27 June 2023; revised 17 July 2023; accepted 17 July 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-29-38

1. Введение

Основная проблема при разработке инспекционных снарядов для газопроводов низкого давления состоит в обеспечении его равномерного движения под действием перекачиваемого газа. Поскольку давление газа и сила, действующая на снаряд со стороны газа, малы, то взаимодействие снаряда с препятствиями (шероховатость и деформация поверхности стенок газопровода) может существенно изменить скорость движения и даже сделать его нестационарным, что ведет к потере диагностической информации [1].

Известен ряд частных решений, защищенных патентами, направленных на разработку концепции диагностического снаряда с контролируемой скоростью движения. В патенте [2] описано устройство регулировки сечения центрального байпасного канала. В работе [3], помимо центрального канала, предлагается использовать дополнительные байпасные каналы. В патенте [4] скорость движения диагностического снаряда корректируется путем включения в его состав устройства мотор-генератор-колесо, которое может работать в трех режимах: как двигатель, тормоз или пассивное устройство. В патенте [5] предлагается использовать подвижные манжеты, приводимые в движение, когда снаряд застревает в газопроводе. Все предложенные решения требуют проверки, основанной либо на математическом моделировании, либо на натурном физическом эксперименте, которые, насколько известно авторам настоящей работы, пока не проводились.

Авторским коллективом выполнен цикл работ [1, 6–10] по разработке концепции диагностического снаряда для трубопроводов низкого давления, способам управления его скоростью. Предложенные концептуальные решения проверялись посредством численного моделирования. В патентах [6, 7] для управления скоростью снаряда была предложена конструкция снаряда с центральным каналом в форме сопла Лавала, площадь сечения

которого регулируется плоской поворотной заслонкой. В типичных условиях течение газа в конфузорной части канала безвихревое. В области минимального сечения (горловине канала) скорость газа близка к скорости звука, в диффузорной части – больше скорости звука. В последней также имеют место зоны отрыва течения. В [7] для уменьшения области отрывного течения в конструкцию головной части снаряда предложено внести дополнительные боковые байпасные каналы, которые в зоне примыкания периферийных каналов к центральному каналу выполнены в виде камерулиток.

Численное моделирование, результаты которого изложены в работах [8–10], было направлено на проверку правильности и оптимизацию концептуальных решений [6, 7]. В [8] показано, что площадь зон отрывного течения в центральном канале головной секции диагностического снаряда, а значит и сила сопротивления, действующая на снаряд, могут быть уменьшены на 15% за счет усложнения конструкции – создания дополнительных байпасных каналов. Плоская поворотная заслонка, установленная в горловине канала, позволяет регулировать силу сопротивления в пределах 36–42% [9, 10], но также существенно усложняет конструкцию снаряда, т.к. механизм управления заслонкой следует расположить в теле снаряда, что проблематично совместить с дополнительными байпасными каналами, располагаемыми там же.

Целью настоящей работы является оценка возможности замены поворотной заслонки обтекаемым телом, т.е. клапаном, который располагается в центральном канале и перемещается вдоль его оси, частично или полностью перекрывая его сечение. Управление таким клапаном можно разместить внутри его тела. Рассмотрено два вида клапанов с каплевидной (сферической) формой передней части и с конической передней частью. Сравниваются структуры течений газа вблизи клапанов и силы, действующие на них со стороны потока.

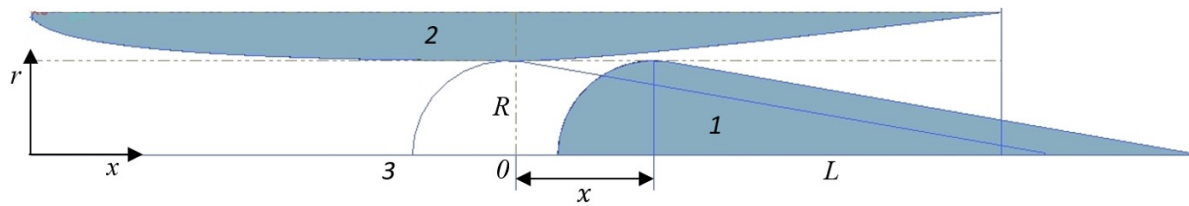


Рис. 1. Верхняя часть клапана обтекаемой формы (1) и стенки сопла Лавалья (2), ось канала (3)

Все расчеты в данной работе выполнены в пакете прикладных программ Ansys® Fluent, Release 17.1; данные об использованных уравнениях можно посмотреть в Help System, ANSYS, Inc.

2. Постановка задачи

Плоскую поворотную заслонку, влияние которой на движение газа в центральном канале инспекционного снаряда исследовалось в работе [9], предлагается заменить на клапан обтекаемой формы, показанный на рис. 1.

Клапан располагается внутри центрального канала, который имеет вид сопла Лавалья. В ходе поступательного движения вдоль оси канала клапан частично или полностью перекрывает канал, регулируя тем самым поток газа через сопло. Положение клапана, координата x , отсчитывается от самой узкой части сопла Лавалья. Форма и геометрические параметры клапана подбирались на основе тестовых расчетов его обтекания субзвуковым потоком газа (воздуха) в неограниченном пространстве. Затем клапан помещался внутрь центрального канала инспекционного снаряда и, при варьировании расстояния x , вычислялись силы, действующие на клапан и стенки сопла.

Течение газа, обтекающего клапан, полагалось аксиально симметричным, что позволяет проводить расчеты в двумерной постановке с условием симметрии на оси клапана (канала). Поток газа в сопле Лавалья считался сжимаемым. При расчетах в неограниченном пространстве на входе в расчетную область и вдали от поверхности клапана задавалась постоянная скорость, на выходе – постоянное давление. На поверхности клапана задавали условие прилипания. При расчетах течения в центральном канале инспекционного снаряда на входе и выходе задавали давление. На стенках канала и обтекаемого тела – условие прилипания.

Расчеты проводили в пакете прикладных программ Ansys Fluent. В качестве модельного газа выбирался воздух, все материальные параметры которого брались из библиотеки Ansys Fluent. В основном объеме расчетной области строилась гексагональная сетка. Для разрешения в пограничных слоях близи твердых границ задавалась неравномерная измельченная сетка, состоящая из 100 призматических слоев с коэффициентом роста 1.2 (толщина первого пристеночного слоя составляла $0.5 \cdot 10^{-3}$ мм), тем самым обеспечивалось вы-

полнение условия $y^+ < 1$. Для задачи внешнего обтекания число элементов сетки было $\sim 1.2 \cdot 10^5$, для задачи обтекания клапана в снаряде $\sim 1.6 \cdot 10^5$. Максимальный размер элемента (в центре расчетной области) равнялся 3 мм. Для каждого положения клапана x строилась новая сетка и выполнялся отдельный расчет. Клапан в процессе расчета полагался неподвижным.

Для лучшей сходимости на первом этапе решения использовалась схема первого порядка (First Order) дискретизации по времени, после того как решение сойдется, для его уточнения осуществлялось переключение на схему второго порядка (Second Order).

Вычисления производились с использованием модели турбулентности Спаларта–Аллмараса [11–14], в рамках которой решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, непрерывности, состояния. В общем виде эти уравнения совместно с уравнениями модели турбулентности в декартовых координатах записаны ниже; здесь использованы общепринятые обозначения для скорости, давления, плотности и вязкостей. Для уравнения состояния использовалось уравнение Менделеева–Клайперона, где молярная масса $m = 29$ г/моль:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j) = -\frac{\partial(\delta_{ij}\bar{p})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ji} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ji} \right],$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j) = 0, \quad \bar{\rho} = \frac{\bar{p}m}{RT};$$

уравнение для турбулентной вязкости $\nu_t = f_{v1}\tilde{\nu}$:

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} = C_{b1}(1 - f_{t2})\tilde{S}\tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu})\nabla \tilde{\nu}) + \frac{1}{\sigma} C_{b2} [\nabla \tilde{\nu} \cdot \nabla \tilde{\nu}] - \left(C_{w1}f_w - \frac{C_{b2}}{k^2}f_{t2} \right) \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + f_{t1}\Delta U^2.$$

Параметры вязкого подслоя и переходной области:

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}, \quad \tilde{S} = \Omega + f_{v2} \frac{\tilde{\nu}}{k^2 d^2},$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \quad \Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

внешней области пограничного слоя:

$$f_w = g \left(\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad g = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} k^2 d^2}.$$

Условие ламинарно-турбулентного перехода:

$$f_{t1} = C_{t1} g_t \exp \left(-C_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} (d^2 + g_t^2 d_t^2) \right),$$

$$f_{t2} = C_{t3} \exp(-C_{t4} \chi^2),$$

$$g_t = \min \left(0.1, \frac{\Delta U}{\omega_t \Delta l_t} \right), \quad \omega_t = \Omega_{trip}, \quad \Delta U = |\tilde{u} - U_{trip}|,$$

$$d_t^2 = (z - z_{trip})^2 + (y - y_{trip})^2 + (x - x_{trip})^2.$$

где Δl_t – диагональ сетки в точке перехода, индекс

trip относится к величинам в точке перехода.

Константы модели:

$$\sigma = \frac{2}{3}, \quad C_{b1} = 0.1355, \quad C_{b2} = 0.622,$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma}, \quad C_{w2} = 0.3, \quad C_{w3} = 2,$$

$$C_{v1} = 7.1, \quad C_{t1} = 1, \quad C_{t2} = 2, \quad C_{t3} = 1.2, \quad C_{t4} = 0.5$$

Устойчивые сходящиеся решения удалось получить, только применив решатель pressure based.

В расчетах используется избыточное давление, обозначаемое как Gouge Pressure. При этом плотность вычисляется по абсолютному давлению,

равному: избыточное давление - Gouge Pressure минус рабочее давление - Operating Pressure. В модели Operating Pressure полагалось равным нулю. Поэтому Gouge Pressure равно абсолютному давлению. Дополнительно, для нулевого значения Gouge Pressure задавалась плотность воздуха - Operation Density, равная 1.25 kg/m³.

3. Результаты расчетов

3.1. Расчет клапана в форме каплевидного тела

В качестве начального приближения, был выбран клапан в форме каплевидного тела. Такая форма обеспечивает минимальное сопротивление при дозвуковом обтекании газом [11]. Передняя часть каплевидного тела, на которую набегают поток газа, имеет форму сферы радиуса $R = 98.5$ мм, такого же, как радиус горловины центрального канала инспекционного снаряда, а хвост имеет форму конуса (см. рис. 1). Полная осевая длина каплевидного тела L варьировалась от 280 до 655 мм.

При расчете силы сопротивления, действующей на каплевидное тело в неограниченном пространстве, расчетную область брали в форме прямоугольника со сторонами $4R \times 10R$. На входе в расчетную область задавали скорость набегающего потока 300 м/с, на выходе – давление равное 0 атм.

Типичные поля модуля скорости и статическо-

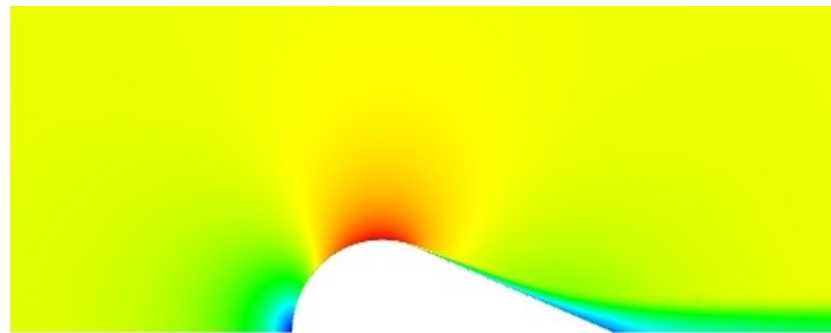
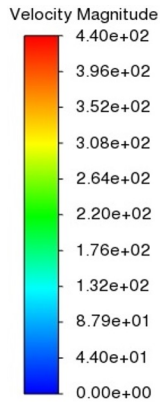


Рис. 2. Поле модуля скорости газа, вблизи каплевидного клапана длиной $L = 350$ мм

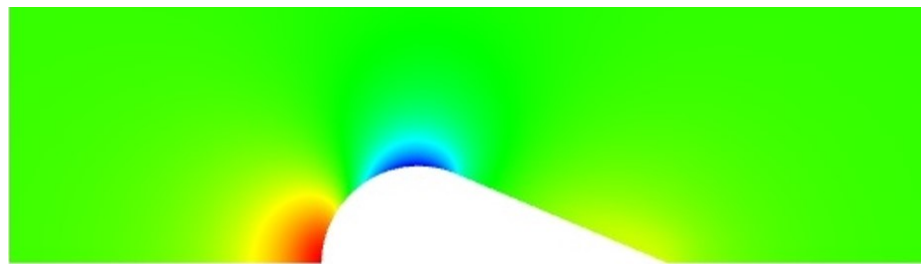
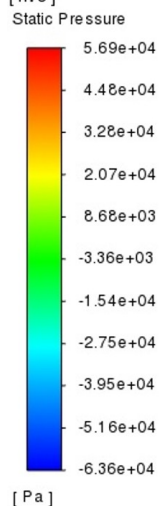


Рис. 3. Поле статического давления в газе, вблизи каплевидного клапана длиной $L = 350$ мм

го давления приведены на рис. 2 и 3. Видно, что при движении от передней части к хвосту клапана скорость газа меняется не монотонно, достигая наибольшего значения в области вблизи максимального поперечного сечения клапана. Статическое давление здесь, наоборот, минимально и его градиент направлен против скорости. Такое распределение давления приводит к отрыву потока газа от поверхности клапана. Что является не желательным эффектом.

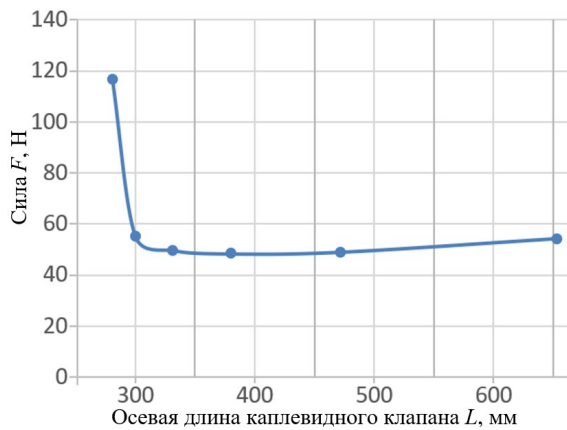


Рис. 4. Зависимость силы F , действующей на клапан, от осевой длины L каплевидного тела при его обтекании газом в неограниченном пространстве

Сила, действующая на клапан со стороны набегающего потока газа, вычислялась как интеграл от тензора вязких напряжений по поверхности обтекаемого тела.

Из рис. 4 видно, что в диапазоне $L \in (300, 700)$ мм сила сопротивления меняется очень слабо. Для этого диапазона по известной формуле $F = \frac{1}{2} C_x \pi R^2 \rho v^2$ можно оценить коэффициент сопротивления C_x обтекаемого тела. Он оказался равным 0.045, что соответствует литературным данным [15], где ρ плотность газа, а v – скорость набегающего потока. Данное обстоятельство служит некоторой верификацией, применяемой математической модели.

Зависимость силы F от осевой длины клапана приведена на рис. 4, из которого видно, что при длине каплевидного тела 330–450 мм сила сопротивления минимальна.

При обтекании газом клапана линии тока течения ступают над точкой, где поперечное сечение клапана максимально. Здесь скорость достигает максимального, а давление минимального значения P_{min} (см. рис. 2 и 3). Далее, в направлении потока давление имеет значение большее P_{min} . Поперек слоя давление практически не меняется. Поэтому вблизи области максимального сечения клапана жидкость стремится двигаться в направлении локального градиента давления, что приводит

к ее торможению. Торможение тем сильнее, чем ближе частица жидкости к поверхности тела. Поэтому в пограничном слое вблизи поверхности тела возникает возвратный поток и происходит отрыв пограничного слоя от обтекаемой поверхности. Пограничный слой, оторвавшийся от поверхности, ведет себя как затопленная струя и быстро становится турбулентным [16].

Увеличивая длину хвостовой части (общую длину) клапана, мы смещаем область отрыва в направлении потока, что приводит к уменьшению объема вихревого следа, а значит, и силы сопротивления. Из рис. 4 видно, что существует оптимальная длина клапана, которой соответствует минимальная сила сопротивления. При большей длине клапана область отрыва практически остается на прежнем месте, но увеличивается поверхность трения жидкости с клапаном. В дальнейших расчетах общая длина каплевидного клапана полагалась равной $L = 350$ мм.

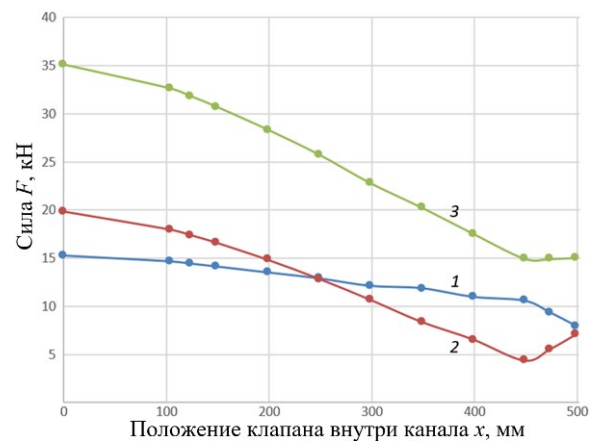


Рис. 5. Зависимость сил, действующих на каплевидный клапан (1), стенки канала (2), и суммарной силы (3) от положения клапана на оси канала

Затем проводили расчет клапана внутри центрального канала инспекционного прибора. В качестве граничных условий задавали давление на входе 5 атм. и выходе 0 атм., что соответствует типичным условиям применения инспекционного прибора. На рис. 5 представлены зависимости сил, действующих со стороны набегающего потока газа, на каплевидный клапан (кривая 1) и стенки сопла Лавалья (кривая 2) от положения клапана внутри центрального канала. Варьировалось расстояние x от узкой горловины сопла Лавалья до самой широкой части клапана в пределах от 0 до 500 мм (см. рис. 1). Кривая 3 на рис. 5 демонстрирует изменение суммарной силы, действующей на клапан и стенки центрального канала. Видно, что в диапазоне расстояний x от 0 до 450 мм суммарная сила изменяется практически линейно и уменьшается более чем на 50%. Отметим, что в случае плоской поворотной заслонки суммарная сила имела близкие значения, если снаряд, помимо цен-

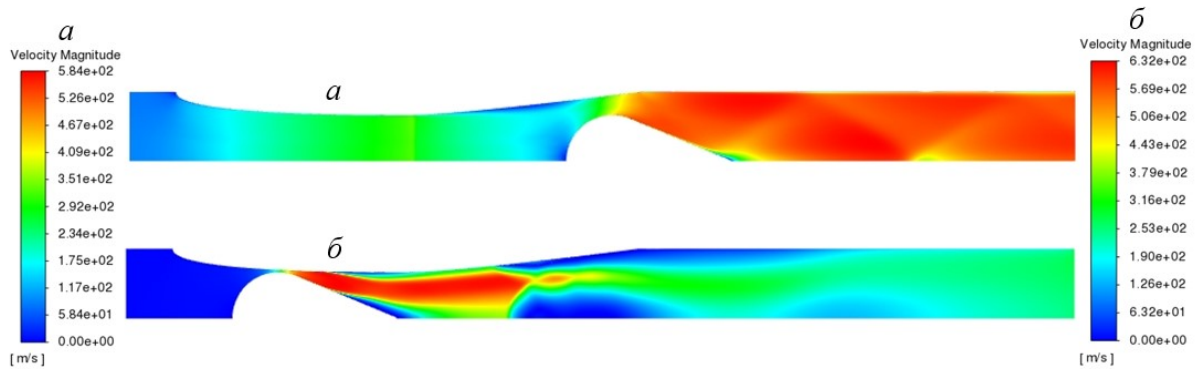


Рис. 6. Поля модуля скорости при обтекании каплевидного клапана длиной $L = 350$ мм внутри проточного канала: а – $x = 350$ мм; б – $x = -160$ мм

трального канала, имел дополнительные байпасные каналы (без байпасных каналов сила была на 40% больше) [9].

На рис. 6, а показано поле модуля скорости для положения клапана $x = 350$ мм. Видно, что оно изменяется вдоль оси центрального канала немонотонно. Скорость набегающего потока газа в узкой части сопла Лавалья близка к скорости звука, затем при подходе к поверхности клапана она убывает вплоть до места, где находился клапан, далее скорость газа снова возрастает, достигая скорости звука в области минимального сечения свободной части канала, и продолжает расти в диффузорной части сопла.

При выдвигании клапана в область конфузора (см. рис. 6, б) на расстояние $x = -160$ мм суммарная сила сопротивления остается примерно такой же, как при $x = 0$ мм (на клапан действует сила ~ 14400 Н, на стенки сопла Лавалья ~ 17200 Н), а течение имеет вид вихревого следа. Такое перемещение клапана, в целях регулировки скорости его движения, не целесообразно, т.к. практически не изменяет силу, действующую на снаряд.

3.2. Расчет клапана с конической передней частью

Из рис. 2 и 6 видно существенно немонотонное распределение скорости газа перед клапаном. Данное обстоятельство может влиять на величину силы, действующей на клапан со стороны потока. В настоящем разделе описываются результаты моделирования, в рамках которого была сделана попытка сгладить немонотонное распределение средней скорости газа вдоль клапана. Для этого шарообразную форму передней части каплевидного клапана заменили конической, как это показано на рис. 7.

Геометрию конического клапана, в частности высоту конуса передней его части h , на которую натекает поток газа, выбирали так, чтобы эффективная площадь поперечного сечения проточного канала, свободная для движения газа, с клапаном конической формы изменялась более плавно по

сравнению с клапаном каплевидной формы. На рис. 8 представлены изменения эффективных площадей проточного канала с клапаном каплевидной формы (кривая 1) и клапаном конической формы с $h = 220$ мм (кривая 2) в зависимости от координаты x . Оба клапана располагаются на расстоянии 420 мм от узкого сечения сопла Лавалья (см. рис. 1).

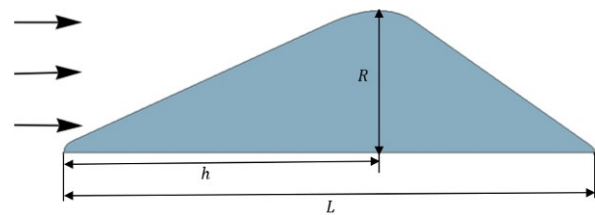


Рис. 7. Клапан с конической передней частью, длиной L , длиной носовой части h и радиусом широкой части R . Стрелками показано направление набегающего потока

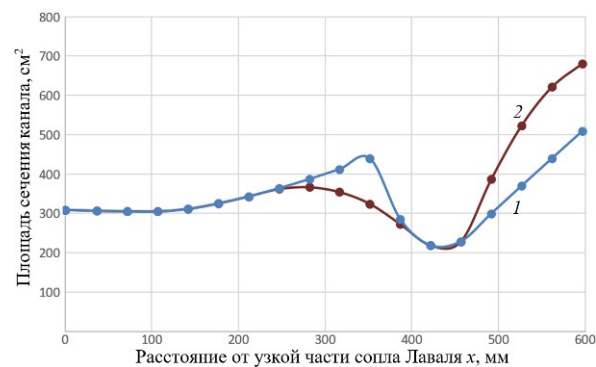


Рис. 8. Изменение эффективной площади поперечного сечения проточного канала вдоль оси снаряда для каплевидного (1) и конического (2) клапанов при их выдвигании на расстояние $x = 420$ мм от узкого сечения сопла Лавалья. Длина новой части $h = 250$ мм

В расчетах полную длину конического клапана L варьировали в пределах от 370 до 950 мм. Длина носовой части клапана была фиксирована и равнялась $h = 250$ мм, изменяли только длину хвостовой

части (см. рис. 7). Была проведена серия расчетов обтекания конического клапана в неограниченном пространстве. Размер расчетной области и условия на её границах задавались аналогично случаю с каплевидным клапаном. Зависимость силы F , действующей на клапан со стороны потока, от полной его длины L приведена на рис. 9. Видно, что при увеличении L до 600 мм сила сопротивления монотонно уменьшается, а при дальнейшем увеличении L меняется слабо. Для $L > 600$ мм коэффициент сопротивления $C_x = 0.045$, как и у каплевидного тела.

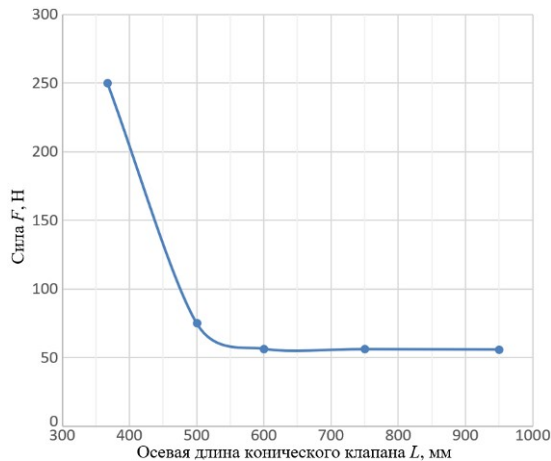


Рис. 9. Зависимость силы F , действующей на клапан, от осевой длины L конического тела при его обтекании газом в неограниченном пространстве

В дальнейших расчетах была выбрана длина клапана $L = 630$ мм, соответствующая локальному минимуму на кривой рис. 9.

На рис. 10 приведено поле статического давления вблизи конического клапана длиной $L = 630$ мм. В окрестности точки, где диаметр клапана максимален, т.е. где происходит переход от носовой части конического клапана к его хвостовой части, имеется область пониженного давления, что указывает на отрыв потока газа от поверхности тела. Форма носовой конической части была выбрана и зафиксирована, управление положением точки

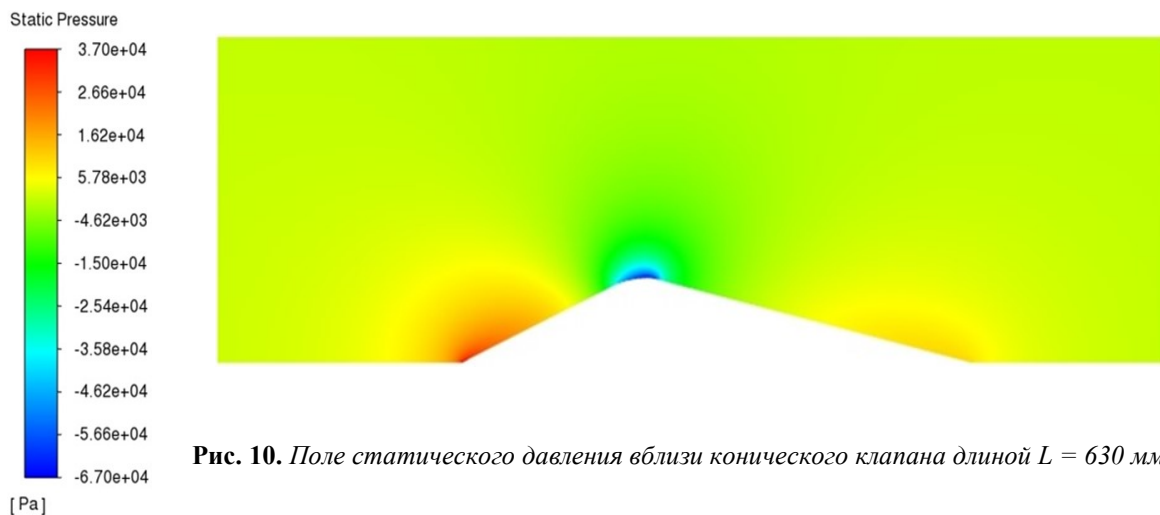


Рис. 10. Поле статического давления вблизи конического клапана длиной $L = 630$ мм

отрыва потока происходило только за счет изменения длины хвостовой части клапана.

Далее, как и в случае каплевидного клапана, конический клапан помещали в центральный канал инспекционного снаряда, выполненного в форме сопла Лавалья. Проводились расчеты полей скорости газа, давления и силы сопротивления при различном положении x конического клапана на оси канала снаряда. Граничные условия брали такие же, как при расчете каплевидного клапана в центральном канале снаряда.

На рис. 11 показан пример рассчитанного распределения модуля скорости для $x = 350$ мм. Из сравнения с рис. 6, а видно, что вдоль передней конусовидной поверхности клапана распределение скорости стало более однородным, чем в случае каплевидного клапана.

На рис. 12 представлены зависимости сил, действующих со стороны набегающего потока газа, на клапан (кривая 1) и стенки сопла Лавалья (кривая 2) от положения клапана внутри центрального канала. Варьировалось расстояние x от узкой горловины сопла Лавалья до самой широкой части клапана в пределах от 0 до 520 мм. Кривая 3 на рис. 12 демонстрирует изменение суммарной силы, действующей на клапан и стенки центрального канала. Видно, что в широком диапазоне расстояний x суммарная сила изменяется по закону близкому к линейному и уменьшается более чем на 50% с увеличением x .

Сравнение кривых 3 для суммарных сил, действующих на проточный канал с каплевидным (рис. 5) и коническим (рис. 12) клапанами, показывает идентичность зависимостей суммарной силы от положения клапана x относительно узкой части сопла Лавалья. Максимальная и минимальная суммарные силы в случае обоих клапанов получились одинаковыми. Следовательно, отмеченные выше локальные неоднородности поля скорости при обтекании каплевидного клапана практически не изменили интегральную характеристику – суммарную силу, действующую на систему управления движением инспекционного снаряда с клапаном обтекаемой формы.

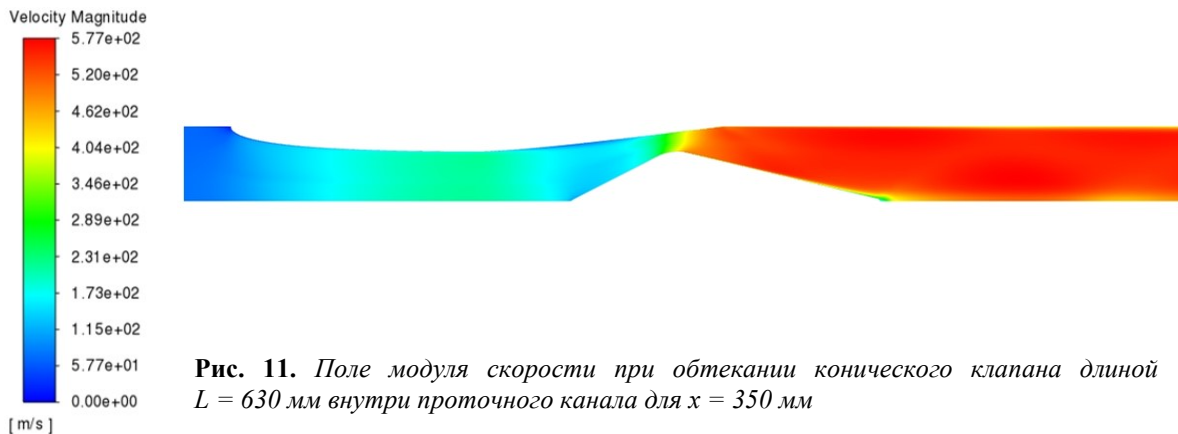


Рис. 11. Поле модуля скорости при обтекании конического клапана длиной $L = 630$ мм внутри проточного канала для $x = 350$ мм

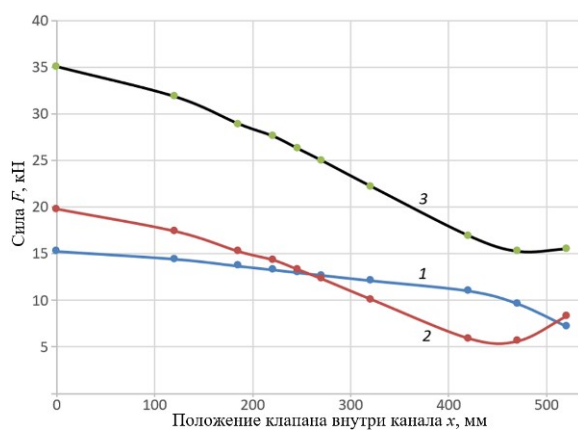


Рис. 12. Зависимость сил, действующих на конический клапан (1), стенки канала (2), и суммарной силы (3) от положения клапана на оси канала

4. Заключение

Проведенные расчеты показали, что предложенную ранее поворотную заслонку, предназначенную для регулирования потока газа через центральный канал инспекционного снаряда, можно заменить клапаном обтекаемой формы, перемещаемым вдоль оси канала. Изменение скорости потока газа в центральном канале снаряда позволяет регулировать силу, действующую на инспекционный снаряд со стороны прокачиваемого газа. При этом эффективность работы плоской заслонки и обтекаемого клапана оказываются сравнимыми, но конструкция снаряда и механизма управления клапаном оказывается проще. Дополнительные байпасные каналы для подавления отрыва течения в диффузорной части канала не требуются, а механизм управления клапаном возможно разместить в самом клапане, что позволит существенно сэкономить пространство внутри снаряда.

В работе изучено влияние потока газа на центральный проточный канал в виде сопла Лаваля, узкая часть которого перекрывается клапаном. Рассматривались обтекаемые клапаны двух конфигураций: каплевидный, передняя часть которого представляет сферу, и конический, передняя часть

которого выполнена в виде конуса. Задняя часть обоих клапанов представляла собой вытянутый по потоку газа конус. Показано, что в обоих случаях суммарная сила, действующая на стенки канала и клапана, убывает при изменении его положения в центральном канале снаряда по закону близкому к линейному.

При обтекании каплевидного клапана в полях скорости и давления наблюдаются локальные неоднородности, приводящие к отрыву потока газа. Эти неоднородности можно сгладить путем трансформации передней части клапана со сферической на коническую. Такая замена приводит к сглаживанию потока, но не изменяет величину интегральной силы, действующей со стороны газа на стенку канала и клапан. Расчеты показали, что оптимальная длина каплевидного клапана составляет 350 мм, тогда как конический клапан должен иметь большую длину, порядка 630 мм. Таким образом, каплевидный клапан, несмотря на создаваемые им неоднородности поля скорости, является более приемлемым для регулирования потока газа через центральный канал инспекционного снаряда.

В дальнейшем планируется провести систематическое исследование нестационарных процессов, в том числе и вибраций клапана в 3D постановке, что необходимо для оценки надежности рассмотренного способа регулировки скорости движения инспекционного снаряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-48-596002 р_НОЦ_Пермский край, руководитель А. В. Перминов.

Список литературы

1. Мугинов Р. Р., Пещеренко С. Н., Перминов А. В. Динамика движения инспекционного снаряда в газопроводе низкого давления // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 2. С. 36–47. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-2-36-47
2. Синев А. И., Ходаринов А. Т., Морозов А. К. Внутритрубный инспекционный снаряд с управляемой скоростью движения // Патент РФ №2293612. 2007. Бюл. №5.

3. Синева А. И., Сапунков Я. Г., Рамзаев А. И., Братчиков Д. Ю. Внутритрубный инспекционный снаряд с управляемой скоростью движения // Патент РФ №2318158. 2008. Бюл. № 6
4. Натаров Б. Н., Эндель И. А., Горбунова С. В. и др. Аппарат внутритрубного контроля и способ перемещения его в магистральном газопроводе с заданной равномерной скоростью // Патент РФ №2451867. 2011. Бюл. № 36.
5. Козырев Б. В., Козырев Н. Б. Аппарат внутритрубного контроля и способ перемещения его в магистральном газопроводе с заданной равномерной скоростью // Патент РФ №2392533. 2010. Бюл. № 17
6. Пещеренко С. Н., Павлов Д. А., Пещеренко М. П., Перминов А. В., Мугинов Р. Р. Внутритрубный диагностический снаряд для газопроводов // Патент на изобретение №2773700. 2022. Бюл. №16.
7. Пещеренко С. Н., Павлов Д. А., Пещеренко М. П., Перминов А. В., Мугинов Р. Р. Внутритрубный диагностический снаряд с регулируемой скоростью движения для обследования трубопроводов // Патент на изобретение №2779721. 2022. Бюл. №26.
8. Muginov R. R., Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Influence of the shape on the hydraulic resistance of bypass channels inside a smart pig for low pressure gas pipeline inspection // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2317, 012014. DOI: 1742-6596/2317/1/012014
9. Павлов Д. А., Пещеренко М. П., Мугинов Р. Р., Пещеренко С. Н., Перминов А. В. Внутренняя гидродинамика инспекционного снаряда для газопроводов низкого давления // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 3. С. 31–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2022-3-31-37
10. Мугинов Р. Р., Пещеренко С. Н., Перминов А. В. Модель движения диагностического снаряда / в сб.: XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2023г., 392 с.
11. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // AIAA Paper 1992-0439. DOI:10.2514/6.1992-439
12. Allmaras S. R., Johnson F. T., Spalart P. R. Modifications and clarifications for the implementation of the Spalart-Allmaras turbulence model / Seventh International Conference on CFD (ICCFD7). Big Island, Hawaii, 9-13 July, 2012.
13. NRARC Alliance Verification and Validation Archive [Электронный ресурс]. URL: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/archive.html> (дата обращения: 27.06.2023)
14. Платонов И. М. Тепло-массообмен при взаимодействии струй в режиме газодинамического управления летательным аппаратом. Дисс. канд. тех. наук. М.: МАИ, 2019. 127 с.
15. Идельчик Е. И. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
16. Мониин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. 639 с.

References

1. Muginov R. R., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Dynamics of movement of a smart pig in a low-pressure gas pipeline. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 2, pp. 36–47. DOI: 10.17072/1994-3598-2021-2-36-47 (In Russian).
2. Sinev A.I., Khodarinov A. T., Morozov A. K. Vnutritrubny inspekcionny snaryad s upravlyaemoi skorost'iu dvizheniya [An in-pipe inspection tool with controlled travel speed]. Patent RU 2293612. *Bulletin*, 2007, no. 5 (In Russian).
3. Sinev A.I., Sapunkov Ya. G., Ramzaev A. I., Bratchikov D.Yu. Vnutritrubny inspekcionny snaryad s upravlyaemoi skorost'iu dvizheniya [An in-pipe inspection tool with controlled travel speed]. Patent RU 2318158. *Bulletin*, 2008, no. 6 (In Russian).
4. Natarov B. N., Eydel I. A., Gorbunova S. V., et al. Apparat vnutritrubnogo kontrolya i sposob peremeshcheniya yego v magistral'nom gazoprovode s zadannoy ravnomernoy skorost'yu [An in-pipe control apparatus and the method of moving it in the main gas pipeline at a given uniform speed]. Patent RU 2451867. *Bulletin*, 2011, no. 36 (In Russian).
5. Kozыrev B. V., Kozыrev N. B. Apparat vnutritrubnogo kontrolya i sposob peremeshcheniya yego v magistral'nom gazoprovode s zadannoy ravnomernoy skorost'yu [An in-pipe control apparatus and the method of moving it in the main gas pipeline at a given uniform speed]. Patent RU 2392533, *Bulletin*, 2010, no. 17 (In Russian)..
6. Peshcherenko S. N. Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Perminov A. V., Muginov R. R. Vnutritrubnyy diagnosticheskiy snaryad dlya gazoprovodov [An in-pipe diagnostic tool for gas pipelines]. Patent RU 2773700. *Bulletin*, 2022, no. 16 (In Russian).
7. Peshcherenko S. N. Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Perminov A. V., Muginov R. R. Vnutritrubnyy diagnosticheskiy snaryad s reguliruyemoy skorost'yu dvizheniya dlya obsledovaniya truboprovodov [An in-pipe diagnostic projectile with adjustable speed for inspection of pipelines]. Patent RU 2773700. *Bulletin*, 2022, no. 26 (In Russian).
8. Muginov R. R., Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Influence of the shape on the hydraulic resistance of bypass channels inside a smart pig for low pressure gas pipeline inspection. *Journal of Physics: Confer-*

- ence Series, 2022, vol. 2317, 012014. DOI: 1742-6596/2317/1/012014
9. Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Migunov R. R., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Internal hydrodynamics of an inspection projectile for low-pressure gas pipelines. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 3, pp. 31–37. DOI: 10.17072/1994-3598-2022-3-31-37 (In Russian).
 10. Muginov R. R., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Model of the movement of a diagnostic projectile. *Proc. of XXIII Winter School on Continuum Mechanics*, Perm: UB RAS, 2023. 392 p. (In Russian).
 11. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *Recherche Aerodynamique*, 1992, no. 1, pp. 5–21. DOI:10.2514/6.1992-439
 12. Allmaras S. R., Johnson F. T., Spalart P. R. Modifications and clarifications for the implementation of the Spalart-Allmaras turbulence model. *Proc. of 7th Int. Conf. on CFD (ICCFD7)*, 2012, ICCFD7-1902.
 13. *NRARC Alliance Verification and Validation Archive* [Electronic resource]. URL: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/archiv e.html> (Access date: 17 June 2023)
 14. Platonov I. M. *Teplo-massoobmen pri vzaimodeystvii struy v rezhime gazodinamicheskogo upravleniya letatel'nykh apparatov* [Heat and mass transfer during jet interaction in the regime of gas-dynamic control of an aircraft]. Cand. tech. sci. thesis. Moscow: MAI, 2019. 127 p. (In Russian).
 15. Idelchik E. I. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook on Hydraulic Resistance]. Moscow: Mashinostroenie, 1992. 672 p. (In Russian).
 16. Monin A. S., Yaglom A. M. *Statisticheskaya gidromekhanika* [Statistical Hydromechanics]. Part 1. Moscow: Nauka, 1965. 639 p. (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мугинов Р. Р., Павлов Д. А., Пещеренко М. П., Пещеренко С. Н., Перминов А. В. Гидравлическое сопротивление системы управления движением инспекционного снаряда с клапаном обтекаемой формы в газопроводе низкого давления // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 3. С. 29–38. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-29-38

Please cite this article in English as:

Muginov R. R., Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Hydraulic resistance of an inspection projectile motion control system with a streamlined valve in a low-pressure gas pipeline. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 3, pp. 29–38. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-29-38

Сведения об авторах

1. Данил Андреевич Павлов, научный сотрудник кафедры «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т., 29, Пермь, 614990.
2. Марина Петровна Пещеренко, научный сотрудник кафедры «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т., 29, Пермь, 614990.
3. Роман Радифович Мугинов, начальник отдела, ООО «ПСО «НефтеГазДиагностика», Колодезный переулок, д. 3, стр. 25, оф.25, Москва, 107076.
4. Сергей Николаевич Пещеренко, д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т., 29, Пермь, 614990.
5. Анатолий Викторович Перминов, д-р. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т., 29, Пермь, 614990.

Author information

1. Danil A. Pavlov, Researcher, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia.
2. Marina P. Peshcherenko, Researcher, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia
3. Roman R. Muginov, Department Head, PSO 'NefteGasDiagnostika' LLC; off. 25, 3, bld. 25, Kolodezny pereulok, Moscow, 107076, Russia
4. Sergey N. Peshcherenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia
5. Anatoly V. Perminov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia