

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

## Внутренняя гидродинамика инспекционного снаряда для газопроводов низкого давления

Д. А. Павлов<sup>1</sup>, М. П. Пещеренко<sup>1</sup>, Р. Р. Мугинов<sup>2†</sup>, С. Н. Пещеренко<sup>1‡</sup>,  
А. В. Перминов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

<sup>2</sup> ООО «ПСО «НефтеГазДиагностика», Москва

† muginov@gmail.com

‡ peshcherenko@yandex.ru

\* perminov1973@mail.ru

Управление скоростью инспекционного снаряда в газопроводах низкого давления можно осуществлять путем изменения сечения центрального байпасного канала при повороте заслонки, причем чем ниже сопротивление снаряда течению газа через центральный канал, тем больше эффективность управления. Для снижения сопротивления используются периферийные байпасные каналы. Выполнен анализ течения газа в этих каналах с вырезами для размещения устройства поворота заслонки и тормозов. Предложена конструкция байпасных каналов, обеспечивающая снижение силы сопротивления на 15% (максимальное снижение силы в конструкции с байпасами без вырезов равно 20%). Также вычислена используемая при управлении движением инспекционного снаряда зависимость силы сопротивления заслонки от угла ее поворота. В широком интервале углов сила сопротивления оказалась пропорциональной доле перекрываемой площади.

**Ключевые слова:** сила лобового сопротивления; отрывные течения; сопло Лавала

Поступила в редакцию 10.08.2022; после рецензии 16.08.2022; принята к опубликованию 17.08.2022

## Internal hydrodynamics of an inspection projectile for low-pressure gas pipelines

D. A. Pavlov<sup>1</sup>, M. P. Peshcherenko<sup>1</sup>, R. R. Migunov<sup>2</sup>, S. N. Peshcherenko<sup>1</sup>,  
A. V. Perminov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>2</sup> PSO "NefteGasDiagnostics" LLC, Moscow, Russia

† muginov@gmail.com

‡ peshcherenko@yandex.ru

\* perminov1973@mail.ru

Speed control of an inspection projectile in low-pressure gas pipelines can be performed by changing the cross-section of the central channel when turning the flap, and it is more effective the lower the resistance to gas flow through the central channel. Peripheral bypass channels are used to reduce the resistance. We conducted analysis of gas flow in these channels with cut-outs intended to accommodate the flap turning device and brakes. A design of the channels that provides a 15% decrease in drag force is proposed (the maximum decrease in force in the design with bypasses without cut-outs is 20%). The dependence of the damper drag force on the angle of its rotation, used in controlling the movement of the inspection projectile, was also calculated. In a wide range of angles, the drag force was found to be proportional to the fraction of the overlapped area.

**Keywords:** drag force; flow separation; de Laval nozzle

Received 10 August 2022; revised 16 August 2022; accepted 17 August 2022

doi: 10.17072/1994-3598-2022-3-31-37

## 1. Введение

В настоящее время диагностика газопроводов, как правило, осуществляется с помощью инспекционных снарядов, приводимых в движение перекачиваемым газом. Диагностическая информация считывается через равные промежутки времени, поэтому условием качественной диагностики является постоянство скорости снаряда. Однако внутренние стенки промышленных газопроводов могут иметь неоднородности: сварные швы, вмятины, изгибы, отложения механических примесей и т.д., которые создают переменные силы, действующие на проходящий по трубопроводу инспекционный снаряд. Если разница сил давления, действующих на торцы снаряда, намного больше, чем силы трения, то движение снаряда будет близким к равномерному. Действительно, опыт показывает, что в магистральных газопроводах диаметром около 1 м и давлением 50–60 атм. инспекционные снаряды перемещаются практически равномерно.

В последние годы, после принятия в России закона о запрете сжигания попутного нефтяного газа в факелах, были построены газопроводы низкого давления (не более 10 атм., общей протяженностью более 7000 км) [1, 2]. Многофазная смесь, перекачиваемая по таким газопроводам, состоит из скважинной жидкости (1–5%), твердых частиц (менее 0.01%) и газа, является агрессивной средой [3]. Поэтому проблема диагностики состояния этих трубопроводов является актуальной.

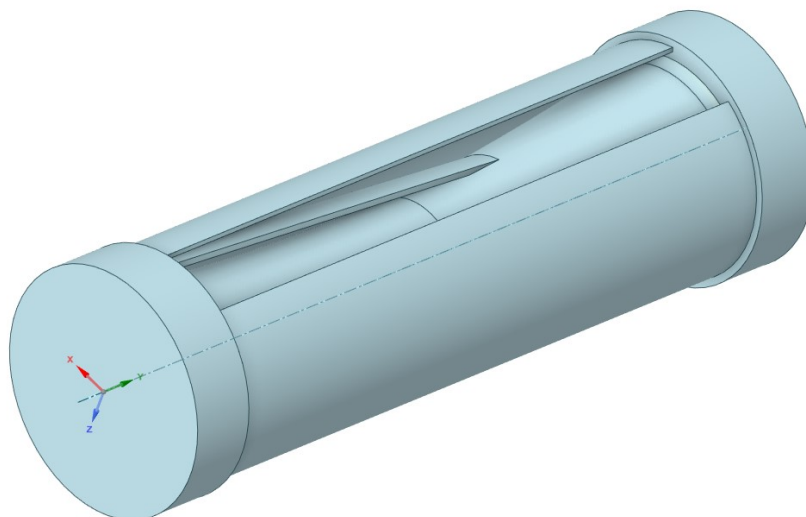
Наши оценки [4] для диагностического снаряда массой до 600 кг показали, что в типичных условиях транспортировки попутного нефтяного газа по трубопроводам диаметром 0.325 м с давлением газа до 10 атм. препятствия с прочностью до 6000–6500 Н не снижают точность диагностической информации. Если прочность стопоров выше, снаряд должен быть оснащен системой стабилизации движения. Более того, если прочность стопоров не превышает критического значения 16000–17000 Н, достаточно использовать центральный байпасный канал, поперечное сечение которого регулируется заслонкой, а время срабатывания системы стабилизации скорости не должно превышать 1 с.

Инспекционный снаряд перемещается внутри газопровода под действием давления прокачиваемого газа. Когда на его пути встречается препятствие, давление газа повышают до тех пор, пока препятствие не разрушится, а снаряд не начнет двигаться ускоренно. Поскольку при ускоренном движении теряется часть диагностической инфор-

мации, то скорость движения снаряда необходимо регулировать. Одним из способов такой регулировки является пропускание газа через центральное байпасное отверстие, что уменьшает перепад давления на торцах снаряда. Если скорость газа на выходе из снаряда будет больше, чем на входе, то поток импульса, уносимого газом, будет больше, чем втекающего в снаряд. Для этого центральный канал имеет форму сопла Лаваля. В [5] было показано, что сила  $F$ , действующая со стороны газа на снаряд с центральным каналом в виде сопла Лаваля, меньше примерно на 20 %, по сравнению с каналом цилиндрической формы. Однако сила  $F$  определяется не только этой разницей импульсов, но и давлением, действующим на стенки канала. Равнодействующая сил давления в сужающейся части канала в виде сопла Лаваля коллинеарна ускорению снаряда, но имеет противоположное направление, т.е. тормозит снаряд в расширяющейся части сопла. Однако, согласно закону Бернулли, давление газа в расширяющейся, диффузорной части сопла ниже, чем в конфузорной (а скорость выше). Кроме того, давление на стенки диффузора дополнительно понижается в области отрыва потока от стенок. Для уменьшения отрывных зон в [5] было предложено сделать два дополнительных прямолинейных, кольцевых (осесимметричных), конических канала, связывающих область повышенного давления на задней стенке снаряда с поверхностью диффузора и с передней поверхностью снаряда. Это позволило уменьшить силу сопротивления  $F$  еще на 20% по сравнению со случаем аксиально симметричного цилиндрического канала.

В промышленной конструкции инспекционного снаряда форма дополнительных байпасных каналов не может быть осесимметричной. Эти каналы должны иметь, по крайней мере, два выреза, один из которых показан на рис. 1. Внутри вырезов располагаются механизмы привода поворотной заслонки и тормоза. В качестве размера выреза использовали угол между образующими его секущими плоскостями, каждая из которых проходит через край выреза и ось симметрии снаряда.

На рис. 1 виден внутренний байпасный канал, связывающий область повышенного давления на задней поверхности снаряда с частью поверхности диффузора центрального канала, и внешний канал, создающий участки повышенного давления на передней поверхности снаряда. Наличие вырезов в дополнительных байпасах в промышленной конструкции снаряда не позволяет устранить все области пониженного давления в зонах отрыва потока.



**Рис. 1.** Проточная область инспекционного снаряда с двумя дополнительными прямолинейными кольцевыми байпасными каналами, ограниченными вырезом

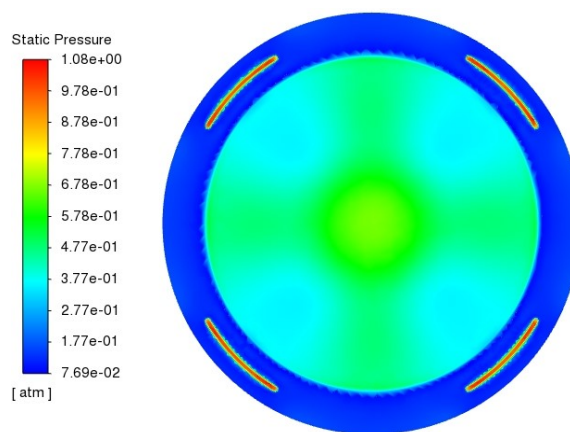
Кроме того, течение газа в байпасах с вырезами становится не аксиально симметричным, т.е. содержит азимутальную и радиальную компоненты скорости, что приводит к дополнительным вязким потерям.

Целью данной работы стало изучение влияния формы байпасных каналов и угла поворота заслонки внутри центрального канала на силу сопротивления  $F$ , для чего решали задачу о течении газа внутри инспекционного снаряда, или задачу о внутренней гидродинамике снаряда.

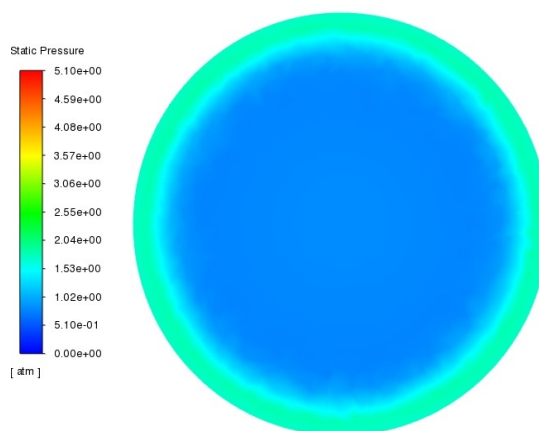
## 2. Постановка задачи и методика ее решения

В ходе численных расчетов варьировались угловой размер дополнительных каналов, их число и форма. Перед соединением дополнительных байпасов с центральным каналом добавляли или не добавляли буферную тороидальную камеру, соединенную с центральным каналом кольцевым, аксиально симметричным зазором для уменьшения азимутальной компоненты скорости на выходе.

Течение сжимаемого газа (воздуха) изучалось средствами вычислительной гидродинамики в пакете ANSYS Fluent. Задачу решали в 3D постановке. Использовали неструктурированную сетку из 2 миллионов полиэдрических элементов (такая сетка имеет наилучшее качество и позволяет сократить время расчета). На стенках строился пристеночный призматический слой. Течение описывали осредненными по Рейнольдсу уравнениями непрерывности и Навье-Стокса, для замыкания которых использовали модель турбулентности  $k-\varepsilon$  со стандартными пристеночными функциями. На входе в расчетную область задавали постоянное статическое давление 5 атм., на выходе – 0 атм.



**Рис. 2.** Распределение давления в центральном канале на выходе из байпасов без буферной камеры. На периферии рисунка показано распределение давления в дополнительных каналах



**Рис. 3.** Распределение давления в центральном канале на выходе из байпасов с буферной камерой

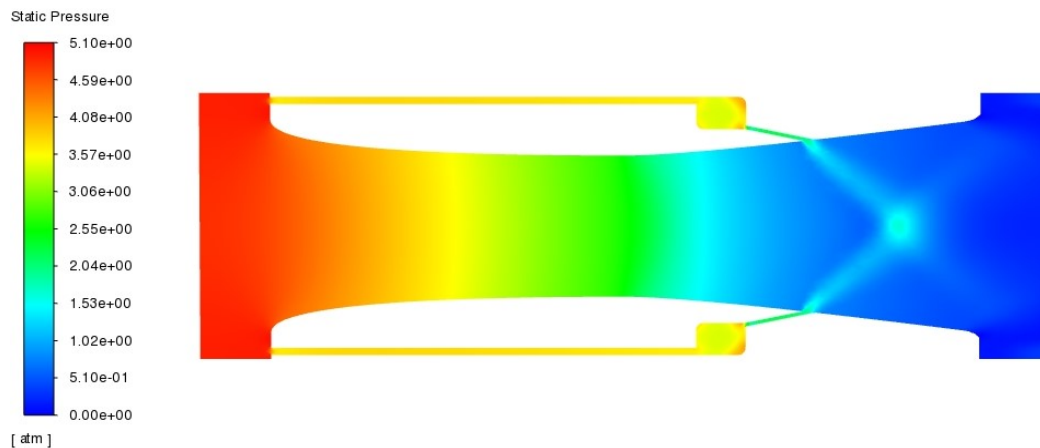


Рис. 4. Распределение давления в байпасе с буферной камерой

### 3. Движение газа в дополнительных каналах

В первой серии расчетов размеры дополнительных байпасных каналов выбирали из соображений удобства размещения устройства поворота заслонки и тормозов: четыре байпасных канала с угловой шириной по  $40^\circ$ , расположенные в шахматном порядке и разделенные четырьмя вырезами по  $50^\circ$  (суммарный угловой размер всех вырезов  $\alpha = 200^\circ$ ).

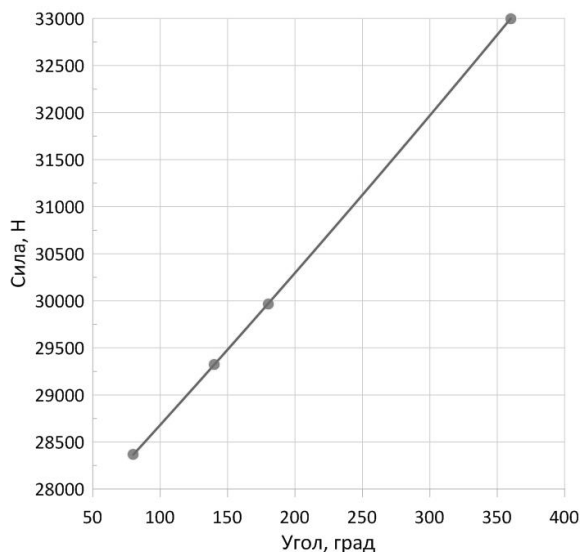


Рис. 5. Зависимость действующей на снаряд силы от угловой ширины вырезов в байпасных каналах

Были проведены расчеты для трех вариантов конструкций: а) с четырьмя внутренними и четырьмя внешними каналами; б) только с четырьмя внутренними; в) только с четырьмя внешними каналами. Во всех случаях сила сопротивления была примерно одинаковой и равной 31700 Н или всего на 3.5% меньше, чем в конструкции без дополнительных байпасов. Столь слабый эффект объясняется малым угловым размером байпасов, т.е. ма-

лой площадью диффузора, на которой изменялось давление (см. рис. 2).

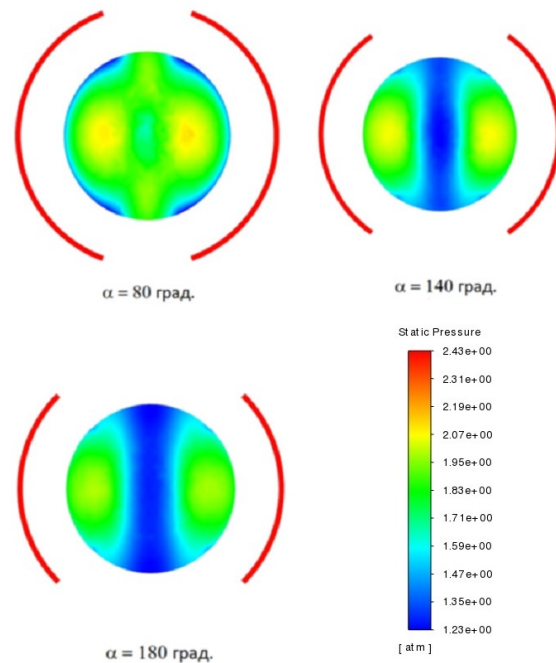


Рис. 6. Поле давления на выходе из прямолинейного байпасного канала (показан красным цветом на периферии фрагментов)

Тороидальная буферная камера на выходе байпаса в центральный канал обеспечила аксиально симметричное распределение давления на стенки диффузора (см. рис. 3), но из-за дополнительного сопротивления на участках расширения и сжатия потока, а также малой осевой протяженности буферной области возрос перепад давления на байпасе. Разность давлений на концах байпасных каналов с кольцевой тороидальной камерой была больше, чем на концах прямолинейных каналов. На рис. 4 видно, что кольцевая камера создает дополнительный перепад давления.

Во второй серии расчетов уменьшили суммарный угловой размер вырезов в дополнительных байпасах, который варьировали в интервале от 80



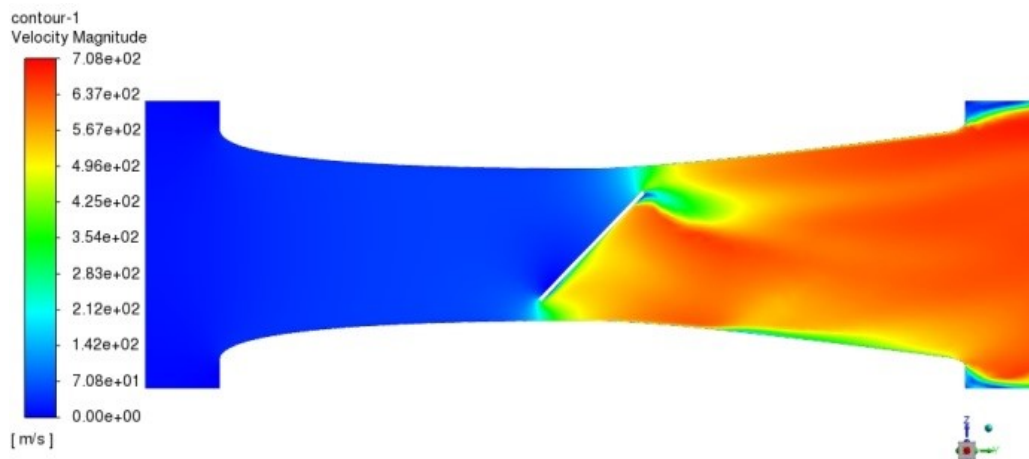


Рис. 7. Поле модуля скорости

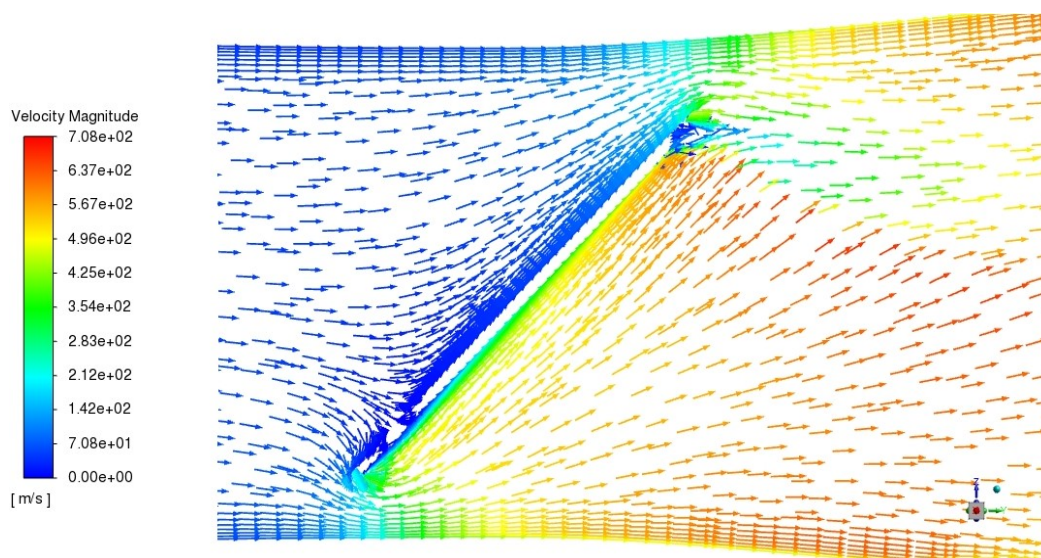


Рис. 8. Векторное поле скорости

до  $180^\circ$ , и уменьшили число вырезов с четырех до двух.

На рис. 5 показана зависимость силы, действующей на снаряд, от угловой ширины вырезов. Видно, что эта зависимость линейная, и два симметричных выреза по  $40^\circ$  уменьшили силу на  $\sim 15\%$  по сравнению со случаем только одного центрального канала в виде сопла Лавалья (при полном отсутствии вырезов в дополнительных аксиально симметричных каналах сила уменьшалась на  $20\%$ ).

Кроме того видно, что при суммарном угловом размере двух симметричных вырезов  $\alpha = 200^\circ$  для силы сопротивления получено значение  $F = 30300$  Н, что на  $1500$  Н меньше, чем при четырех вырезах такого же суммарного углового размера в первой серии расчетов. Следовательно, угловые размеры вырезов нельзя суммировать из-за краевых эффектов.

Отметим, что течение на выходе из прямолинейных байпасов в центральный канал было неоднородным (см. рис. 6). Добавление тороидальной камеры на концы байпасов, соединяемых кольце-

вым, аксиально симметричным каналом с центральным отверстием, как и в первой серии расчетов, устранило эту неоднородность. Однако суммарная сила сопротивления  $F$  не уменьшилась, а возросла, поскольку дополнительные силы сопротивления в байпасах, ставших непрямолинейными, компенсировали выигрыш.

#### 4. Движение газа в центральном канале с поворотной заслонкой

Было проведено моделирование течения газа в центральном канале с поворотной заслонкой. Полученное типичное распределение скоростей приведено на рис. 7 и 8. Видно, что поле скоростей в области заслонки неоднородно, хотя основное свойство сопла Лавалья сохраняется: в диффузорной части скорость течения растет.

На рис. 9 и 10 приведены зависимости сил, действующих на стенки центрального канала и заслонки при различных углах ее открытия (по оси

абсцисс отложена величина, пропорциональная площади зазоров, через которые газ втекает в горловину сопла,  $\varphi$  – угол поворота заслонки, отмеряемый от вертикальной оси  $z$ . Видно, что обе силы практически линейно уменьшаются при увеличении площади зазоров, по которым втекает газ. Интересно отметить, что сила, действующая на стенки центрального канала, уменьшается по мере открытия заслонки и уменьшения аксиальной асимметрии потока.

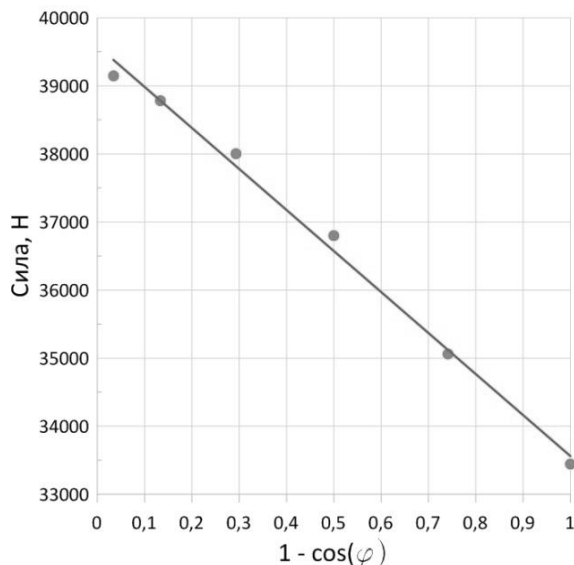


Рис. 9. Зависимость силы, действующей на стенку канала, от угла поворота заслонки

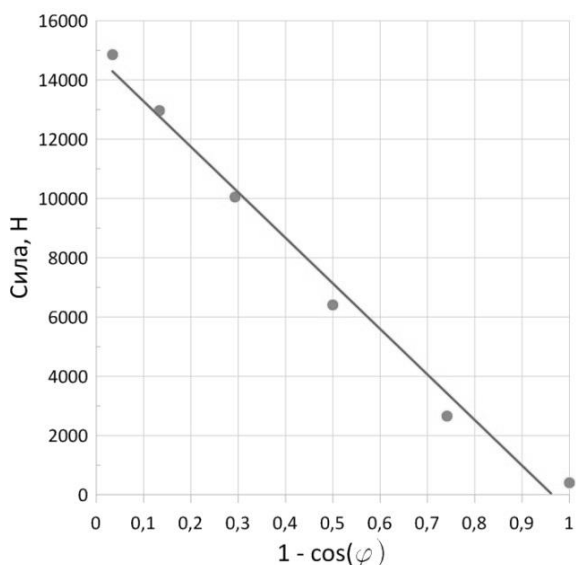


Рис. 10. Зависимость силы, действующей на заслонку от угла ее поворота

## 5. Заключение

Выполнен анализ течения газа в байпасных каналах с вырезом, предназначенным для размещения устройства поворота заслонки и тормозов. Показано, что сила сопротивления уменьшается при

уменьшении суммарной угловой ширины вырезов  $\alpha$  и их числа, которое из практических соображений не может быть меньше двух. При  $\alpha = 80^\circ$  для двух симметричных вырезов получено максимальное снижение силы сопротивления на 35% по сравнению со случаем аксиально симметричного центрального байпасного отверстия цилиндрической формы, что является приемлемым результатом. Максимальное снижение силы в конструкции без вырезов равно 40% по сравнению с байпасом цилиндрической формы [5].

Вычислена используемая при управлении движением инспекционного снаряда зависимость силы сопротивления заслонки от угла ее поворота. Показано, что в широком интервале углов сила сопротивления пропорциональна доле перекрываемой площади.

Сила трения газа о стенки центрального канала увеличивается из-за азимутальной неоднородности потока, создаваемого при закрытии заслонки. Минимальное значение этой силы, близкое к сопротивлению канала без заслонки, достигается при полностью открытой заслонке.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-48-596002 р\_НОЦ\_Пермский край, руководитель А. В. Перминов.

## Список литературы

1. Муллахметова Л. И., Черкасова Е. И. Попутный нефтяной газ: подготовка, транспортировка и переработка // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 19. С. 83–90.
2. Авиленко К. В. «ЭНЕРГАЗ»: опыт подготовки и компримирования низконапорного попутного нефтяного газа // Территория нефтегаз. 2018. № 1–2. С. 72–77.
3. Андрейкина Л. В. Состав, свойства и переработка попутных газов нефтяных месторождений Западной Сибири: автореф. дис. канд. тех. наук. Уфа, 2005. 21 с.
4. 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
5. Muginov R. R., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Mathematical model of the movement of a smart pig in a low-pressure gas pipeline // Abstracts of International symposium “Nonequilibrium Process in Continuous Media”. Perm, Perm University. 2021. P. 89.

## References

1. Mullakhmetova L. I., Cherkasova E. I. Poputnyj neftianoj gaz: podgotovka, transportirovka i pere-

- rabotka [Associated petroleum gas: preparation, transportation and processing]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 19, pp. 83–90 (In Russian).
2. Avilenko K. V. “ENERGAZ”: opyt podgotovki i komprimirovaniya nizkonapornogo poputnogo nefljanogo gaza [“ENERGAZ”: experience in treatment and compression of low-pressure associated petroleum gas]. *Territorija Neftegas – Oil and Gas Territory*, 2018, no. 1–2, pp. 72–77 (In Russian).
  3. Andreikina L. V. *Sostav, svoystva i pererabotka poputnyh gazov nefljanых mestorozhdenij Zapadnoj Sibiri* [Composition, properties and processing of associated gases from oil fields in Western Siberia]. Abstr. of Cand. tech. sci. thesis. Ufa, 2005. 21 p. (In Russian)
  4. 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)
  5. Muginov R. R., Peshcherenko S. N., Perminov A. V. Mathematical model of the movement of a smart pig in a low-pressure gas pipeline. *Abstracts of International symposium “Nonequilibrium Process in Continuous Media”*. Perm, Perm University, 2021, p. 89.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

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

**Please cite this article in English as:**

Pavlov D. A., Peshcherenko M. P., Muginov 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

**Сведения об авторах**

1. *Данил Андреевич Павлов*, аспирант 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*, Postgraduate Student, 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*, Head of Department, 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