

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

Динамика движения инспекционного снаряда в газопроводе низкого давления

Р. Р. Мугинов^{1†}, С. Н. Пещеренко^{2‡}, А. В. Перминов^{2•}

¹ ООО «ПСО «НефтеГазДиагностика»

107076, Москва, Колодезный переулок, д. 3, стр. 25, оф.25.

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

614990, Пермь, Комсомольский пр-т., 29

† muginov@gmail.com

‡ peshcherenko@yandex.ru

• perminov1973@mail.ru

В настоящее время диагностика газопроводов осуществляется внутритрубными снарядами, приводимыми в движение перекачиваемым газом без изменения режима работы трубопровода. Необходимым условием качественной диагностики является постоянство скорости снарядов. Если трубопровод не содержит неоднородностей (стопоров), то установившееся движение снаряда происходит с постоянной скоростью. Однако, при наличии неоднородностей, движение становится неравномерным: чем ниже давление в трубопроводе, тем неравномернее движение снаряда. Из опыта известно, что для обеспечения движения снаряда с постоянной скоростью необходимо, чтобы давление в трубопроводе было не менее 30 атм. В трубопроводах для попутного нефтяного газа давление обычно не превышает 10 атм. С повышением экологических стандартов эксплуатации нефтяных месторождений в России появились несколько тысяч километров газопроводов для попутного нефтяного газа, что обуславливает актуальность проблемы их диагностики. В данной статье на основе анализа физических процессов, протекающих при движении диагностического снаряда, получены уравнения, описывающие его движение, и выполнены оценки взаимодействия снаряда со стопорами внутри газопровода. Предложена концепция нового диагностического снаряда для трубопроводов попутного нефтяного газа низкого давления, установлены и обоснованы основные способы управления его движением.

Ключевые слова: одномерное движение; газопровод низкого давления; диагностический снаряд; стабилизация движения

Поступила в редакцию 21.04.2021; после рецензии 21.05.2021; принята к опубликованию 24.05.2021

Dynamics of movement of a smart pig in a low pressure gas pipeline

R. R. Muginov^{1†}, S. N. Peshcherenko^{2‡}, A. V. Perminov^{2•}

¹ PSO "NefteGasDiagnostics", Kolodezny pereulok, 3-25, off. 25, 107076, Moscow, Russia

email: muginov@gmail.com

² Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky prospekt, 29, 614990, Perm, Russia

† muginov@gmail.com

‡ peshcherenko@yandex.ru

• perminov1973@mail.ru

Currently, diagnostics of gas pipelines is carried out by in-line smart pigs driven by the pumped gas without changing the operating mode of the pipeline. A necessary condition for high-quality diagnostics is the constant velocity of the pig. If the pipeline does not contain inhomogeneities (plugs), then the steady movement of the smart pig occurs at a constant speed. However, in the presence of inhomogeneities, the movement becomes uneven, and the lower the pressure in the pipeline, the greater the inhomogeneity of the pig movement. From experience, it is known that to ensure a constant velocity of the pig, the required pressure inside the pipeline must be at least 30 atm. In pipelines for associated petroleum gas, the pressure usually does not exceed 10 atm. With the tightening of environmental regulations for the operation of oil fields in Russia, several thousand kilometers of gas pipelines for associated petroleum gas have appeared, and the problem of their diagnosis is urgent. In this article, the analysis of the physical processes accompanying the smart pig's movement allowed us to obtain equations describing its movement, and to make estimates of the interaction of the pig with the plugs inside the gas pipeline. The concept of a new pig for a low-pressure associated petroleum gas pipeline is proposed, and the main methods of controlling its movement are established and justified.

Keywords: one-dimensional motion; low-pressure gas pipeline; smart pig; motion stabilisation

Received 21.04.2021; revised 21.05.2021; accepted 24.05.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-2-36-47

1. Введение

В настоящее время диагностика газопроводов осуществляется внутритрубными снарядами, приводимыми в движение перекачиваемым газом без изменения режима работы трубопровода. Снаряд имеет цилиндрический корпус, на котором закреплены кольцевые манжеты, опирающиеся на стенки трубопровода и уплотняющие зазор между корпусом и трубопроводом. Внутри корпуса находится диагностическое оборудование. Снаряд движется за счет разности давлений на переднем и заднем торцах корпуса. Необходимым условием качественной диагностики является постоянство скорости снаряда.

Если трубопровод не содержит неоднородностей (стопоров) и газ по нему прокачивается в стационарном режиме, то в установившемся режиме снаряд движется с постоянной скоростью. Однако, при наличии неоднородностей, равномерность движения будет тем меньше, чем ниже давление в трубопроводе. Из опыта известно, что для обеспечения равномерного движения снаряда необходимо, чтобы давление в трубопроводе было не менее 30 атм.

В связи с повышением экологических стандартов эксплуатации нефтяных месторождений в России появились несколько тысяч километров (по оценкам более 7000 км) газопроводов низкого давления (не более 10 атм), предназначенных для транспортировки попутного нефтяного газа от нефтяных скважин до пунктов сбора и переработки. Многофазная смесь, перекачиваемая по этим трубопроводам, состоит из скважинной жидкости (1–5%), твердых частиц (менее 0.01%) и газа, является коррозионно-активной средой. Поэтому ак-

туальной является проблема диагностики состояния трубопроводов низкого давления.

Диагностика таких трубопроводов существующими моделями внутритрубных диагностических снарядов затруднительна, а порой и невозможна. Во-первых, это объясняется тем, что при неравномерном движении снаряда не все дефекты трубопровода могут быть обнаружены. Во-вторых, при ускорении снаряда возрастают силы его взаимодействия со стенками трубопровода, что может привести к разрушению как снаряда, так и трубопровода.

Россия является крупнейшей нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей страной, где проблемы, связанные с транспортировкой и переработкой такого природного ресурса, как попутный нефтяной газ, являются достаточно серьезными. В силу высокой коррозионности попутного газа и, как следствие, высокой аварийности на трубопроводах низкого давления, по которым транспортируется такой газ, возникает необходимость разработки эффективных методов диагностики состояния трубопроводов.

В настоящее время основными методами для обнаружения дефектов газопроводов диагностическими снарядами являются:

- акустические, основанные на индикации колебаний, возникающих при вытекании газа через сквозные отверстия (детекторы течи);
- статические магнитные, заключающиеся в измерении полей рассеяния, создаваемых дефектами материала стенки трубопровода, намагниченной постоянным магнитным полем;
- динамические магнитные или вихревые, основанные на индуцировании вихревых токов в стенках трубопровода.

Обработка (запись) получаемых данных требует времени, поэтому возникает ограничение на предельную скорость движения диагностического снаряда, когда нет потери информации.

При инспекции магистральных газопроводов применяются преимущественно пассивные (поршневые) снаряды. Известны лишь единичные случаи применения снарядов с центральным регулируемым каналом для сброса давления. В первую очередь, это обусловлено тем, что магистральные трубопроводы имеют большие (порядка 1 м) диаметры и работают под высоким давлением (порядка 50–60 атм.), поэтому скорость диагностического снаряда при преодолении препятствий (сварные швы, разветвление трубопровода, отклонение от цилиндрической формы и др.) меняется незначительно. Практически нет проблемы потери информации с датчиков диагностического снаряда.

Также нет этой проблемы и при ревизии трубопроводов меньшего диаметра (до 30–50 см), если их рабочее давление не ниже 20–30 атм.

Трубопроводы низкого давления (не более 10 атм), в основном, предназначены для транспортировки попутного газа с нефтяных скважин на пункты сбора. Они были построены после принятия в России закона о запрете сжигания попутного газа на скважинах и поэтому еще достаточно новые. Чтобы не столкнуться в будущем с проблемой их массового ремонта, нужно уже сейчас начинать разрабатывать диагностические снаряды с контролируемой скоростью движения.

Систематических исследований, связанных с математическим моделированием или натурными физическими экспериментами, в направлении разработки концепции диагностического снаряда с контролируемой скоростью движения, пока не проводились. Известен лишь ряд частных решений, защищенных патентами. Так в патенте [1] предлагается устройство регулировки сечения центрального байпасного канала. В патенте [2], помимо центрального канала, предлагается использовать дополнительные байпасные каналы. В патенте [3] предлагается корректировать скорость движения диагностического снаряда путем включения в его состав устройства мотор-генератор-колесо, которое может работать в трех режимах: как двигатель, тормоз или пассивное устройство. В патенте [4] предлагается использовать подвижные манжеты, приводимые в движение, когда снаряд застревает в газопроводе.

Необходима разработка как математической модели движения инспекционного снаряда в газопроводе, так и самосогласованной концепции диагностического снаряда с контролируемой скоростью движения, в которой будут получены количественные оценки всех возможных способов управления его движением: от регулировки течения газа в байпасе, до торможения на стадии разгона снаряда. И, в первую очередь, должна быть

решена задача определения возможных масштабов неравномерности движения, что и является целью данной работы.

2. Уравнения движения

Рассматривается инспекционный снаряд, имеющий форму сплошного цилиндра и движущийся по прямолинейной цилиндрической трубе кругового сечения, заполненной газом. Движение газа и снаряда под действием градиента давления, созданного в трубе, удобно рассматривать в цилиндрической системе координат, ось x которой направлена вдоль оси симметрии цилиндрической трубы. Полная система уравнений, описывающих движение инспекционного снаряда, состоит из

- уравнения движения центра масс снаряда;
- уравнения деформации стенок трубопровода под действием внутреннего давления;
- закона сохранения импульса газа в трубопроводе, уравнения Навье–Стокса;
- закона сохранения массы газа или уравнения непрерывности;
- закона сохранения энергии или уравнения теплопроводности.

2.1. Уравнение движения центра масс

Уравнение движения центра масс снаряда в горизонтальном трубопроводе имеет следующий вид:

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{fr}, \quad (2.1)$$

где m и \mathbf{u} – масса и скорость снаряда, соответственно, \mathbf{F} – сила давления, действующая на снаряд со стороны газа, $\mathbf{F}_{fr} = kmg$ – сила трения о стенки трубопровода, k – коэффициент трения.

2.2. Деформация стенок трубопровода

Оценим, может ли деформация стенок из-за изменения давления значимо изменить силу взаимодействия газа с инспекционным снарядом.

Вектор деформации стенок трубопровода при изменении давления внутри трубопровода имеет только радиальную компоненту $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_r, \tilde{u}_\varphi, \tilde{u}_x) = (\tilde{u}(r), 0, 0)$ и находится из решения уравнения равновесия [5]:

$$\nabla(\nabla\tilde{\mathbf{u}}) - \frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \nabla \times (\nabla \times \tilde{\mathbf{u}}) = 0 \Rightarrow$$

$$\nabla\tilde{\mathbf{u}} = \frac{1}{r} \frac{d(r\tilde{u})}{dr} = const, \Rightarrow \tilde{u} = ar + \frac{b}{r},$$

где σ – коэффициент Пуассона. Отличные от нуля компоненты тензора деформаций:

$$\tilde{u}_{rr} = \frac{d\tilde{u}}{dr} = a - \frac{b}{r^2}, \quad \tilde{u}_{\varphi\varphi} = \frac{\tilde{u}}{r} = a + \frac{b}{r^2}$$

и тензора напряжений:

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \left(a - \frac{b}{r^2} (2\sigma - 1) \right),$$

где E – модуль Юнга. Из граничных условий: $\sigma_{rr}|_{R_2} = 0$, $\sigma_{rr}|_{R_1} = -p$ следует

$$a = \frac{pR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E},$$

$$b = \frac{pR_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{(1+\sigma)}{E},$$

где R_1 и R_2 – радиусы внутреннего и внешнего сечения трубы, p – давление газа в трубе.

Относительная деформация внутренней стенки трубы в радиальном направлении равна

$$\varepsilon = \tilde{u}_{rr}|_{R_1} = a - \frac{b}{R_1^2} =$$

$$= \frac{pR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{(1+\sigma)}{E} \left(1 - 2\sigma - \frac{R_2^2}{R_1^2} \right) \approx$$

$$\approx \frac{p(1+\sigma)}{E} \frac{R_1}{h} \left(\sigma + \frac{h}{R_1} \right),$$

$h = R_2 - R_1$ – толщина стенки трубы, тогда абсолютная деформация:

$$\Delta R = R_1 |\varepsilon| = R_1 \frac{p(1+\sigma)}{E} \frac{R_1}{h} \left(\sigma + \frac{h}{R_1} \right).$$

В максимально нагруженных условиях эксплуатации трубопроводов попутного газа: $R_1 = 0.25$ м, $p = 30$ атм., $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\sigma = 0.25$, $h = 0.007$ м, получим $\Delta R \sim 10^{-5}$ м или $\sim 10^{-2}$ мм. Таким образом, можно считать, что трубопровод не деформируется при изменении условий прокачки газа.

2.3. Уравнения движения неизотермического газа в трубе

Запишем уравнения Навье-Стокса в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии, где вектор скорости газа $\mathbf{v}(v_r, v_\varphi, v_x)$. Вкладом тепловой конвекции в движение газа пренебрегаем. В этом случае можно полагать, что $v_r \ll v_x$ и $v_\varphi = 0$. Тогда радиальная и азимутальная проекции уравнения движения газа примут простой вид:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0.$$

Из чего можно заключить, что давление газа, а так же его плотность являются только функциями времени и продольной координаты $p(t, x)$, $\rho(t, x)$.

Проекция уравнения движения газа на продольную координатную ось x примет вид

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x^2)}{\partial x} =$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right),$$

где ρ – плотность, η – динамическая вязкость газа.

Осредним данное уравнение по сечению трубы внутреннего радиуса R , перпендикулярному скорости:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \int_0^R 2\pi r v_x dr \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^R 2\pi r v_x^2 dr \right) =$$

$$= -\frac{\partial}{\partial x} \int_0^R 2\pi r p dr + \eta \int_0^R \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) 2\pi r dr +$$

$$+ \eta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^R v_x 2\pi r dr,$$

и выполним преобразования:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \int_0^R 2\pi r v_x dr \right) = \pi R^2 \frac{\partial(\rho \langle v_x \rangle)}{\partial t},$$

$$\langle v_x \rangle = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r v_x dr,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^R 2\pi r v_x^2 dr \right) = \pi R^2 \frac{\partial(\rho \langle v_x^2 \rangle)}{\partial t},$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^R 2\pi r p dr = \frac{\partial}{\partial x} \left(p \int_0^R 2\pi r dr \right) = \pi R^2 \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$\eta \int_0^R \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) 2\pi r dr = 2\pi R \eta \left. \frac{\partial v_x}{\partial r} \right|_R = -\tau,$$

$$\eta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^R v_x 2\pi r dr = \pi R^2 \eta \frac{\partial^2 \langle v_x \rangle}{\partial x^2},$$

где τ – сила трения газа со стенками трубы единичной длины.

Осредненное уравнение Навье-Стокса принимает следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho \langle v_x \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \langle v_x^2 \rangle)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 \langle v_x \rangle}{\partial x^2} - \frac{\tau}{\pi R^2}.$$

Уравнение непрерывности аналогичным образом осредняем по поперечному сечению:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \langle v_x \rangle)}{\partial x} = 0$$

Уравнение теплопроводности:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) T \right) = \lambda \Delta T,$$

где c_p – удельная теплоемкость, λ – теплопроводность газа. Преобразуем уравнение теплопровод-

Физико-механические свойства ПНГ при температуре 25°C и давлении 1 атм.

Газ	ρ , кг/м ³	η , кг/(м К)	μ , кг/моль	λ , Вт/(м К)	c_p , Дж/(кг К)
Метан, CH ₄	0.6679	$1.087 \cdot 10^{-5}$	16.04	0.0332	2222
Этан, C ₂ H ₆	1.263	$9.29 \cdot 10^{-6}$	30.07	0.0207	1731
Пропан, C ₃ H ₈	1.91	$7.95 \cdot 10^{-6}$	44.09	0.0177	1549
Бутан, C ₄ H ₁₀	2.46	$7.0 \cdot 10^{-6}$	58.12	0.0159	2620
ПНГ	1.16	$9.7 \cdot 10^{-6}$	27.26	0.0270	2078

ности, учитывая, что $v_r \ll v_x$ и $v_\varphi = 0$,
 $\mathbf{v} = (0, 0, v_x(t, r, x))$, $T = T(t, r, x)$:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right).$$

Осредним последнее уравнение по поперечно-
му сечению потока, перпендикулярному вектору
скорости:

$$\begin{aligned} \rho c_p \int_0^R 2\pi r \frac{\partial T}{\partial t} dr + \int_0^R 2\pi r v_x \frac{\partial T}{\partial x} dr = \\ = \lambda \int_0^R \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) 2\pi r dr + \lambda \int_0^R \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} 2\pi r dr. \end{aligned}$$

Рассмотрим отдельно каждое слагаемое в напи-
санном выше уравнении:

$$\int_0^R 2\pi r \frac{\partial T}{\partial t} dr = \pi R^2 \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t}, \quad \langle T \rangle = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r T dr,$$

$$\begin{aligned} \int_0^R 2\pi r v_x \frac{\partial T}{\partial x} dr &= \pi R^2 \left\langle v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle, \\ \lambda \int_0^R \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) 2\pi r dr &= 2\pi r \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_R = q(R), \\ \lambda \int_0^R \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} 2\pi r dr &= \lambda \pi R^2 \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial x^2}, \end{aligned}$$

где $q(R)$ – поток тепла, получаемый стенками тру-
бы от газа на ее единичной длине (тепло образует-
ся за счет сжатия газа).

Осредненное уравнение теплопроводности
принимает следующий вид:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \langle v_x \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial x^2} + \frac{q}{\pi R^2}.$$

Это уравнение записано в предположении, что
температура газа слабо изменяется по сечению
трубы, т.е. $T(t, r, x) \approx \text{const}(r)$, тогда

$$\left\langle v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right\rangle \approx \langle v_x \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x}, \quad \text{а } \langle T \rangle \approx T.$$

Запишем окончательно систему уравнений,
описывающих неизотермическое течение газа в
трубе, опуская угловые скобки и индекс x . Теперь

v и T обозначают средние по сечению значения
продольной компоненты скорости и температуры:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\tau}{\pi R^2}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad (2.3)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q}{\pi R^2}. \quad (2.4)$$

3. Результаты расчетов

Будем считать, что газопровод прямолинейный
и расположен горизонтально, его внешний диа-
метр 0.325 м, толщина стенки 7 мм. Длина прямо-
линейного участка $L \approx 5 \cdot 10^2$ м. На входе в трубо-
провод поддерживается постоянное давление
 $p_0 = 10^6$ Па, которое приводит снаряд в движение.
Характерная средняя скорость движения газа
 $v_0 \approx 1$ м/с. Масса снаряда составляет 600 кг.

3.1. Распределение давления в газопроводе с движущимся снарядом

Попутный нефтяной газ (ПНГ) состоит из сме-
си метана (~ 60%) и его гомологов, в основном
этана (~ 10%), пропана (~ 20%) и бутана (~ 10%).
Их физико-механические свойства приведены в
таблице, где также представлены и свойства ПНГ,
вычисленные по правилу смеси:

$$\langle f \rangle = \sum_i c_i f_i.$$

В качестве уравнения состояния газа будем ис-
пользовать уравнение Менделеева–Клапейрона,
удовлетворительно описывающее газ низкого дав-
ления [6]:

$$p = \frac{\rho}{\mu} N_A k_B T, \quad (3.1)$$

где N_A и k_B , соответственно, постоянные Авогадро
и Больцмана.

Течение газа турбулентное, так как число Рей-
нольдса

$$\text{Re} = \frac{2Rv}{\nu} \approx \frac{0.3 \cdot 1}{10^{-5}} = 3 \cdot 10^4$$

превышает критическое значение.

В уравнении (2.2) последним слагаемым можно пренебречь:

$$\frac{\eta \partial^2 v / \partial x^2}{\rho v \partial v / \partial x} \sim \frac{v}{vL} \approx \frac{10^{-5}}{1 \cdot 10^3} \approx 10^{-8}.$$

Перепад давления на трубе за счет движения вязкого газа длиной L в турбулентном режиме аппроксимируем эмпирической формулой Блазиуса [7]:

$$\Delta p = \xi \frac{L}{2R} \frac{\rho v^2}{2}, \quad \xi = \frac{0.316}{\text{Re}^{0.25}}. \quad (3.2)$$

При установившемся течении имеет место равновесие силы давления и вязкого трения, из чего следует

$$\Delta p \pi R^2 = 2\pi R L \tau,$$

что позволяет с учетом (3.2) получить оценку для плотности сил трения газа со стенками трубопровода:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{R}{2L} \Delta p = \frac{0.316}{8\text{Re}^{0.25}} \rho v^2 = \\ &= 0.033 \left(\frac{\eta}{R} \right)^{0.25} \rho^{0.75} v^{1.75}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Если газ прокачивается по газопроводу без инспекционного снаряда, то перепад давления на его концах можно вычислить согласно (3.2):

$$\Delta p_t = \frac{0.316}{(2Rv_0\rho/\eta)^{0.25}} \frac{L}{2R} \frac{\rho v_0^2}{2} \approx 200 \text{ Па}.$$

Поскольку $\Delta p_t \ll p_0$, то газ можно считать несжимаемым.

Если инспекционный снаряд движется с постоянной скоростью, то, согласно (2.1), перепад давления на снаряде Δp_a находится из условия $\Delta p_a \pi R^2 = kmg$ и равен:

$$\Delta p_a = \frac{kmg}{\pi R^2} = 4.3 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Видно, что и в этом случае выполняется условие несжимаемости газа: $\Delta p_a \ll p_0$.

Итак, сжимаемостью газа в уравнениях, описывающих его стационарное движение, можно пренебречь.

Переходим к анализу ускоренного движения снаряда при преодолении стопоров. Выделим объем газа V_1 вблизи торца снаряда и обозначим его давление и температуру как p_1, T_1 . Пусть этот объем в результате скачкообразного перемещения снаряда станет равным $V_2 < V_1$, а давление и температура p_2, T_2 . Будем считать процесс адиабатическим, т.е. $pV^\gamma = \text{const}$, а газ идеальным

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (3.4)$$

Учтем, что при относительном изменении температуры на $\sim 15\%$ физико-механические свойства попутного нефтяного газа изменяются незначительно, а показатель адиабаты $\gamma = 1.35$, поэтому

$$p_2 = p_1 \cdot 1.15^{3.9} \approx 1.7 p_1.$$

Это означает, что при скачках давления на ± 7 атм ($p_1 = 10$ атм,) при прохождении снарядом стопоров, изменение его теплофизических свойств можно не учитывать.

3.2. Движение снаряда внутри газопровода, преодоление стопоров

Для того чтобы измерения дефектов материала стенок трубопровода были точными, скорость движения инспекционного снаряда должна быть постоянной.

При типичных условиях эксплуатации входное давление в газопроводе попутного нефтяного газа $p_0 = \text{const}$, а градиент давления по длине трубопровода, как было показано выше, мал. Если в газопроводе нет стопоров и коэффициент трения $k = \text{const}$, то можно считать, что от входа в газопровод до снаряда давление равно p_0 , а от снаряда до выхода из газопровода на Δp_0 меньше. Величина Δp_0 при равномерном движении снаряда находится из уравнения (2.1):

$$\pi R^2 (p_0 - \Delta p_0) = kmg, \quad \Delta p_0 = p_0 - \frac{kmg}{\pi R^2}.$$

Если при встрече со стопором инспекционный снаряд останавливается, то давление от входа в газопровод до снаряда не меняется и остается равным входному, т.е. p_0 . На участке от снаряда до выхода из газопровода давление будет падать, так как газ продолжает вытекать из газопровода (если манжеты снаряда плотно прилегают к стенкам газопровода и через них нет утечки, в противном случае для снятия снаряда со стопора придется вскрывать стенку газопровода). Перепад давления на снаряде растет и может наступить момент, когда стопор разрушится (при перепаде давления равном Δp). Тогда снаряд начнет двигаться ускоренно и качество сканирования дефектов в стенках трубопровода уменьшится.

Для разработки концепции снаряда и выбора средств стабилизации его движения необходимо оценить возникающее ускорение.

При скачкообразном перемещении снаряда при его срыве со стопора газ у заднего торца снаряда адиабатически расширяется, а у переднего торца – адиабатически сжимается. Так можно считать потому, что скорость звука в газе (см. таблицу):

$$c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho}} \approx 930 \text{ м/с},$$

а прямолинейные участки по обе стороны от снаряда – $5 \cdot 10^2$ м, т.е. давление в них выравнивается за малый промежуток времени ~ 0.5 с. Давление по обе стороны от снаряда изменяется только за счет перемещения самого снаряда. Объем газа в трубопроводе от его начала до стопора обозначим V_{10} , а от стопора до конца трубопровода – V_{20} .

Уравнение движения снаряда после срыва со стопора примет вид:

$$m \frac{du}{dt} = \pi R^2 (p_1 - p_2) - kmg \cdot \text{sgn}(u),$$

где учтено, что скорость снаряда может менять направление на противоположное, что приведет к изменению направления силы трения.

Поскольку процесс адиабатический, то

$$p_0 V_{10}^\gamma = p_1 V_1^\gamma, \quad V_{10} = \pi R^2 L_1,$$

$$V_1 = V_{10} + \int_0^t u(t) dt,$$

$$p_1 = p_0 \left(\frac{L_1}{L_1 + \int_0^t u(t) dt} \right)^\gamma,$$

$$(p_0 - \Delta p) V_{20}^\gamma = p_2 V_2^\gamma, \quad V_{20} = \pi R^2 L_2,$$

$$V_2 = V_{20} - \int_0^t u(t) dt,$$

$$p_2 = (p_0 - \Delta p) \left(\frac{L_2}{L_2 - \int_0^t u(t) dt} \right)^\gamma,$$

поэтому

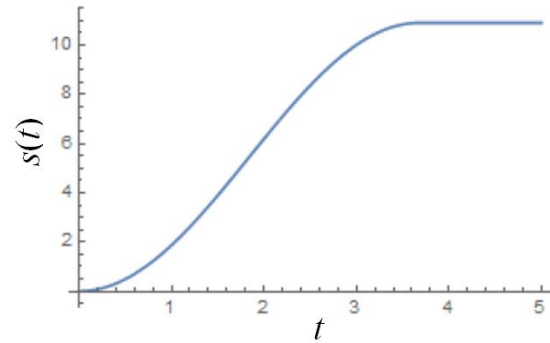
$$m \frac{du}{dt} = \pi R^2 p_0 \left[\left(\frac{L_1}{L_1 + \int_0^t u(t) dt} \right)^\gamma - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_0} \right) \left(\frac{L_2}{L_2 - \int_0^t u(t) dt} \right)^\gamma \right] - kmg \cdot \text{sgn}(u),$$

$$\Delta p > \Delta p_0$$

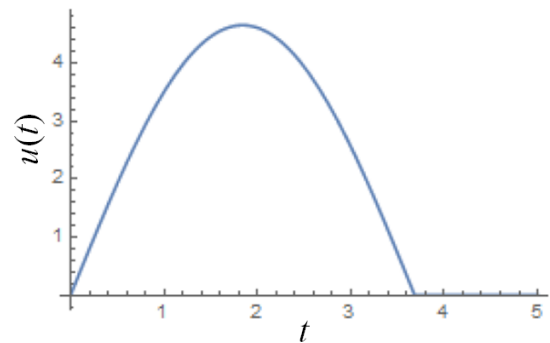
Введем обозначение: $s(t) = \int_0^t u(t) dt$, тогда

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} = \pi R^2 p_0 \left[\left(\frac{L_1}{L_1 + s(t)} \right)^\gamma - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_0} \right) \left(\frac{L_2}{L_2 - s(t)} \right)^\gamma \right] - kmg \cdot \text{sign} \left(\frac{ds(t)}{dt} \right), \quad (3.5)$$

Решение уравнения (3.5) при $s(0) = s'(0) = 0$, $L_1 = L_2 = 5 \cdot 10^2$ м, $\Delta p = \alpha p_0$ приведено на рис. 1–4.



(а)



(б)

Рис. 1. Зависимость расстояния $s(t)$, пройденного снарядом (а), и его скорости $u(t)$ от времени при $\alpha = 0.05$

Если прочность стопора небольшая (см. рис. 1 для $\alpha = 0.05$), то сила, действующая на снаряд в момент срыва со стопора, равна

$$F_0 = \pi R^2 \alpha p_0 = 4150 \text{ Н.}$$

Скорость снаряда в этом случае достигнет величины порядка 4 м/с, что не критично, так как современные измерительные приборы обеспечивают приемлемую точность диагностики дефектов трубопроводов до скоростей ~ 10 м/с. Также видно, что снаряд ускоренно проходит участок длиной около 10 м и останавливается. Дальнейшее движение снаряда будет определяться темпами сброса газа из выходного конца трубопровода.

При $\alpha = 0.075$ и $F_0 = 6200$ Н (рис. 2) максимальная скорость снаряда приближается к критическому значению ~ 10 м/с, кроме того, меняет знак. Снаряд совершает квазиколесательное движение. При таких стопорах уже возможна потеря диагностической информации. Чтобы этого не произошло, движением снаряда нужно управлять. Из рис. 2 видно, что характерное время реакции системы управления τ должно быть порядка 1 с.

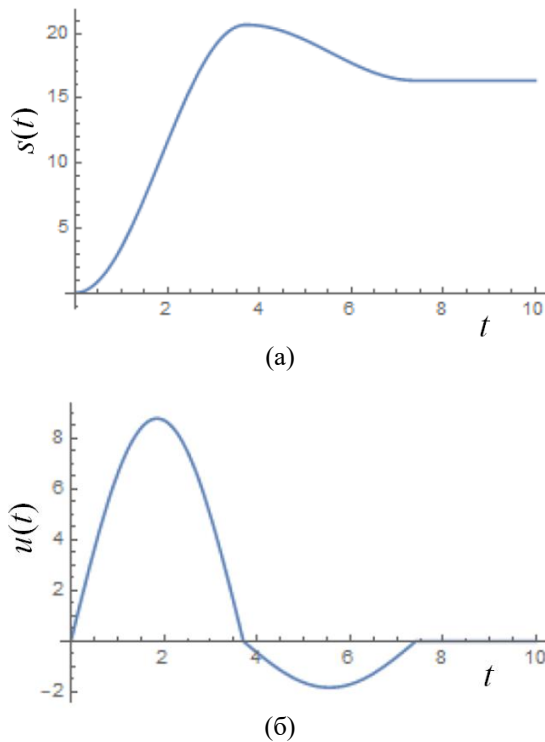


Рис. 2. Зависимость расстояния $s(t)$, пройденного снарядом (а), и его скорости $u(t)$ (б) от времени при $\alpha = 0.075$

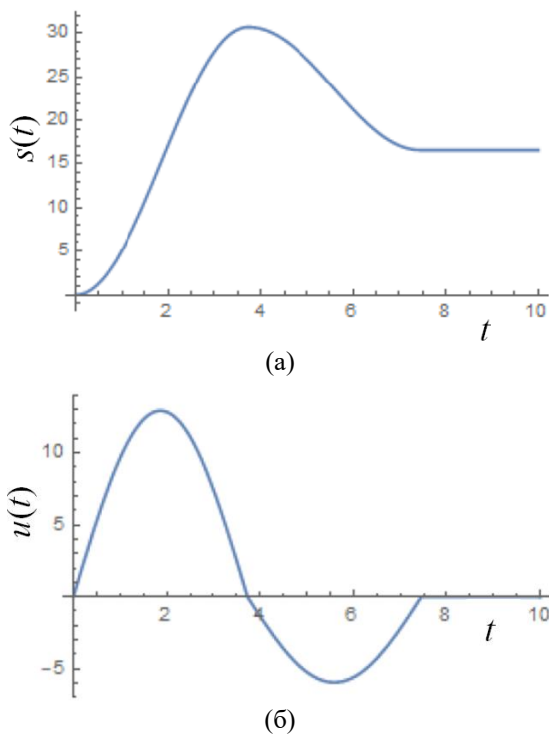


Рис. 3. Зависимость расстояния $s(t)$, пройденного снарядом (а), и его скорости $u(t)$ (б) от времени при $\alpha = 0.1$

При $\alpha = 0.1$ и $F_0 = 8300$ Н (рис. 3) и $\alpha = 0.2$ и $F_0 = 16500$ Н (рис. 4) снаряд совершает затухающие колебательные движения, при этом скорость превышает допустимое критическое значение ~ 10 м/с. Необходимо управление скоростью движения снаряда. Время реакции системы управления τ по-прежнему порядка 1 с.

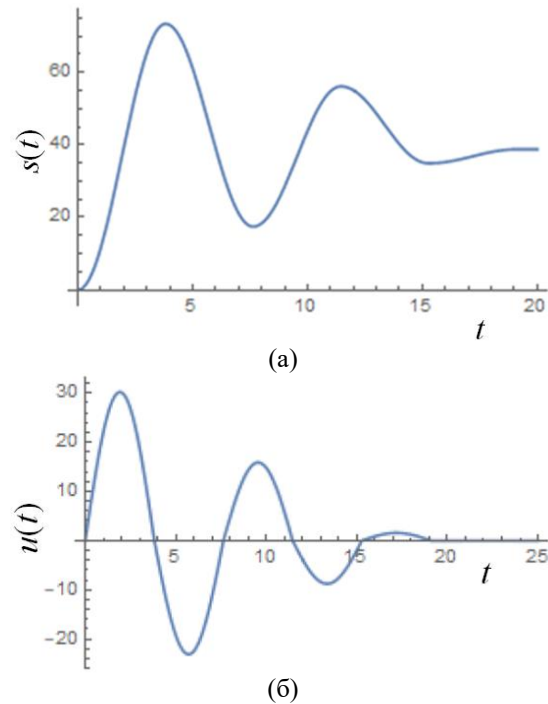


Рис. 4. Зависимость расстояния $s(t)$, пройденного снарядом (а), и его скорости $u(t)$ (б) от времени при $\alpha = 0.2$

Из этих результатов следует, что допустимая величина скачкообразного перемещения снаряда при преодолении им стопора составляет величину $s_1 \approx 10$ м, тогда

$$p_1 = p_0 \left(\frac{L_1}{L_1 + s_1} \right)^\gamma \approx 0.97 p_0,$$

т.е. давление изменяется на 3%, и из (3.4) следует, что в практически значимых режимах работы инспекционного снаряда можно считать, что температура газа практически не изменяется.

Если один из концов трубы открыт и на нем поддерживается атмосферное давление, то в случае остановки снаряда на стопоре нужно будет повышать давление газа в трубопроводе с противоположного конца трубы до срыва снаряда со стопора, т.е. до величины $p = F_0 / (\pi R^2)$. Например, при прочности стопора $F_0 = 8300$ Н (рис. 5) снаряд будет монотонно ускоряться. Режим движения снаряда со скоростью более 10 м/с не желателен, следовательно, время реагирования систем управления снарядом составляет менее 1 с.

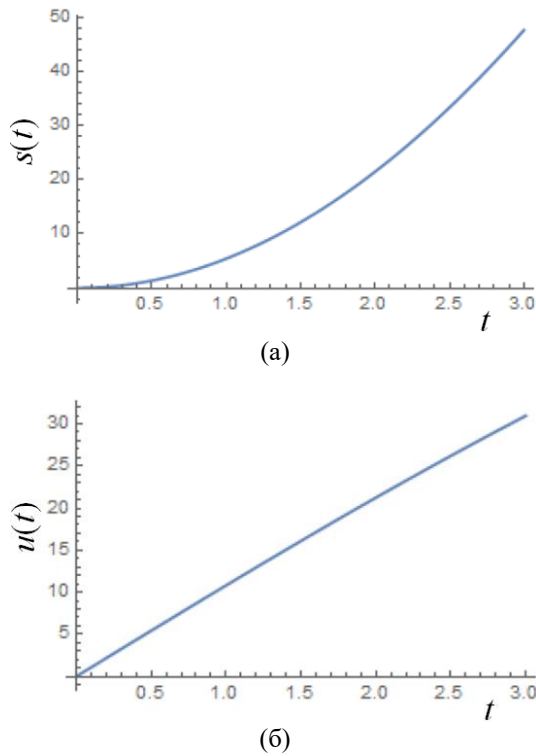


Рис. 5. Зависимость расстояния $s(t)$, пройденного снарядом (а), и его скорости $u(t)$ (б) от времени при $F_0 = 8300$ Н

Замедление снаряда при его торможении на стопорах практически не влияет на точность диагностики дефектов трубопровода, но накладывает ограничения на прочность конструкции, особенно измерительных приборов. Для их защиты можно использовать демпфер, характеристиками которого являются сила деформирования F и величина деформации Δl . Тогда

$$\frac{mu^2}{2} = F\Delta l, \Rightarrow a = \frac{F}{m} = \frac{u^2}{2\Delta l},$$

откуда, например, при $F = 8300$ Н, $u = 5$ м/с и $a_{max} = 10g$ получим $\Delta l \approx 0.1$ м.

3.3. Пределы регулирования скорости за счет байпасного отверстия в снаряде

Одним из способов управления движением снаряда является уменьшение разности давлений на его торцах за счет открытия канала (в технической литературе его называют байпас), соединяющего его торцы. Задача состоит не в выравнивании давления в трубопроводе по обе стороны от снаряда, поскольку характерное время такого процесса много больше τ , а в организации нестационарного течения через байпас.

Внутреннее сопротивление байпаса Δp_b должно быть много меньше перепада давления на торцах снаряда Δp_a . В первом приближении можно считать, что после открытия байпаса давление газа

будет действовать только на кольцевую поверхность торцов $\pi(R^2 - R_b^2)$.

Результаты расчета для $k = 0.1$, представленные на рис. 6, показали, что при $R_b/R = 0.6$ скорость снаряда уже не превышает критического значения 10 м/с. Диагностическая информация не теряется.

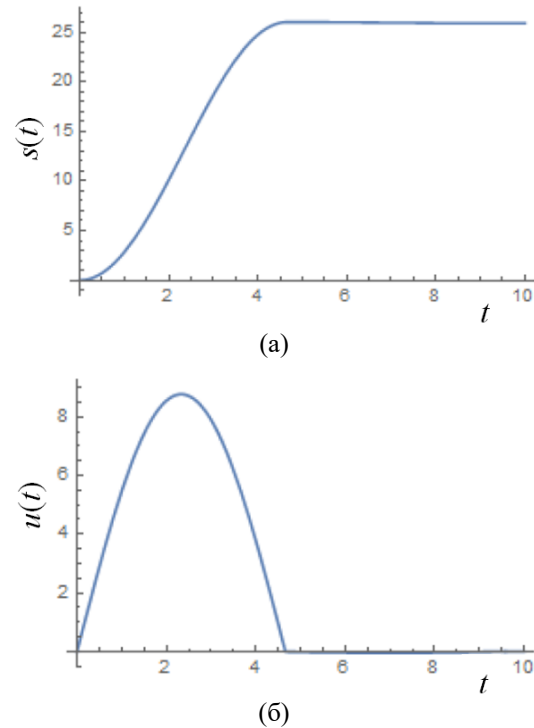


Рис. 6. Зависимость расстояния $s(t)$, пройденного снарядом (а), и его скорости $u(t)$ (б) от времени при $\alpha = 0.1$ и $R_b/R = 0.6$

Однако уже при $\alpha = 0.2$ для регуляризации движения потребуется байпас, для которого $R_b/R = 0.86$, что технически сложно реализовать. Поэтому, кроме регулируемого байпаса, необходима система торможения снаряда о стенки трубопровода с характерным временем срабатывания порядка 1 с.

3.4. Движение снаряда внутри шероховатой трубы

Если внутренняя поверхность трубопровода не содержит стопоров, способных остановить снаряд, но существенно шероховатая и коэффициент трения является функцией перемещения снаряда $k(s)$, то снаряд будет двигаться с переменной скоростью. Оценим, может ли шероховатость привести к потере диагностической информации.

Пусть коэффициент трения является периодической функцией перемещения:

$$k = k_0 \left(1 + \varepsilon \sin \left(\frac{2\pi s(t)}{\lambda} \right) \right),$$

где λ – среднее расстояние между шероховатостями поверхности, например, сварными швами. Сила, создаваемая разностью давлений на торцах снаряда и приводящая снаряд в движение, равна средней силе трения:

$$F_0 = \langle k(s)mg \rangle = k_0 mg.$$

Уравнение движения снаряда принимает вид:

$$\frac{d^2 s(t)}{dt^2} = k_0 g - k_0 g \left(1 + \varepsilon \sin \left(\frac{2\pi s(t)}{\lambda} \right) \right) \times \operatorname{sgn} \left(\frac{ds(t)}{dt} \right). \quad (3.6)$$

Результаты решения уравнения (3.6) при $s(0) = 0$, $s'(0) = u_0$, $\lambda = 10$ м, $\varepsilon = 1$ представлены на рис. 7. Видно, что скорость изменяется примерно на 50% при $u_0 = 5$ м/с и на $\sim 10\%$ при $u_0 = 10$ м/с. Чем выше средняя скорость движения снаряда, тем меньше она изменяется при движении в трубопроводе с шероховатыми стенками.

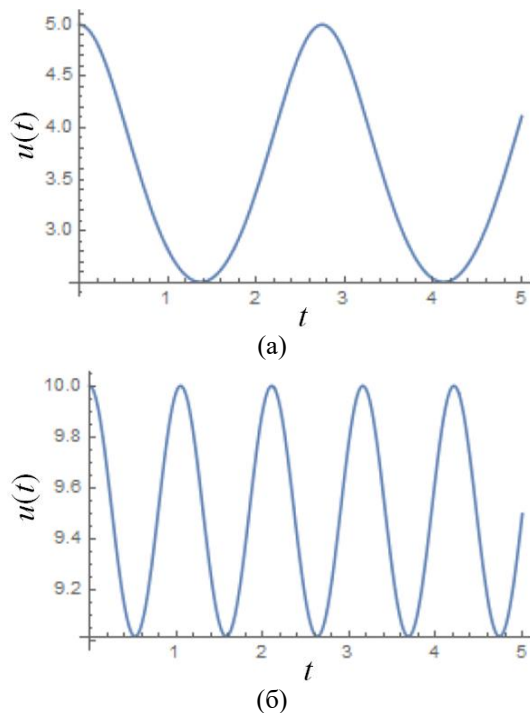


Рис. 7. Зависимость средней скорости движения снаряда от времени при движении в шероховатой трубе для $u_0 = 5$ м/с (а) и $u_0 = 10$ м/с (б)

Поэтому дефектоскопию трубопроводов с повышенной шероховатостью стенок лучше проводить на максимально возможных скоростях движения инспекционного снаряда. Другая возможность состоит во включении внутреннего вибратора при прохождении участков с повышенной шероховатостью, для управления реологией отложений на стенках трубопровода и уменьшения трения [8].

Было также обнаружено, что при уменьшении выбираемой для сканирования начальной скорости движения существует такое ее критическое значение (для заданного выше набора параметров $u_0^* = 4.329$ м/с, рис. 8), при котором скорость снаряда изменяется в максимальном диапазоне от 0 до u_0^* . При начальной скорости менее u_0^* снаряд, попадая на шероховатый участок трубопровода, остановится.

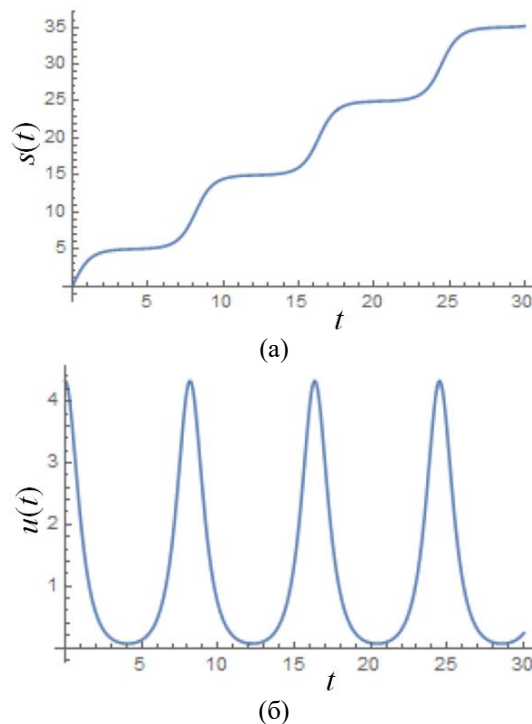


Рис. 8. Зависимость пройденного расстояния (а) и скорости движения снаряда (б) от времени при движении в шероховатой трубе с начальной скоростью сканирования $u_0^* = 4.329$ м/с

4. Заключение

4.1. Основные результаты

Осреднением по поперечному сечению трубопровода получена система уравнений, описывающих квазиодномерное течение газа. Показано, что деформация стенок трубопроводов низкого давления для перекачки попутного нефтяного газа не оказывает существенного влияния на течение газа.

Сделаны оценки, показавшие, что в типичных условиях перекачки попутного газа (давлением до 10 атм) можно пренебречь его сжимаемостью. Так же показано, что перепад давления газа на концах газопровода много меньше среднего значения.

При отсутствии стопоров инспекционный снаряд движется с постоянной скоростью, которая определяется подачей газа (оптимальная скорость порядка 1–10 м/с). При наличии стопоров снаряд может остановиться и двигаться ускоренно после срыва со стопора.

При ускоренном движении, а также при движении со скоростью более 10 м/с точность диагностической информации недостаточна. Поэтому были сделаны оценки движения снаряда после срыва со стопоров различной прочности.

Показано, что для снаряда массой 600 кг в трубопроводе с внешним диаметром 0.325 м (типичный трубопровод для транспортировки попутного газа) стопоры прочностью до 6000–6500 Н не снижают точность диагностической информации. При большей прочности стопоров снаряд необходимо оснащать системой стабилизации движения.

4.2. Концепция конструкции инспекционного снаряда

Инспекционный снаряд состоит из шарнирно соединенных секций: управления движением, измерительных приборов и аккумуляторной секции.

Управление движением необходимо для регулировки скорости в процессе преодоления стопоров. В качестве основного способа управления скоростью предлагается использовать байпас, управление сечением которого позволяет стабилизировать скорость снаряда, если прочность стопоров не превышает критического значения F^* ($F^* < 16000 - 1700$ Н для типичного снаряда массой 600 кг). При прочности стопоров более F^* дополнительно потребуется система торможения снаряда о стенки трубопровода. Сделанные оценки показали, что время срабатывания системы стабилизации скорости должно быть не более 1 с.

Для срыва снаряда со стопоров необходимо обеспечить их плотное прилегание к стенкам трубопровода в момент останова снаряда, чтобы через них не было утечки газа. В противном случае снаряд застревает на стопоре и для его извлечения придется вскрывать стенку газопровода.

В случае, когда внутренняя поверхность трубопровода шероховатая, сделанные оценки показали, что изменения скорости из-за неоднородности коэффициента трения будут тем меньше, чем выше скорость снаряда. Поэтому такие участки следует сканировать на максимально возможной скорости.

Также было показано, что при уменьшении выбираемой для сканирования средней скорости снаряда существует такое ее критическое значение, что при попадании снаряда на шероховатый участок снаряд остановится.

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

Список литературы

1. Синева А. И., Ходаринов А. Т., Морозов А. К. Внутритрубный инспекционный снаряд с

управляемой скоростью движения // Патент РФ №2293612. 2007. Бюл. №5.

2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
6. Гиматудинов Ш. К., Ширковский А. И. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1982. 235 с.
7. Попов Д. Н., Панайотти С. С., Рябинин М. В. Гидромеханика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 384 с.
8. Блехман И. И. Вибрационная механика и вибрационная реология. Теория и практика. М.: Физматлит, 2018. 752 с.

References

1. Sineva A. I., Khodarinov A. T., Morozov A. K. *In-line inspection projectile with controlled speed of movement*. Patent of the Russian Federation No. 2293612. 2007.
2. Sinjeva A. I., Sapunkov Ya. G., Ramzaev A. I., Bratchikov D. Yu. *In-line inspection projectile with controlled speed*. Patent of the Russian Federation No. 2318158, 2008.
3. Natarov B. N., Endel I. A., Gorbunova S. V., etc. *The device of in-line control and the method of moving it in the main gas pipeline with a given uniform speed*. Patent of the Russian Federation No. 2451867, 2011.
4. Kozyrev B. V., Kozyrev N. B. *The device of in-line control and the method of moving it in the gas pipeline with a given uniform speed*. Patent of the Russian Federation No. 2392533, 2010.
5. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Theory of elasticity*. Moscow: Nauka, 1987. 248 p.
6. Himatudinov Sh. K., Shirkovsky A. I. *Oil and gas reservoir physics*. Moscow: Nedra, 1982. 235 p.
7. Popov D. N., Panaiotti S. S., Ryabinin M. V. *Fluid mechanics*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2002. 384 p.
8. Blechman I. I. *Vibrational mechanics and vibrational rheology. Theory and practice*. Moscow: Fizmatlit, 2018. 752 p. (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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

Please cite this article in English as:

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

Сведения об авторах

1. *Роман Радифович Мугинов*, начальник отдела, ООО «ПСО «НефтеГазДиагностика», Колодезный переулок, д. 3, стр. 25, оф.25, Москва, 107076.
2. *Сергей Николаевич Пещеренко*, д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т., 29, Пермь, 614990.
3. *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. *Roman R. Muginov*, Head of department, LLC “PSO “NefteGasDiagnostica”, Kolodezny pereulok, 3-25, off. 25, 107076, Moscow, Russia
2. *Sergey N. Peshcherenko*, Doctor of the Physical and Mathematical Sciences, Professor at General physics department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky prospekt, 29, 614990, Perm, Russia
3. *Anatoly V. Perminov*, Doctor of the Physical and Mathematical Sciences, Head of General physics department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky prospekt, 29, 614990, Perm, Russia