

УДК 621.643:51.74:004.94

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГИБА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ

Мамонова Татьяна Егоровна¹,

stepte@tpu.ru

Сидорова Анастасия Александровна¹,

sidorova@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения ресурса работы датчиков давления при эксплуатации технологических (нефте-, газо-) трубопроводов. В настоящее время все предприятия транспортировки нефтепродуктов при разработке технологических процессов применяют различные виды средств измерения параметров продукта и трубопровода, что позволяет в полной мере создавать автоматизированное производство. При проектировании таких производств большое внимание уделяется выбору датчиков с целью получения достоверных по точностным характеристикам данных и продления их срока службы, связанного с надежной эксплуатацией конструкций и агрегатов трубы, на которой они установлены. При этом необходимо учитывать влияние параметров трубы и перекачиваемой жидкости на динамику чувствительного элемента датчика, так как это позволит обеспечить не только необходимую точность, но и повысит надежность конструкции «датчик давления – трубопровод» и, как следствие, надежность системы в целом. Поломка оборудования или неверная диагностика может привести к остановке процесса перекачивания нефтепродуктов и, как следствие, к более серьезным экономическим и экологическим проблемам. Таким образом, задача исследования адекватной математической модели, связывающей динамику чувствительного элемента датчика давления и параметры нефтепровода, в настоящее время является актуальной.

Цель исследования: определить влияние параметров нефтепровода, перекачиваемой жидкости, а также давления в трубе на прогиб чувствительного элемента датчика давления, расположенного на боковой стенке трубы.

Объект: математическая модель взаимодействия трубопровода перекачки жидкости и датчика давления при его расположении на боковой стенке трубы.

Методы: имитационное моделирование, анализ и оценка влияния параметров трубопровода и перекачиваемой жидкости на прогиб чувствительного элемента датчика.

Результаты. Исследование влияния параметров транспортируемой жидкости и датчика давления на изменение прогиба чувствительного элемента рассматриваемого прибора показало, что при выборе датчиков давления необходимо учитывать такие параметры датчика, как коэффициент Пуассона и толщина чувствительного элемента. Также установлено, что наибольшее влияние на прогиб чувствительного элемента датчика оказывает плотность перекачиваемой жидкости. С использованием имитационного приложения Simulink программы MatLab был исследован наиболее распространенный датчик давления DMD 331-A-S-AX. Установлено, что при повышении измеряемого давления в трубе амплитуда колебания чувствительного элемента составляет 3,5 мм и время колебания 180 секунд при максимально допустимом давлении 9,8 МПа. При увеличении давления процесс становится расходящимся, что сигнализирует о порыве мембраны.

Ключевые слова:

Математическая модель, датчик давления, трубопровод, параметры трубопровода, имитационное моделирование, чувствительный элемент датчика.

Введение

Давление, наряду с такими параметрами как температура перекачиваемой жидкости, её расход и скорость, является крайне важным параметром систем контроля и управления нефтепроводами. В состав датчика давления входят такие элементы, как устройства вывода информационного сигнала, схема вторичной обработки сигнала, корпусные детали, первичный преобразователь давления, в состав которого входит чувствительный элемент, являющийся приёмником давления в трубе. Изменение прогиба чувствительного элемента может привести к поломке устройства измерения давления, что приведёт к неправильной работе системы управления процессом перекачки. Моделирование системы «датчик давления – трубопровод» позволит на уровне проектирования определить диапазон изменения прогиба чувствительного элемента датчика при различных внешних параметрах.

Получением математической модели, позволяющей исследовать характер течения жидкости в трубе и влияние данного характера на датчики, ранее занимались авторы работ [1, 2]. В данных источниках рассмотрены задачи динамики упругого элемента конструкции, которая представляет собой динамическую модель механической системы «трубопровод – датчик давления», а также математические модели механической системы «трубопровод – датчик давления». Здесь получены уравнения, связывающие изменение давления на одном из контуров трубопровода с деформацией упругого элемента датчика. В [3] были предложены математические модели механической системы «трубопровод – датчик давления», в которых для описания давления рабочей среды в трубопроводе применяется линейная теория, а для исследования динамики упругого элемента датчика – линейная и нелинейные теории. Было дано решение аэроги-

дродинамической части задачи, основанное на методах теории функций комплексного переменного. Было получено уравнение, связывающее между собой давление рабочей среды на входе в трубопровод (на выходе из камеры сгорания двигателя) и деформацию упругого элемента датчика, расположенного на другом конце трубопровода. Исследования динамики и динамической устойчивости упругих или вязкоупругих элементов датчиков давления, являющихся составной частью конструкции, представляющей собой модель механической системы «трубопровод – датчик давления», были представлены в [4]. Исследования проводились для различных способов расположения датчика давления на стенке плоского или осесимметричного трубопровода конечной или бесконечной длины, с учетом взаимодействия элементов с рабочей средой (жидкостью или газом) и теплового воздействия на них. В статьях [5, 6] приведено математическое описание устройства измерения давления при его использовании в алгоритмах определения утечек из трубопроводов.

Что касается зарубежных изданий, то различные вопросы математического и имитационного моделирования систем «датчик давления – трубопровод» отражены в работах [7–16]. В основном представленные модели используются для их дальнейшего применения в сложных системах диагностики нефтепроводов и в системах определения утечек.

Однако в источниках, представленных в списке литературы, проводится исследование полученной математической модели для определения влияния параметров трубопровода, жидкости и самого устройства измерения на износостойкость датчика. Это применимо в вопросах подбора датчиков давления на стадии проектирования трубопровода и систем его диагностики, в том числе систем определения прорывов нефтепродуктопроводов.

Моделирование системы «датчик давления – трубопровод»

В работе [17] была получена формула, отображающая зависимость прогиба чувствительного элемента от параметров трубопровода, перекачиваемой жидкости и свойств датчика для случая, когда устройство измерения расположено на боковой стенке трубопровода (рис. 1). Данная формула имеет следующий вид:

$$\left(\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} - \frac{x_0\rho}{\pi} + \rho_m h \right) \ddot{\omega} + \beta\dot{\omega} + \frac{Eh}{1-\mu^2} \omega = P_0(y) \cos\left(\frac{\pi}{y_0}\right) - \frac{1+y_0}{y_0} P_0(y), \quad (1)$$

где ω – прогиб чувствительного элемента датчика, м; P_0 – распределенная внешняя нагрузка, действующая на упругий элемент, Па; y_0 – внутренний диаметр трубопровода, м; x_0 – длина трубопровода, м; ρ_m – плотность мембраны, кг/м³; E – модуль Юнга, Па; h – толщина мембраны, м, μ – коэффициент

Пуассона (отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению); β – коэффициент демпфирования.

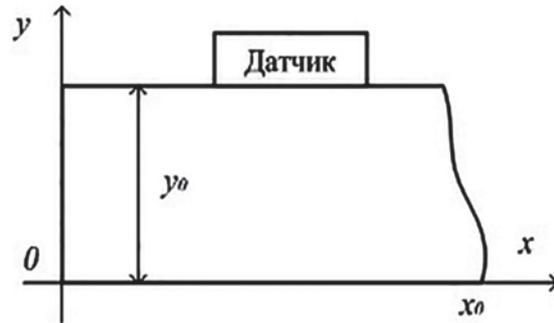


Рис. 1. Схема размещения датчика на трубопроводе

Fig. 1. Scheme of placing a sensor on the pipeline

В формуле (1) отображена связь изменения давления рабочей среды в трубопроводе перекачки нефтепродуктов и прогиб упругого элемента датчика давления. В работе [18] автором проведено исследование математических моделей при расположении устройства на торцевой стороне трубы. При этом модель проверена на адекватность и проведён факторный эксперимент.

Известно, что изготовители датчиков давления в зависимости от контактируемой среды конструируют датчики с различными параметрами. В табл. 1 приведены наиболее распространённые параметры трубопровода и перекачиваемой жидкости, взятые из [19–22]. При определении значений параметров полученной зависимости необходимо учитывать следующее: коэффициент Пуассона зависит не от размеров тела, а от природы материала; плотность нефти зависит от температуры, поддерживаемой в трубопроводе, и от свойств добытого ископаемого на определённом месторождении.

Для проведения исследований в приложении для имитационного моделирования Simulink программной среды MatLab была построена модель, обобщённая схема которой приведена на рис. 2.



Рис. 2. Обобщённая схема моделирования системы «датчик давления – трубопровод»

Fig. 2. Generalized scheme of modeling the «pressure sensor – pipeline» system

При проведении имитационного моделирования выбраны наиболее распространённые параметры датчика и перекачиваемой жидкости, используемые в нефтегазопромышленности, приведённые в табл. 2. При этом сделано предположение, что материалом чувствительного элемента датчика (мембраны) служит нержавеющая сталь 316L. Толщина мембраны взята как среднее значение по всей её длине.

Таблица 1. Параметры нефтепроводов и перекачиваемой по ним жидкости

Table 1. Parameters of oil pipelines and liquid pumped over them

Название параметра Parameter	Диапазон изменения параметра Range of parameter change	
Толщина чувствительного элемента h , мм Thickness of a sensitive element h , mm	(0,2...1,6)	
Плотность мембраны датчика ρ_m , кг/м ³ Sensor membrane density ρ_m , kg/m ³	пьезокерамические элементы piezoceramics elements	(7400...7800)
	элементы из нержавеющей стали stainless steel elements	(7700...8100)
	элементы из монокристаллического кремния single-crystal silicon elements	(2330...3050)
Модуль упругости элементов датчика (модуль Юнга) E , ГПа Module of elasticity of sensor elements (Jung's module) E , GPa	пьезокерамические элементы piezoceramics elements	(78...190)
	элементы из нержавеющей стали stainless steel elements	(193...200)
	элементы из монокристаллического кремния single-crystal silicon elements	(109...131)
Коэффициент Пуассона μ Poisson's constant μ	пьезокерамические элементы piezoceramics elements	(0,29...0,35)
	элементы из нержавеющей стали stainless steel elements	(0,27...0,30)
	элементы из монокристаллического кремния single-crystal silicon elements	0,266
Плотность нефти ρ , кг/м ³ Oil density ρ , kg/m ³	(730...1040)	

Таблица 2. Параметры чувствительного элемента датчика давления, трубопровода и перекачиваемой жидкости

Table 2. Parameters of a sensitive element of a pressure sensor, pipeline and pumped-over liquid

Название параметра Parameter	Значение параметра Parameter value
Коэффициент Пуассона μ Poisson's constant μ	0,27
Модуль Юнга E , ГПа Jung's module E , GPa	200
Плотность мембраны ρ_m , кг/м ³ Membrane density ρ_m , kg/m ³	8000
Длина трубы x_0 Pipeline length x_0	100
Толщина мембраны h , м Membrane thickness h , m	0,0012
Коэффициент демпфирования β Damping ratio β	0,3
Диаметр трубопровода y_0 , м Pipeline diameter y_0 , m	0,5
Плотность нефти ρ , кг/м ³ Oil density ρ , kg/m ³	800

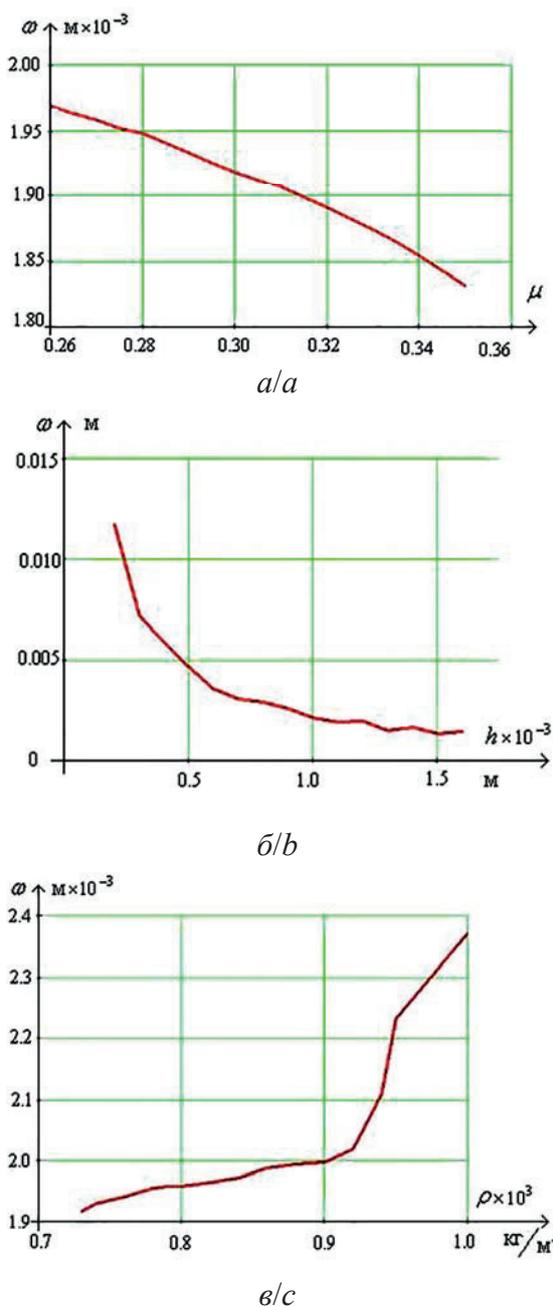


Рис. 3. График зависимости прогиба чувствительного элемента ω от: а) коэффициента Пуассона μ ; б) толщины чувствительного элемента h ; в) плотности перекачиваемой жидкости ρ

Fig. 3. Dependence schedule of sensitive element deflection ω on: a) Poisson's constant μ ; b) thickness of a sensitive element h ; c) density of the pumped-over liquid ρ

В соответствии с [23] выбрано рабочее давление 2 МПа. Исследование прогиба чувствительного элемента датчика давления проводилось для наиболее изменяемых параметров: коэффициент Пуассона μ , толщина чувствительного элемента h и плотность нефти ρ . Диапазон значений параметров мембраны равен диапазону возможных значений для материала чувствительного элемента.

Плотность нефти изменяется в зависимости от месторождений мира [21]. Графические зависимости прогиба чувствительного элемента от указанных параметров были получены с использованием приложения Simulink программы MatLab и приведены на рис. 3.

При моделировании в качестве неизменяемых параметров выбраны: для графика (а) – толщины чувствительного элемента h и плотность перекачиваемой жидкости ρ ; для графика (б) – коэффициента Пуассона μ и плотности перекачиваемой жидкости ρ ; для графика (в) – коэффициента Пуассона μ и толщины чувствительного элемента h .

С увеличением коэффициента Пуассона μ , характеризующего упругие свойства материала диафрагмы датчика, происходит уменьшение прогиба чувствительного элемента. При этом коэффициент μ изменяется в диапазоне значений для нержавеющей стали. Функция зависимости прогиба упругого элемента датчика от толщины чувствительного элемента h имеет гиперболический характер: с увеличением данной величины отклонение мембраны понижается. Еще один из исследуемых параметров – плотность нефти ρ . С ростом данного параметра происходит увеличение прогиба чувствительного элемента, но характер данной зависимости для исследуемых моделей различен.

Таким образом, в соответствии с проведенным имитационным методом оценки адекватности можно сделать вывод, что модель является адекватной, так как прогиб упругого элемента выбранного датчика давления лежит в диапазоне 1–10 мм [24].

Исследуем влияние давления в нефтепроводе на прогиб чувствительного элемента датчика. Был выбран датчик давления DMD 331-A-S-AX, в котором в качестве чувствительного элемента применяется ёмкостной элемент, данные которого приведены в табл. 1. Дополнительные параметры для проведения моделирования взяты из [24, 25] и приведены в табл. 3.

Таблица 3. Дополнительные параметры для моделирования

Table 3. Additional parameters for modeling

Название параметра Parameter	Значение Value
Верхний предел измерения давления датчика Top limit of measuring sensor pressure	40 Мпа/MPa
Материал трубопровода Pipeline material	сталь 14ГБ-Ш 14GB-Sh steel
Класс прочности Strength class	50–60
Назначение трубопровода Pipeline function	строительства газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктов в северном и обычном исполнении construction of gas pipelines, oil pipelines and oil products in northern and usual execution
Рабочее давление Working pressure	5,4–9,8 МПа/MPa

Моделирование проведено для различных значений давления в трубопроводе из диапазона 5,4–9,8 МПа. Остальные параметры, входящие в модель, неизменны и представлены в табл. 2. На рис. 4 приведён график, отображающий прогиб чувствительного элемента при нарастающем изменении давления в трубе.

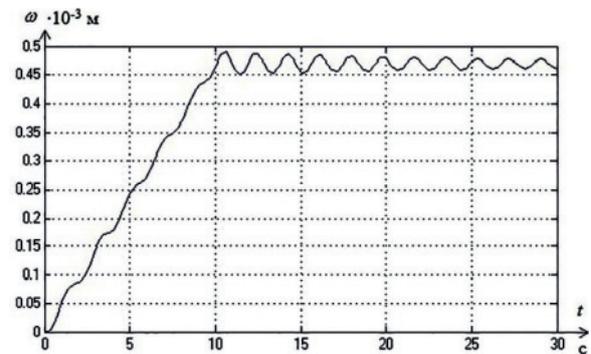


Рис. 4. Прогиб чувствительного элемента в зависимости от давления 5,4 МПа

Fig. 4. Deflection of a sensitive element depending on pressure of 5,4 MPa

Из указанного графика можно заключить, что изменение отклонения мембраны имеет нарастающий характер с дальнейшим колебанием в пределах допустимых значений. Время затухания составляет 10 с, конечное значение отклонения мембраны равно $0,47 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 5 приведен график, отображающий изменение амплитуды колебания чувствительного элемента датчика и время его затухания в зависимости от измеряемого давления.

Результаты проведенного имитационного моделирования зависимостей, отображающих изменение прогиба чувствительного элемента датчика давления от параметров трубы и перекачиваемой жидкости, показали, что с увеличением давления в трубопроводе возрастает отклонение чувствительного элемента датчика давления и увеличивается время переходного процесса в нём. При дальнейшем повышении давления в нефтепродуктопроводе прогиб чувствительного элемента выходит из допустимого диапазона 1–10 мм [23], что физически означает прорыв мембраны датчика давления.

Заключение

На прогиб чувствительного элемента датчика давления при его расположении на боковой стороне трубы оказывают влияние такие параметры, как плотность жидкости, коэффициент Пуассона, характеризующий материал изготовления мембраны датчика, и толщина чувствительного элемента датчика. Однако по представленным графикам выявлено, что наибольшее влияние на величину прогиба чувствительного элемента производит плотность жидкости, транспортируемой в трубопроводе.

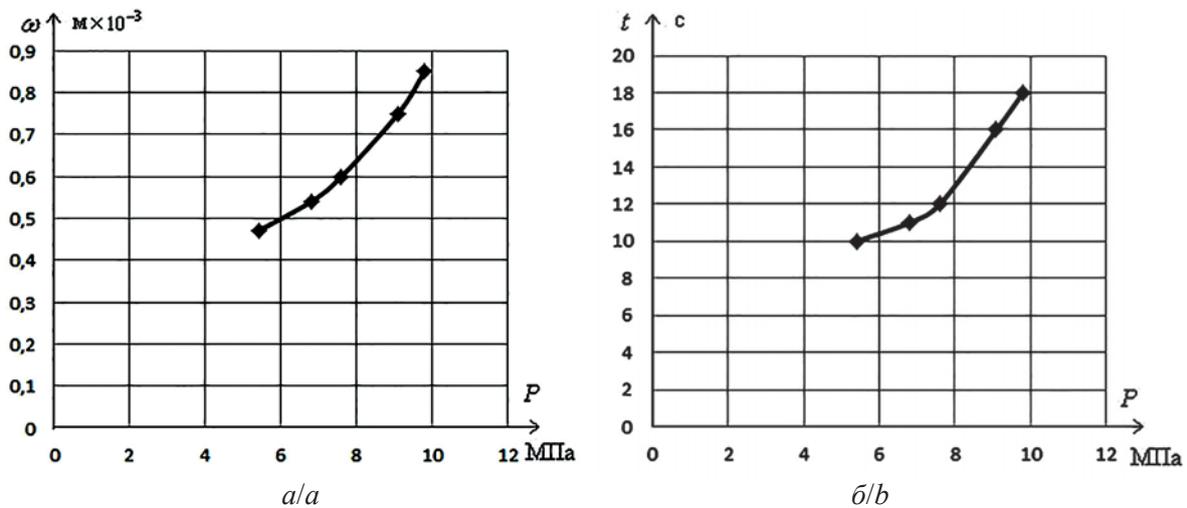


Рис. 5. Графики зависимостей от распределенной внешней нагрузки, действующей на упругий элемент: а) амплитуды колебания $\omega(P)$; б) времени затухания $t(P)$

Fig. 5. Schedules of dependences on distributed external loading effecting an elastic element of: a) fluctuation amplitude $\omega(P)$; b) attenuation time $t(P)$

Проведенное исследование выявило, что при проектировании нефтепродуктопровода и подбора измерительной аппаратуры необходимо учитывать не только параметры датчиков, но и диапазон изменения плотности перекачиваемой по трубопроводу жидкости.

Полученная математическая зависимость и основанная на ней имитационная модель позволит оперативно подбирать датчик давления для проектируемого нефтепродуктопровода.

Полученные результаты исследования позволят на практике получить изменение прогиба чувствительного элемента датчика давления в зависимости от давления в трубе и изменения качества перекачиваемой жидкости (её плотности, температуры и химического состава), что позволит вовремя устранить технические неполадки датчика и сбоя работы системы мониторинга трубопровода.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16–38–00010 мол.а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вельмисов П.А. Математическое моделирование динамической системы «трубопровод – датчик давления» // Естественные науки: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – С. 22–24.
2. Покладова Ю.В. Динамика упругого элемента датчика давления рабочей среды в трубопроводе // Механика и процессы управления: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2007. – С. 51–56.
3. Вельмисов П.А. О некоторых математических моделях механической системы «трубопровод – датчик давления» // Естественные науки: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – С. 39–44.
4. Анкилов А.В. Математическое моделирование механической системы «трубопровод – датчик давления». – Ульяновск: УЛГТУ, 2008. – 188 с.
5. Мамонова Т.Е. Обнаружение утечек из нефтепровода с использованием устройства для измерения изменений давления // Наука Красноярья. – 2012. – № 5. – С. 102–111.
6. Мамонова Т.Е. Метод определения утечки из нефтепровода, основанный на разности во времени давления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 216–219.
7. Taler D., Kaczmarski K. Mathematical Modelling of the Transient Response of Pipeline // Journal of Thermal Science. – 2016. – V. 25 – № 6. – P. 549–557.
8. Prokofiev A., Makariyants G., Shakhmatov E. Modeling of pipeline vibration under the pressure pipes in the working fluid / 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV17). – Cairo, Egypt, 18–22 July, 2010. – P. 1–8.
9. Kovar J., Brezina T. Model of pipeline with pump for predictive control // Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium. – Vienna, Austria, 2010. – V. 21. – № 1. – P. 1–2.
10. A Model of Pipeline Flow Monitoring in Wide Area Wireless Sensor Network / Umunna Chike Odogwu, O.A. Ezechukwu, Aneke Jude, Okolo Chidiebere // Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET). – 2015. – V. 3 (4C). – P. 463–472.
11. Bimpas M., Amditis A., Uzunoglu N. Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz // Journal of Applied Geophysics. – 2010. – V. 70 (3). – P. 226–236.
12. Mathematical Model for Pipeline Control Applying in-Line Robotic Device / Yu.L. Kolesnikov, A.S. Pitsyna, O.V. Baranova, D.A. Gurin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – V. 9 (11). – P. 2–11.
13. Mamonova T.E. Using the hydrodynamic models in problems of leaks definition from oil pipelines // Oil Industry. – 2015 – № 4. – P. 92–95.
14. Vel'misov P.A., Pokladova Yu.V. Investigation of dynamics of an elastic element of a pressure sensor // Applications of Mathematics in Engineering and Economics. – Sofia, Bulgaria, 2006. – P. 51–57.
15. Butler S.J., Eney S.L. Numerical Reservoir-Wellbore-Pipeline Simulation Model of the Geysers Geothermal Field // Proc. World Geothermal Congress. – Bali, Indonesia, 25–29 April, 2010. – P. 1–5.

16. Simulation of different mems pressure sensors / V. Shettar, Sh.B. Kotin, B.B. Kirankumar, B.G. Sheeparamatti // International J. of Multidiscipl. Research & Advcs. in Engg. (IJMRAE). – 2014. – V. 6. – № 11. – P. 73–81.
17. Мамонова Т.Е. Математическая модель системы «датчик–трубопровод» при расположении датчика на боковой стенке трубы // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2017. – С. 293–294.
18. Мамонова Т.Е. Исследование прогиба чувствительного элемента датчика давления при его расположении на торцевой стенке трубы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 09 (63). – С. 44–49.
19. Пьезоэлектрические свойства пьезокерамики // Symmetron. URL: <http://symmetron.ru/suppliers/apc/> (дата обращения: 10.10.2017).
20. Плотность нержавеющей стали. URL: <http://m-k-k.ru/plotnost-nerzhavayushey-stali> (дата обращения: 09.10.2017).
21. Плотность нефти // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B8 (дата обращения: 08.10.2017).
22. Тиняков Ю.Н., Милешин С.А., Андреев К.А. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления // Наука и образование. – 2011. – С. 1–13. URL: <http://engineering-science.ru/doc/219081.html> (дата обращения: 08.10.2017).
23. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы // Строительные нормы и правила. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/1/1989/> (дата обращения: 13.10.2017).
24. Высокоточный интеллектуальный датчик давления DMD 331-A-S-GX/AX // Пром Автоматика. URL: <http://shop.pa.ru/Sensors/Pressure/DMD%20331-A-S-GX-AX> (дата обращения: 08.10.2017).
25. Трубы для магистральных газо- и нефтепроводов // Комплексное нефтегазовое снабжение. URL: <http://kngc.ru/trubnaya-produkciya/truby-dlya-magistralnyx-gazo-i-nefteprovodov.html> (дата обращения: 08.10.2017).

Поступила 19.10.2017 г.

Информация об авторах

Мамонова Т.Е., кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сидорова А.А., ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.643:51.74:004.94

DEPENDENCE OF A SENSITIVE ELEMENT DEFLECTION IN A PRESSURE MEASUREMENT SENSOR IN A PIPELINE

Tatiana E. Mamonova¹,
stepte@tpu.ru

Anastasiya A. Sidorova¹,
sidorova@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to increase a resource of operational life of pressure sensors at oil pipeline operation. Now all enterprises of oil products transportation apply different types of sensors and gages when developing technological processes that gives the chance to initiate fully automated production. When developing such productions much attention is paid to the choice of sensors for obtaining reliable and exact data and extension of their service life that is directly related to reliability of designs and units of a pipe. At the same time, it is necessary to consider influence of pipe parameters and the pumped-over liquid on dynamics of a sensitive element of a sensor as it will allow providing not only necessary accuracy, but it will also increase reliability of a system «pressure sensor – pipeline» and as a result reliability of the system as the whole. Breakage of the equipment or incorrect diagnostics can lead not only to a stop of oil products pumping, but also to the breakage of the system as the whole that corresponds to serious economic and environmental problems. Thus, the task of studying the adequate mathematical model connecting dynamics of a sensitive element of the pressure sensor and pressure in the pipeline is relevant now.

The main aim is to define the influence of oil pipeline parameters, pumped-over liquid, and pressure in a pipe on a sensitive element deflection in a pressure sensor located on a pipe sidewall.

Object: mathematical model of interaction of liquid pumping pipeline and pressure sensor at its location on a pipe sidewall.

Methods: simulation, analysis and assessment of influence of a pipeline and pumped-over liquid parameters on sensor sensitive element deflection.

Results. Study of the influence of transported liquid and pressure sensor parameters on the change of sensitive element deflection of the considered device has shown that it is necessary to consider such parameters of the sensor as Poisson's coefficient and sensitive element thickness when selecting pressure sensors. It was determined as well that the density of the pumped-over liquid effects most of all the sensor sensitive element deflection. Using the Simulink application of the MatLab program the authors studied the most widespread pressure sensor of DMD 331-A-S-AX. It was defined that the amplitude of the oscillations sensitive element is 3,5 mm and oscillations time is 180 seconds in case of the most allowable pressure of 9,8 MPa at high measured pressure in a pipe. At increase in pressure the process becomes dispersing that signals a membrane rush.

Key words:

Mathematical model, pressure sensor, oil pipeline, pipeline parameters, imitating modeling, sensitive element of a sensor.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 16–38–00010.

REFERENCES

1. Velmisov P.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoy sistemi «truboprovod – datchik davleniya» [Mathematical modeling of the dynamic system « pipeline – pressure sensor»]. *Estestvennye nauki: Sbornik nauchnykh trudov* [Natural sciences: Collection of scientific works]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2010, pp. 22–24.
2. Pokladova Yu.V. Dinamika uprugogo elementa datchika davleniya rabochey sredi v truboprovode [Dynamics of an elastic element of a pressure sensor of a working medium in a pipeline]. *Mekhanika i protsessy upravleniya: Sbornik nauchnykh trudov* [Mechanics and management processes: collection of scientific works]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2007, pp. 51–56.
3. Velmisov P.A. O nekotorykh matematicheskikh modelyakh mekhanicheskoy sistemy «truboprovod – datchik davleniya» [Some mathematical models of mechanical system «pipeline – pressure sensor»]. *Estestvennye nauki: Sbornik nauchnykh trudov* [Natural sciences: Collection of scientific works]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2010, pp. 39–44.
4. Ankilov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskoy sistemy «truboprovod – datchik davleniya»* [Mathematical modeling of the mechanical system «pipeline – pressure sensor»]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2008. 188 p.
5. Mamonova T.E. Detection of leaks from the oil pipeline using a device to measure pressure changes. *Nauka Krasnoyariya*, 2012, no. 5, pp. 102–111. In Rus.
6. Mamonova T.E. The method for defining leaks from an oil pipeline based on a difference in pressure time. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 216–219. In Rus.
7. Taler D., Kaczmarzski K. Mathematical Modelling of the Transient Response of Pipeline. *Journal of Thermal Science*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 549–557.
8. Prokofiev A., Makariyants G., Shakhmatov E. Modeling of pipeline vibration under the pressure pipes in the working fluid. *17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV17)*. Cairo, Egypt, 18–22 July, 2010, pp. 1–8.
9. Kovar J., Brezina T. Model of pipeline with pump for predictive control. *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*. Vienna, Austria, 2010, vol. 21, no. 1, pp. 1–2.
10. Umunna Chike Odogwu, Ezechukwu O.A., Aneke Jude, Okolo Chidiebere. A Model of Pipeline Flow Monitoring in Wide Area Wireless Sensor Network. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, 2015, vol. 3 (4C), pp. 463–472.
11. Bimpas M., Amditis A., Uzunoglu N. Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, vol. 70 (3), pp. 226–236.

12. Kolesnikov Yu.L., Ptitsyna A.S., Baranova O.V., Gurin D.A. Mathematical Model for Pipeline Control Applying in-Line Robotic Device. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9 (11), pp. 2–11.
13. Mamonova T.E. Using the hydrodynamic models in problems of leaks definition from oil pipelines. *Oil Industry*, 2015, no. 4, pp. 92–95.
14. Velmisov P.A., Pokladova Yu.V. Investigation of dynamics of an elastic element of a pressure sensor. *Applications of Mathematics in Engineering and Economics*. Sofia, Bulgaria, 2006. pp. 51–57.
15. Butler S.J., Eneby S.L. Numerical Reservoir-Wellbore-Pipeline Simulation Model of The Geysers Geothermal Field. *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 25–29 April, 2010. pp. 1–5.
16. Shettar V., Kotin Sh.B., Kirankumar B.B., Sheeparamatti B.G. Simulation of different mems pressure sensors. *International J. of Multidiscipl. Research & Advcs. in Engg. (IJMRAE)*, 2014, vol. 6, no. 11, pp. 73–81.
17. Mamonova T.E. Matematicheskaya model sistemy «datchik – truboprovod» pri raspolozhenii datchika na bokovoy stenke truby [Mathematical model «sensor –pipeline» system when a sensor is on a pipe sidewall]. *Sbornik trudov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Molodezh i sovremennye informatsionnie tekhnologii* [International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists. Youth and modern information technologies]. Tomsk, 2017. pp. 293–294.
18. Mamonova T.E. Research of a sensitive element deflection in a pressure sensor arranged on a face wall of a pipe. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2017, no. 09 (63), pp. 44–49. In Rus.
19. Pyezoelektricheskie svoystva pyezokeramiki [Piezoelectric properties of a piezoceramics]. *Symmetron*. Available at: <http://symmetron.ru/suppliers/apc/> (accessed 10 October 2017).
20. Plotnost nerzhaveyushey stali [Density of stainless steel]. Available at: <http://m-k-k.ru/plotnost-nerzhaveyushey-stali> (accessed 9 October 2017).
21. Plotnost nefti [Oil density]. *Vikipediya*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B8 (accessed 8 October 2017).
22. Tinyakov Yu.N., Milesin S.A., Andreev K.A. Analysis of designs of pressure sensors foreign prototypes. *Nauka i obrazovaniye*, 2011, pp. 1–13. In Rus. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/219081.html> (accessed 8 October 2017).
23. SNiP 2.05.06–85. Magistralnye truboprovody [Main pipelines]. *Stroitelnye normy i pravila* [Constructions norms and regulations]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data1/1/1989/> (accessed 13 October 2017).
24. Vysokotochny intellektualny datchik davleniya DMD 331-A-S-GX/AX [High-precision intelligent pressure sensor DMD 331-A-S-GX/AX]. *PromAvtomatika*. Available at: http://shop.pa.ru/Sensors/Pressure/DMD%20331-A-S-GX_AX (accessed 8 October 2017).
25. Truby dlya magistralnykh gazo- i nefteprovodov [Pipes for main gas- and oil pipelines]. *Kompleksnoe neftegazovoe snabzhenie* [Complex oil and gas supply]. Available at: <http://kngc.ru/trubnaya-produkciya/truby-dlya-magistralnyx-gazo-i-nefteprovodov.html> (accessed 8 October 2017).

Received: 19 October 2017.

Information about the authors

Tatiana E. Mamonova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasiya A. Sidorova, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.