

УДК 681.532.63
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5167
Шифр специальности ВАК: 2.3.1
Научная статья

Моделирование аппаратно-программного комплекса для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в трубопроводе

С. Жуань, Т.Е. Мамонова[✉], Л.И. Худоногова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]stepte@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Современные трубопроводные системы играют ключевую роль в транспортировке жидкостей и газов. Такие системы становятся всё более сложными, и для обеспечения их надежности возникают серьезные проблемы, связанные с контролем давления и предотвращением аварий. Это подчеркивает необходимость разработки эффективных методов мониторинга давления в трубопроводах и управления им. **Цель.** Разработка и моделирование аппаратно-программного средства для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в трубопроводе. **Методы.** Математическое моделирование, статистическая обработка данных. **Результаты и выводы.** Давление в трубопроводной системе изменяется в зависимости от состояния клапанов и времени их переключения, графический анализ данных подтверждает, что скорость изменения давления значительно возрастает при переключении клапанов, что может привести к резкому колебанию давления. В ходе моделирования были получены количественные характеристики этих изменений. Использование пороговых значений давления позволяет эффективно контролировать стабильность работы системы и предотвращать аварийные ситуации. Разработанное цифровое устройство для мониторинга давления может быть внедрено в различные отрасли, включая нефтегазовую и химическую промышленность, что значительно повысит надежность и безопасность трубопроводных систем. В дальнейшем необходимо исследовать возможности интеграции описанного устройства с интеллектуальными алгоритмами управления, способными не только учитывать текущее состояние, но и прогнозировать изменения давления под воздействием внешних факторов. Также следует учитывать влияние на динамику давления в трубопроводах таких параметров, как температура и плотность транспортируемых веществ.

Ключевые слова: цифровое устройство, скорость изменения давления, дифференциальный датчик давления, управляющие клапаны, трубопровод, математическое моделирование

Для цитирования: Жуань С., Мамонова Т.Е., Худоногова Л.И. Моделирование аппаратно-программного комплекса для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в трубопроводе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 142–151. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5167

UDC 681.532.63
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5167
Scientific paper

Modelling of hardware and software system for monitoring the rate of change in fluid or gas pressure in a pipeline

S.P. Ruan, T.E. Mamonova[✉], L.I. Khudonogova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]stepte@tpu.ru

Abstract. Relevance. Modern pipeline systems play a key role in transportation of liquids and gases. Such systems are becoming increasingly complex and serious problems arise in terms of pressure control and accident prevention to ensure their

reliability. This highlights the need to develop effective methods for monitoring and controlling pressure in pipelines. **Aim.** To develop and model the hardware and software tool for monitoring the rate of change in fluid or gas pressure in a pipeline. **Methods.** Mathematical modelling and statistical data processing. **Results and conclusions.** The pressure in the pipeline system changes depending on the state of the valves and the time of their switching. Graphical analysis of the data confirms that the rate of pressure changes increases significantly when the valves are switched, which can lead to sharp pressure fluctuations. During the modelling, quantitative characteristics of these changes were obtained. The use of pressure thresholds allows for effective control of system stability and prevention of emergency situations. The developed digital pressure monitoring device can be implemented in various industries, including the oil and gas and chemical industries, which will significantly increase the reliability and safety of pipeline systems. In the future, it is necessary to investigate the possibilities of integrating the described device with intelligent control algorithms capable of not only taking into account the current state, but also predicting pressure changes under the effect of external factors. The impact of parameters such as temperature and density of transported substances on the pressure dynamics in pipelines should also be taken into account.

Keywords: digital device, rate of pressure change, differential pressure sensor, control valves, pipeline, mathematical modelling

For citation: Ruan S.P., Mamonova T.E., Khudonogova L.I. Modelling of hardware and software system for monitoring the rate of change in fluid or gas pressure in a pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 142–151. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5167

Введение

Трубопроводы являются одним из наиболее распространенных и эффективных средств транспортировки таких продуктов, как сырая нефть, газ, химикаты и другие вещества, широко используемые в нефтяной, химической и смежных отраслях промышленности. При их перемещении на большие расстояния трубопроводный транспорт считается экономичным, безопасным и высокоэффективным способом доставки.

Одной из основных угроз для трубопроводных систем являются утечки, вызванные влиянием совокупности факторов конструкционного, технологического и эксплуатационного характера [1]. При этом одним из важнейших условий безопасной эксплуатации трубопроводов является постоянный мониторинг и регулирование давления. Это необходимо для предотвращения аварийных ситуаций, способных нанести серьезный ущерб окружающей среде, техническому оборудованию и персоналу [2].

В настоящее время активно развиваются методы диагностики состояния трубопроводных систем. Исследования [3–5] направлены на моделирование утечек и анализ поведения давления в условиях неопределенностей. В работах [6–8] реализованы подходы к обнаружению утечек с применением цифровых двойников и машинного обучения. Особое внимание уделяется анализу гидравлических ударов и волновых процессов, возникающих в результате изменения сечения потока, как указано в [9–13].

Параметры предохранительных клапанов и поведение давления в резервуарах также изучаются в контексте повышения точности и надежности работы трубопроводных систем [14, 15].

Большинство современных подходов основываются на моделировании и косвенной оценке производной давления. Например, в работах [16–18] представлены математические модели систем «трубопровод – датчик давления», а в [19] предло-

жены подходы к анализу давления с применением нейросетей и временного анализа данных. Однако реализация указанных методов в виде специализированных аппаратно-программных решений остается ограниченной.

Анализ представленных исследований показывает, что, несмотря на значительный прогресс в исследованиях в области способов и средств мониторинга изменения давления в трубопроводах, используемых в настоящее время, они в большинстве своем представляют собой подходы, основанные на применении математического моделирования, машинного обучения, цифровых двойников и не используют специализированные аппаратно-программные средства. В приведенных работах градиент давления рассматривается лишь как вспомогательный параметр, вычисляемый косвенно, что в большинстве случаев требует выполнения сложных математических решений и затрудняет их применение в технических системах.

Таким образом, задача мониторинга скорости изменения давления в трубопроводах является актуальной, особенно в условиях повышенных требований к надежности трубопроводного транспорта жидкости и газа и появления возможностей цифровой обработки сигналов.

В работах [20, 21] приводится описание метода и устройства для измерения изменений во времени давления жидкости или газа в контролируемом объекте. Указанное устройство содержит дифференциальный датчик давления и управляемые клапаны, соединенные с резервуаром. В режиме циклической работы на каждом из тактов его работы один клапан находится в открытом состоянии, а другой – в закрытом. Недостаток описанного устройства заключается в том, что через каждый такт его работы требуется инвертор для изменения знака изменения давления. Кроме того, в рассматриваемом устройстве предлагается использовать

аналого-цифровой преобразователь, что может снизить точность мониторинга изменений давления во времени.

В связи с этим требуется разработка специализированного аппаратно-программного комплекса (АПК), обеспечивающего регистрацию и анализ скорости изменения давления в трубопроводе с заданными метрологическими характеристиками и интеллектуальной обработкой данных.

Математическое описание аппаратно-программного комплекса для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в трубопроводе

Для разработки АПК и выбора оптимальных параметров управления необходимо прежде всего построить математическую модель, описывающую скорость изменения давления в контролируемом объекте с учетом влияния случайных факторов и возмущающих воздействий. При этом учесть наличие в АПК регулируемых клапанов.

Скорость изменения давления может быть выражена через разность давлений и временной интервал между моментами переключениями клапанов (1):

$$\Delta P = P(t_k) - P(t_{k-1}), \quad (1)$$

где k – номер итерации измерения; t_k – моменты времени переключения клапанов, с; $P(t)$ – давление в момент времени t , МПа; ΔP – изменение давления в момент переключения клапанов, МПа.

Скорость изменения давления зависит от направления переключения клапана (открытие или закрытие). Для каждого клапана вводится коэффициент пропускной способности, характеризующий степень влияния его состояния на скорость изменения давления в системе. При линейном изменении давления между моментами переключения динамика давления может быть описана следующим уравнением:

$$P(t) = P_0 + \Delta P \cdot \frac{(t-t_{k-1})}{T}, t \in [t_k, t_{k-1}], \quad (2)$$

где P_0 – начальное давление, МПа; T – период работы системы (время работы клапанов в одном цикле), с.

Уравнение (2) предполагает, что давление изменяется пропорционально времени до момента переключения клапана, при этом не учитываются возможные задержки и нелинейные эффекты, характерные для реальных систем.

Поскольку в реальных условиях давление может изменяться случайным образом под влиянием различных внешних и внутренних факторов, в модель необходимо ввести компонент случайных отклонений. Тогда математическая модель давления при наличии случайных составляющих примет вид:

$$P(t) = P_0 + \Delta P \cdot \frac{(t-t_{k-1})}{T} + \epsilon(t), t \in [t_k, t_{k-1}], \quad (3)$$

где $\epsilon(t)$ – случайное отклонение давления, Па.

Случайное отклонение моделируется с использованием стандартных подходов в зависимости от вида внутренних и внешних факторов.

Таким образом, математическая модель скорости изменения давления может быть представлена в виде производной давления по времени:

$$v_p(t) = \frac{dP}{dt} = \frac{P(t_k) - P(t_{k-1})}{t - t_{k-1}}. \quad (4)$$

Переключение клапанов оказывает существенное влияние на состояние системы, определяя скорость изменения давления в контролируемом объекте.

Для выбора оптимальных параметров и режимов работы АПК необходимо исследовать диапазон изменения давления и скорости его изменения во времени в контролируемом объекте при заданном периоде переключения клапанов, особенно при варьировании времени переключения клапанов.

Реализация принципа мониторинга скорости изменения давления и его моделирование

Для проведения вычислительного эксперимента в среде MATLAB была разработана имитационная модель, описывающая динамику изменения давления в системе в соответствии с уравнениями (3) и (4) при периодическом переключении клапанов, входящих в состав АПК. Модель позволяет рассчитывать текущее значение давления и скорость его изменения во времени. Формирование значений давления осуществляется с учетом случайных колебаний, моделируемых в соответствии с уравнением (3), что позволяет имитировать реальные условия эксплуатации системы. При этом сохраняется общий характер изменения давления, что дает возможность оценить влияние работы клапанов на систему на протяжении всего периода проведения вычислительного эксперимента.

На рис. 1 представлены графики изменения давления в объекте (а) и скорости изменения давления во времени (б).

Как видно из графиков, каждые пять секунд происходит переход в новое состояние, что вызывает резкие скачки давления. Эти скачки, очевидно, коррелируют с моментами обновления, что позволяет использовать пики на графике скорости изменения давления как индикаторы моментов переключения. На рис. 1, а можно заметить, что в течение первых 80 секунд наблюдается общее повышение давления с периодическими флуктуациями, после чего давление начинает постепенно снижаться и колебаться. Рис. 1, б демонстрирует, что колебания давления происходят с явно выраженной цикличностью, что подтверждает влияние перио-

дического управления клапанами АПК. Особенно важно обратить внимание на резкие скачки – они указывают на моменты, когда в трубопроводе происходят переходные процессы. Эти пики могут использоваться как маркеры для диагностики потенциальных сбоев или утечек.

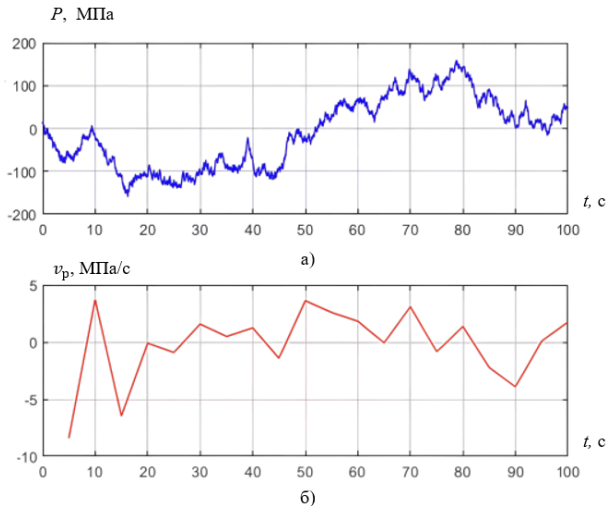


Рис. 1. Графики изменения во времени: а) давления в объекте P , б) скорости изменения давления v_p

Fig. 1. Graphs showing changes over time: а) pressure in object P , б) rate of change in pressure v_p

Временные промежутки с почти нулевой скоростью изменения давления, такие как $t \in [35, 40]$, указывают на установление квазистационарного режима, когда процессы в трубопроводе временно сбалансированы. Эти периоды представляют особый интерес с точки зрения стабильной работы: если удастся увеличить их продолжительность, трубопроводная система будет менее подвержена резким изменениям.

Кроме того, совмещенный анализ двух графиков позволяет не только отслеживать изменения давления во времени, но и оценивать инерционные свойства системы. Высокие значения производной давления в сочетании с резкими колебаниями могут указывать на необходимость доработки параметров управления, например, сглаживания режима переключения клапанов или установки буферных емкостей.

Для отслеживания состояния системы в реальном времени в модели используется информация о состоянии клапанов и данные о давлении в каждый момент времени, выводимые программой в консоль, как показано в табл. 1. Представленные данные позволяют выполнить диагностику и анализ работы модели. Так, например, в момент времени $t=5$ с. первый клапан находится в закрытом состоянии (0), а второй клапан – в открытом (1), при этом дифференциальное давление составляет $-36,08$ МПа, а скорость его изменения $-4,03$ МПа/с.

Разработанная модель дает возможность выполнять изменения нескольких параметров для исследования процесса управления клапанами АПК и анализа результата изменения давления. Так, в табл. 1 представлены значения давления и скорости его изменения в зависимости от времени при разных значениях времени переключения клапанов t .

Таблица 1. Значение давления и скорости его изменения в зависимости от времени при разном времени переключения клапанов

Table 1. Values of pressure and rate of its change over time at different valve switching times

Время t , с Time t , c	Разность давления ΔP , МПа Pressure difference ΔP , MPa	Скорость давления v_p , МПа/с Pressure speed v_p , MPa/c	Состояние клапана (0 – закрытый, 1 – открытый) Valve state (0 – close, 1 – open)	
			1	2
5	-36,08	-4,03	0	1
10	-19,36	-1,61	1	0
15	97,15	7,01	0	1
20	-11,01	-0,72	1	0
25	125,65	7,71	0	1
30	-20,03	-1,17	1	0
35	-3,86	-0,20	0	1
40	45,57	2,45	1	0
45	-36,85	-1,93	0	1
50	24,99	1,27	1	0
55	65,30	3,24	0	1
60	7,65	0,37	1	0
65	-56,01	-2,67	0	1
70	-70,86	-3,32	1	0
75	-69,71	-3,22	0	1
80	26,72	1,22	1	0
85	-9,91	-0,44	0	1
90	10,73	0,48	1	0
95	-18,06	-0,79	0	1
100	2,21	0,10	1	0

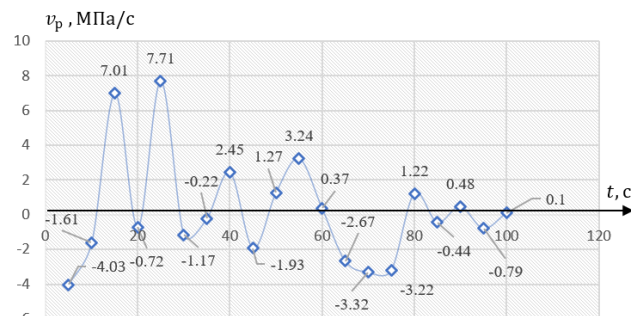


Рис. 2. Скорость изменения давления v_p с периодом переключения клапанов АПК $T=5$ с

Fig. 2. Rate of pressure change with a valve switching period of 5 s

На рис. 2. представлена зависимость скорости изменения давления от времени $v_p(t)$ при периоде переключения клапана $T=5$ с. На первых двух периодах переключения видно, что скорость давле-

ния равна $-4,03$, $-1,61$ и $7,01$ МПа/с, соответственно, что свидетельствует об увеличении давления в интервале от 10 до 15 с.

Таким образом, по знаку значения скорости изменений давления можно оценить тенденцию изменения давления в трубопроводной системе.

На рис. 3. представлены графики, отражающие влияние параметра времени переключения клапанов на чувствительность измерения давления P и скорость его изменения v_p . На графиках отображены изменения давления во времени для двух режимов переключения: $T_1=2$ с. и $T_2=10$ с.

Как видно из графиков на рис. 3, при меньшем значении $T_1=2$ с. наблюдается более частое изменение значения давления, что позволяет фиксировать кратковременные колебания давления, однако при этом значительно возрастает амплитуда этих колебаний, в большинстве случаев выходя за границы заданных пороговых значений давлений от -15 до $+15$ МПа, что может привести к повышению уровня чувствительности системы к шуму.

В случае $T=10$ с. кривая давления показывает более сглаженный характер изменения. Схожий характер изменения давления можно наблюдать и на графике скорости изменения давления: значение при $T_1=2$ с. часто выходит из пределы допустимых пороговых значений от -2 до $+2$ МПа/с, в то время как при $T_2=10$ с. скорость изменения давления ста-

новится значительно ниже, что может говорить о большей устойчивости системы.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают, что оптимизация периода переключения клапанов АПК T является ключевым фактором для обеспечения стабильности и безопасной работы системы. Выбор соответствующего значения T позволяет минимизировать экстремальные скачки давления и обеспечить динамическую устойчивость, что имеет важное значение для разработки систем автоматического контроля и управления.

Проведенный анализ динамики давления при различных периодах переключения клапанов $T_1=2$ с. и $T_2=10$ с. позволил выявить закономерности, отражающие реакцию системы на внешние управляющие воздействия. В частности, было установлено, что резкие изменения давления и его производной происходят преимущественно в моменты изменения состояния клапанов АПК, что дает возможность синхронизировать моменты фиксации величины исследуемого параметра с управляющими тактами устройства. Результаты численного моделирования изменения давления и его производной во времени в зависимости от частоты переключения клапанов легли в основу разработки АПК для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в контролируемом объекте.

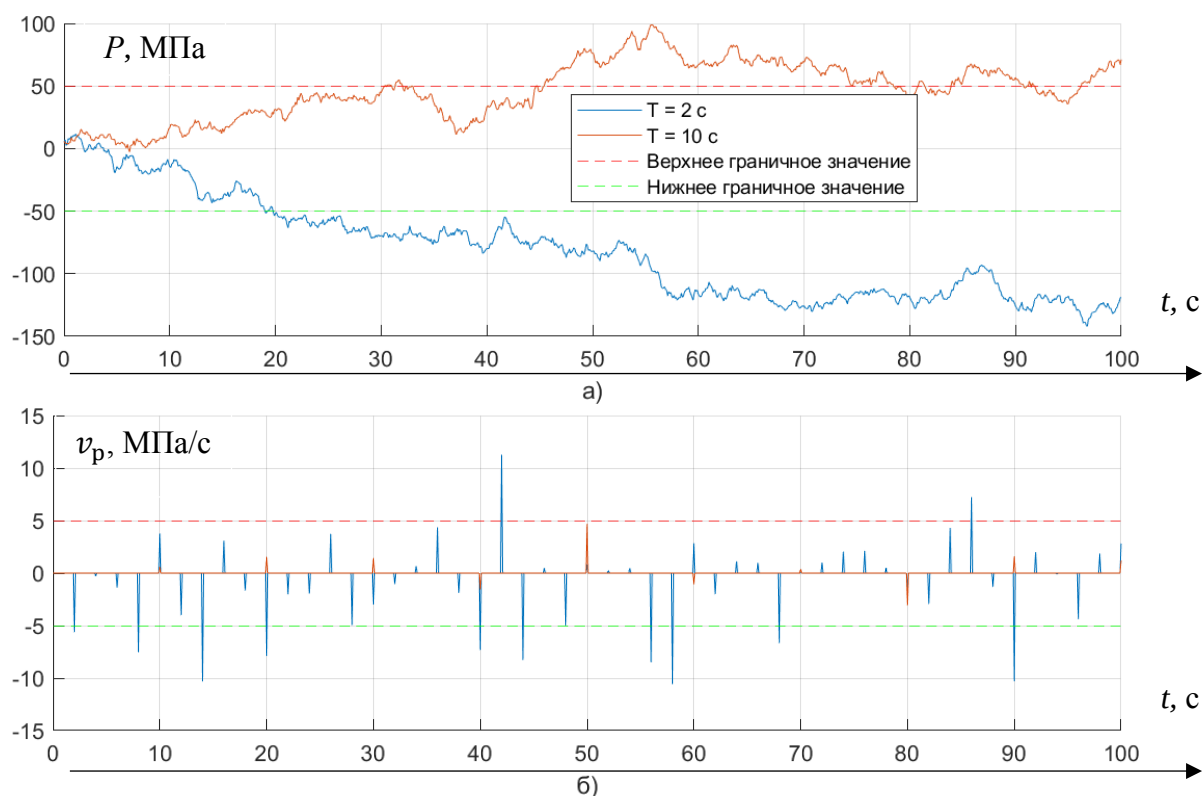


Рис. 3. Графики зависимостей от времени: а) давления P , б) скорости изменения давления v_p
Fig. 3. Graphs showing changes over time: а) pressure in object P , б) rate of change in pressure v_p

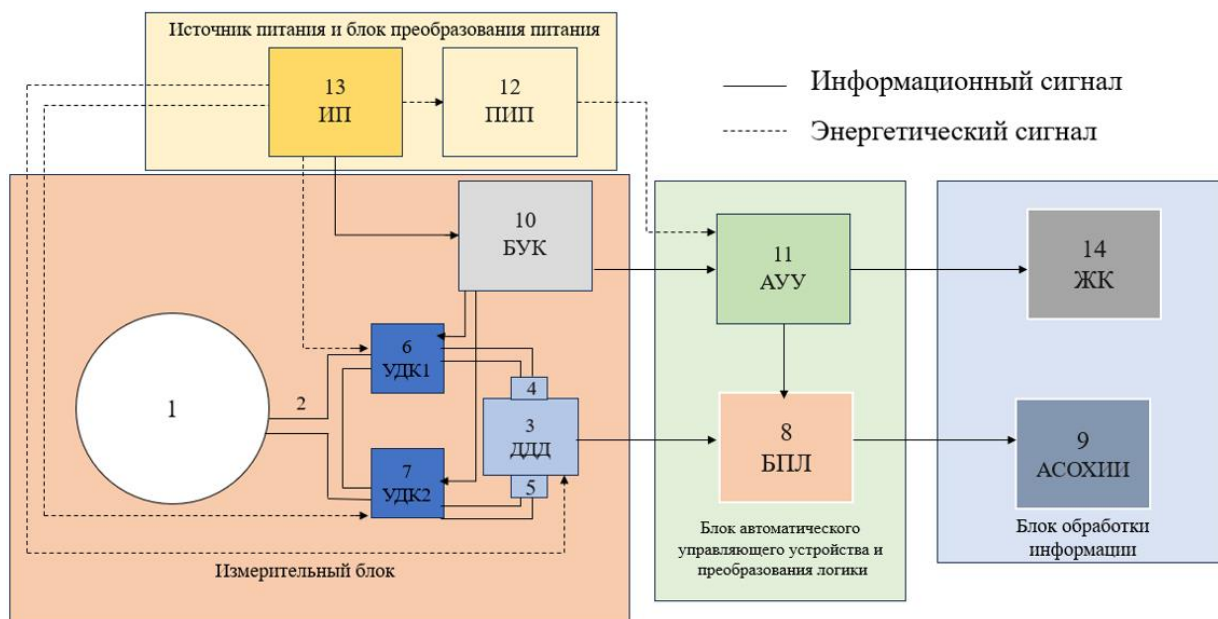


Рис. 4. Структура аппаратно-программного комплекса для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в трубопроводе: 1 – трубопровод, 2 – сечение трубопровода с двумя отводными штуцерами, 3 – дифференциальный датчик давления, 4, 5 – два входа дифференциального датчика давления, 6, 7 – два управляемых двухпозиционных клапана, 8 – блок преобразователя логики, 9 – автоматическая система обработки, хранения и/или использования информации, 10 – блок управления клапанами аппаратно-программного комплекса, 11 – автоматическое управляющее устройство, 12 – преобразователь источника питания, 13 – источник питания, 14 – жидкокристаллический дисплей

Fig. 4. Structure of the hardware and software complex for monitoring the rate of change in fluid or gas pressure in a pipeline: 1 – pipeline, 2 – pipeline section with two branch fittings, 3 – differential pressure sensor, 4, 5 – two inputs of the differential pressure sensor, 6, 7 – two controlled two-position valves, 8 – logic converter unit, 9 – automatic system for processing, storage and/or use of information, 10 – valve control unit of the hardware and software complex, 11 – automatic control device, 12 – power supply converter, 13 – power supply, 14 – liquid crystal display

Структура аппаратно-программного комплекса для мониторинга скорости изменения давления

На основании результатов проведенного моделирования была предложена конструкция АПК, предназначенного для мониторинга скорости изменения давления жидкости или газа в трубопроводе. Схема разработанного АПК представлена на рис. 4.

Два управляющих клапана – 6, 7 с заданной частотой поочередно соединяют входы – 4 и 5 датчика – 3 с внутренним объемом резервуара, создавая измеряемую разность давления во времени. Сигналы с выхода датчика – 3 поступают на преобразователь логики – 8, откуда направляются на внешнее устройство – 9 для последующей обработки.

Функционально устройство реализует алгоритм мониторинга скорости изменения давления в трубопроводе за счет фиксации значений в моменты времени с установленной периодичностью, синхронизированные с переключениями клапанов. Частота этих переключений может быть адаптирована в соответствии с техническими требованиями за счет настройки управляющего такта через автоматическое управляющее устройство – 11.

На рис. 5 представлены графики зависимостей изменения давления в контролируемом объекте – 1, на входах – 4 и 5 дифференциального датчика давления – 3, а также графики состояний управляемых клапанов – 6 и 7 (графики УК1 и УК2).

Рис. 5 показывает процедуру фиксации изменения давления в трубопроводе.

Работа АПК начинается с подачи питания на все компоненты системы. На начальном этапе по управляющим сигналам от автоматического управляющего устройства – 11 открываются оба управляемых двухпозиционных клапана – 6 и 7, соединяющих соответствующие камеры датчика – 3 с внутренним объемом контролируемого резервуара. Это обеспечивает выравнивание давления в обеих камерах датчика – 3 с текущим давлением $P_0(t)$ внутри объекта, что и фиксируется как исходное значение.

После этого АПК переходит в циклический режим функционирования с фиксированной длительностью такта T , определяемой в соответствии с характеристиками контролируемого объекта (трубопровода) – 1. На каждом такте один из клапанов АПК остается закрытым, а другой – открытым, что

позволяет фиксировать давление на одном из входов датчика и одновременно обновлять давление на втором входе датчика. Таким образом, формируется перепад давления между двумя последовательными состояниями объекта, отражающий динамику его изменения.

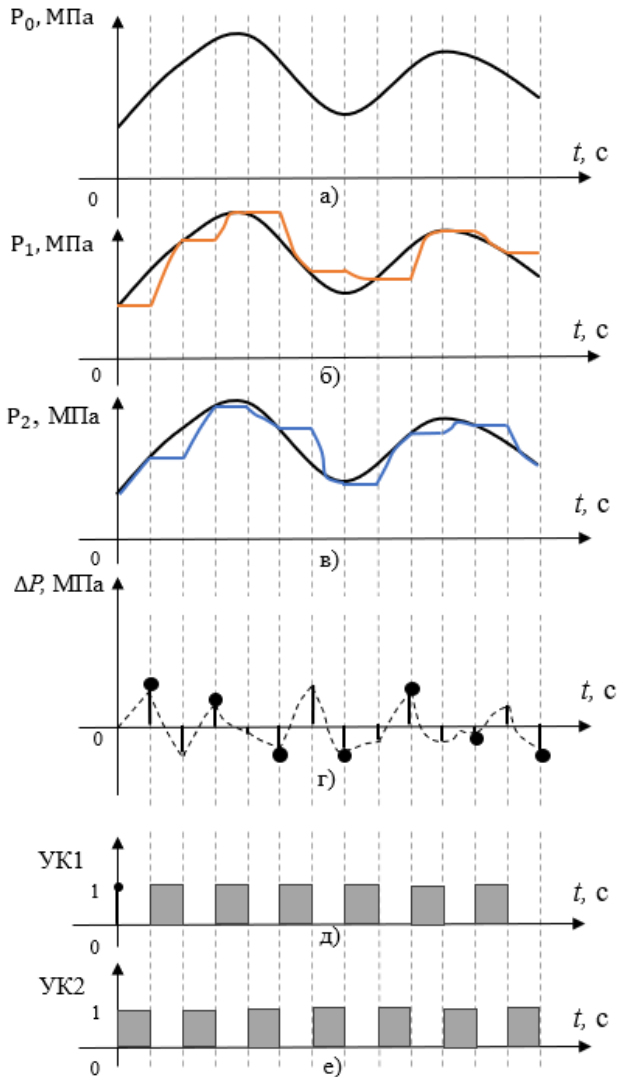


Рис. 5. Графики: а) изменения абсолютного давления в трубопроводе – 1, б) давления на входе – 4 после клапана – 6, в) фиксации давления на входе – 5 после клапана 7, г) изменения давления на выходе датчика – 3, д) состояния клапана – 6 е) состояния клапана – 7

Fig. 5. Graphs: а) changes in absolute pressure in pipeline – 1, б) pressure at inlet – 4 after valve – 6, в) pressure fixation at inlet – 5 after valve – 7, г) change in pressure at sensor outlet – 3, д) valve – 6 status, е) valve – 7 status

Длительность такта T может быть адаптирована под конкретные технические условия задачи. Она выбирается исходя из инерционных характеристик

системы, включая диаметр трубопровода, диаметр соединительных трубок и штуцеров, параметры клапанов и датчиков, а также свойства транспортируемой среды (вязкость, плотность, скорость потока). Достаточная длительность такта необходима для достижения квазистационарного давления в камерах датчика – 3 перед следующим переключением.

Во время первого измерительного такта при $t=0$ клапан – 6 закрывается, фиксируя давление в первой камере датчика – 3 на уровне $P_0(t)$, в то время как клапан – 7 остается открытым, позволяя второй камере следить за текущим давлением $P_1(t)$. Разность давлений в камерах передается на преобразователь логики – 8, обеспечивающий цифровую обработку сигнала.

На следующем такте (в интервале $2T \leq t < 3T$) происходит инверсия состояний клапанов: теперь фиксируется значение $P_2(t)$ и измеряется разность $\Delta P_2(t) = P_2(t) - P_1(t)$. Таким образом, устройство в каждом цикле формирует последовательность дискретных оценок приращения давления, отражающих скорость его изменения.

Система функционирует в замкнутом цикле, обеспечивая повторение измерительных тактов с периодом T . Это обеспечивает непрерывный мониторинг динамики давления в контролируемом объекте – 1 в реальном времени. Анализ выходного сигнала датчика – 3 на каждом такте ($\Delta P(2n-1)T$, где $n=1, 2, 3, \dots$), показывает, что знак и величина сигнала коррелируются с направлением и интенсивностью изменения давления в объекте. Такой подход обеспечивает высокую чувствительность к изменениям давления и может быть эффективно применен в системах диагностики и мониторинга состояния жидкостных и газовых сред в трубопроводах.

Заключение

В работе представлен новый аппаратно-программный комплекс для мониторинга скорости изменения давления в трубопроводных системах. Полученная математическая модель работы устройства позволяет учитывать влияние времени переключения клапанов на динамику давления в контролируемом сечении трубопровода. Проведённое численное моделирование позволило выявить характерные закономерности изменений давления.

Разработанный аппаратно-программный комплекс может эффективно применяться как в условиях лабораторных исследований, направленных на изучение динамики изменения давления в трубопроводе, так и в составе прикладных инженерных систем – для задач мониторинга и диагностики трубопроводного транспорта, а также резервуарных емкостей и других контролируемых объектов.

Реализация экспериментального стенда обеспечит валидацию математической модели и станет основой для последующего этапа – внедрения устройства в реальные технологические процессы.

Следующим этапом работы является переход к экспериментальной реализации разработанной системы, предполагающий физическое конструирование измерительной установки на основе предложенной конструкции. В качестве аппаратной базы рекомендуется выбирать компоненты, обладающие высокой функциональностью, надежностью и возможностью масштабирования. Такая конфигурация не только обеспечивает воспроизводимость резуль-

татов, полученных на этапе моделирования, но и позволяет адаптировать систему под различные условия эксплуатации.

Перспективы дальнейших исследований включают также интеграцию разработанной системы с интеллектуальными алгоритмами управления, способными не только реагировать на текущие изменения, но и прогнозировать поведение давления под воздействием внешних факторов и учетом дополнительных параметров – температуры, состава транспортируемой среды и геометрических характеристик трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуань С., Мамонова Т.Е. Модельный эксперимент параметров трубопровода с утечками в среде Comsol Multiphysics // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 52–62. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-52-62.
2. Коростелев Д.А., Левая М.Н., Левый И.С. Автоматизация процесса мониторинга и регулирования давления в нефтепроводе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 37–47. DOI: 10.24143/2072-9502-2017-1-37-47.
3. Numerical and experimental research on vibration signal characteristics of water pipeline leakage / X. Yang, F. Wang, H. Fang, X. Yu, S. Li // Measurement. – 2024. – Vol. 226. – P. 114–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114118>.
4. Garg K., Singh S., Rokade M. Experimental and computational fluid dynamic (CFD) simulation of leak shapes and sizes for gas pipeline // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2023. – Vol. 226. – P. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105112>.
5. Modelling and quantification of measurement uncertainty for leak localisation in a gas pipeline / R. Chen, S. Cui, D.W.Y. Khoo, B.C. Khoo // Measurement: Sensors. – 2024. – Vol. 24. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100443>.
6. Nejari F., Sarate R., J Blesa. Optimal pressure sensor placement in water distribution networks minimizing leak location uncertainty // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 119. – P. 953–962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.979>.
7. Data-driven digital twin method for leak detection in natural gas pipelines. Computers and Electrical Engineering / J. Liang, L. Ma, S. Liang, H. Zhang, Z. Zuo, J. Dai // Computers and Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108833>.
8. A machine-learning method to accurately recognize the leakage pressure-drop signals in trunk natural gas pipelines / X. Wu, L. Mou, W. Jia, Y. Sun, H. Liu, C. Li // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 179. – P. 847–863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.048>.
9. Investigation of water hammer effect through pipeline system / T.W. Choon, L.K. Aik, L.E. Aik, T.T. Hin // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2012. – Vol. 3. – P. 246–251.
10. Early underground pipeline collapse detection and optimization based on water hammer vibration signal / X. Xiaoyu, W. Di, Y. Fan, H. Mengwen, M. LiuHong, M. Mengke, L. Mengke, D. Zhiyong // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2023. – Vol. 206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105045>.
11. Garg R.K., Kumar A. Experimental and numerical investigations of water hammer analysis in pipeline with two different materials and their combined configuration // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – Vol. 188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104219>.
12. Investigation of partially expanded surge tank with self-adaptive auxiliary system controlling water hammer in pipelines / W. Wan, Y. Wang, X. Chen, H. Zhan, T. Wang, B. Zhang // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2023. – Vol. 40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101379>.
13. Pistiner A.A. Self-similar solution for the water hammer equation used in an infinite long pipeline // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2021. – Vol. 192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104438>.
14. Fluid-structure coupling analysis of a pressure vessel-pipe-safety valve system with experimental and numerical methods / C. Zong, Q. Li, F. Zheng, D. Chen, X. Li // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – Vol. 199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104707>.
15. A method for improving flow control valve performance based on active differential pressure regulation / B. Wang, X. Zhao, L. Quan, Y. Li, Y. Hao, L. Ge // Measurement. – 2023. – Vol. 219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113271>.
16. Вельмисов П.А., Тамарова Ю.А. Исследование нелинейной математической модели механической системы «трубопровод – датчик давления» // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2024. – № 3. – С. 352–367.
17. Вельмисов П.А., Тамарова Ю.А. Математическое моделирование системы «трубопровод – датчик давления» с учетом сжимаемости рабочей среды // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2020. – № 1. – С. 18–25.
18. Карякин А.Т. Разработка статистической модели изменения давления в зависимости от времени наблюдения и удельного давления датчика НИМЭМС // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 12. – С. 115–118.

19. Yan B., Li C., Tariq Z. Estimation of heterogeneous permeability using pressure derivative data through an inversion neural network inspired by the Fast-Marching Method // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 228. – P. 211982.
20. Мамонова Т.Е. Метод определения утечки из нефтепровода, основанный на разности во времени давления // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 216–220.
21. Устройство для измерения изменений во времени давления жидкости или газа: пат. RU 2690010, Российская Федерация, С1; заявл. 06.07.2018; опубл. 30.05.2019. – 11 с.

Информация об авторах

Жуань Сыпэн, аспирант, отделение интеллектуальных систем, Инженерная Школа «Интеллектуальные энергетические системы», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, syen@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0405-8536>

Татьяна Егоровна Мамонова, кандидат технических наук, доцент, отделение интеллектуальных систем, Инженерная Школа «Интеллектуальные энергетические системы», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, step@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8315-5424>

Людмила Игоревна Худоногова, кандидат технических наук, доцент, отделение интеллектуальных систем, Инженерная Школа «Интеллектуальные энергетические системы», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, likhud@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5234-7589>

Поступила в редакцию: 22.05.2025

Поступила после рецензирования: 15.07.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

REFERENCES

1. Ruan S., Mamonova T.E. Modelling experiment of pipeline parameters with leaks in Comsol Multiphysics. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2024, vol. 1, pp. 52–62. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-52-62
2. Korostev D.A., Levaya M.N., Levy I.S. Automation of the process of monitoring and regulation of pressure in the oil pipeline. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2017, vol. 1, pp. 37–47. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2017-1-37-47
3. Yang X., Wang F., Fang H., Yu X., Li S. Numerical and experimental research on vibration signal characteristics of water pipeline leakage. *Measurement*, 2024, vol. 226, pp. 114–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114118>
4. Garg K., Singh S., Rokade M. Experimental and computational fluid dynamic (CFD) simulation of leak shapes and sizes for gas pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, vol. 226, pp. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105112>
5. Chen R., Cui S., Khoo D.W.Y., Khoo B.C. Modelling and quantification of measurement uncertainty for leak localisation in a gas pipeline. *Measurement: Sensors*, 2024, vol. 24, 100443. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100443>
6. Nejari F., Sarate R., Blesa J. Optimal pressure sensor placement in water distribution networks minimizing leak location uncertainty. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 119, pp. 953–962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.979>
7. Liang J., Ma L., Liang S., Zhang H., Zuo Z., Dai J. Data-driven digital twin method for leak detection in natural gas pipelines. *Computers and Electrical Engineering*, 2023, vol. 110, 108833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108833>
8. Wu X., Mou L., Jia W., Sun Y., Liu H., Li C. A machine-learning method to accurately recognize the leakage pressure-drop signals in trunk natural gas pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 179, pp. 847–863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.09.048>
9. Choon T.W., Aik L.K., Aik L.E., Hin T.T. Investigation of water hammer effect through pipeline system. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2012, vol. 3, pp. 246–251.
10. Xiaoyu X., Di W., Fan Y., Mengwen H., Lihong M., Mengke L., Zhiyong D. Early underground pipeline collapse detection and optimization based on water hammer vibration signal. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, vol. 206, 105045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105045>
11. Garg R.K., Kumar A. Experimental and numerical investigations of water hammer analysis in pipeline with two different materials and their combined configuration. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, vol. 188, 104219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104219>
12. Wan W., Wang Y., Chen X., Zhan H., Wang T., Zhang B. Investigation of partially expanded surge tank with self-adaptive auxiliary system controlling water hammer in pipelines. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 40, 101379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101379>
13. Pistiner A. A self-similar solution for the water hammer equation used in an infinite long pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, vol. 192, 104438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104438>
14. Zong C., Li Q., Zheng F., Chen D., Li X., Song X. Fluid-structure coupling analysis of a pressure vessel-pipe-safety valve system with experimental and numerical methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, vol. 199, 104707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104707>
15. Wang B., Zhao X., Quan L., Li Y., Hao Y., Ge L. A method for improving flow control valve performance based on active differential pressure regulation. *Measurement*, 2023, vol. 219, 113271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113271>
16. Velmisov P.A., Tamarova Yu.A. Investigation of nonlinear mathematical model of the mechanical system ‘pipeline–pressure sensor’. *Izvestiya higher education. Volga region. Physic-Mathematical Sciences*, 2024, vol. 3, pp. 352–367. (In Russ.)
17. Velmisov P.A., Tamarova Yu.A. Mathematical modelling of the system ‘pipeline–pressure sensor’ taking into account the compressibility of the working medium. *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University*, 2020, vol. 1, pp. 18–25. (In Russ.)

18. Karyakin A.T. Development of a statistical model of pressure change depending on the observation time and specific pressure of the NIMEMS sensor. *Innovations and Investments*, 2020, vol. 12, pp. 115–118. (In Russ.)
19. Yan B., Li C., Tariq Z. Estimation of heterogeneous permeability using pressure derivative data through an inversion neural network inspired by the Fast-Marching Method. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, vol. 228:211982.
20. Mamonova T.E. Method of determining the leakage from the oil pipeline based on the pressure difference in time. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 216–220. (In Russ.)
21. Malysenko A.M., Mamonova T.E. *Device for measuring changes in time of pressure of liquid or gas*. Patent RF, no. 2690010, 2019. (In Russ.)

Information about the authors

Ruan Sipeng, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. syen@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0405-8536>

Tatiana E. Mamonova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. stepte@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8315-5424>

Ludmila I. Khudonogova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. likhud@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5234-7589>

Received: 22.05.2025

Revised: 15.07.2025

Accepted: 04.08.2025