

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №4, Том 12 / 2020, No 4, Vol 12 <https://esj.today/issue-4-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/51SAVN420.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Маслеев А.В., Гончарова В.В., Ерошкин Д.В., Чемезов И.И., Леченко Г.Е., Волков К.Р. Новая модель сосредоточенных параметров для управления газотранспортной системой // Вестник Евразийской науки, 2020 №4, <https://esj.today/PDF/51SAVN420.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Masleev A.V., Goncharova V.V., Eroshkin D.V., Chemezov I.I., Lechenko G.E., Volkov K.R. (2020). New lumped parameter model for gas transmission system control. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 4(12). Available at: <https://esj.today/PDF/51SAVN420.pdf> (in Russian)

УДК 05.23.00

ГРНТИ 05.23.03

Маслеев Александр Владимирович

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»
Магистрант
E-mail: masleev.av@students.dvfu.ru

Гончарова Виктория Владимировна

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»
Магистрант
E-mail: goncharova.vv@students.dvfu.ru

Ерошкин Дмитрий Владимирович

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»
Магистрант
E-mail: eroshkin.dv@students.dvfu.ru

Чемезов Илья Игоревич

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»
Магистрант
E-mail: chemezov.ii@students.dvfu.ru

Леченко Геннадий Евгеньевич

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»
Магистрант
E-mail: lechenko.ge@students.dvfu.ru

Волков Кирилл Романович

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»
Магистрант
E-mail: volkov.vk@students.dvfu.ru

**Новая модель сосредоточенных
параметров для управления газотранспортной системой**

Аннотация. Для моделирования современных газотранспортных систем применяются различные численные методы и алгоритмы решения нелинейных уравнений, выражающих математическую модель газопроводов, компрессорных станций и различного оборудования газотранспортных систем. К наиболее успешно применяемым методам можно отнести метод конечной разности и метод характеристик. С точки зрения вычислений модель состояний пространства является эффективным методом решения сложных пространственных и временных задач для моделирования состояния газотранспортных систем. Однако, у этой модели наблюдаются расхождения с реальными системами в области расчета импульса потока газа. В представленной работе предлагается новая модель с сосредоточенными параметрами для описания инерционного характера газопровода, находящегося под давлением. В качестве исходных данных для модели используются давления на входе или выходе и расход газа в системе. Исходя из основных уравнений гидравлики в частных производных для общего одномерного потока сжимаемого в изотермических условиях газа вычисляются передаточные функции как основа для дальнейшего моделирования. С помощью расширения Тейлора и других процедур преобразования рассчитывается инерционная составляющая модели состояний системы с должным упрощением. Главным достоинством предлагаемого алгоритма является повышение скорости вычислений, что особенно важно для сложных систем. Также в представленной статье используется пример расчета газотранспортной системы для иллюстрации эффективности предлагаемой в работе модели. Разрабатываемая модель в будущем может позволить производить автоматизацию системы с помощью различных средств в реальном времени. Предполагается, что использование предлагаемой модели повысит точность управления системой.

Ключевые слова: газотранспортная система; моделирование; численные методы; системы управления; анализ эффективности системы; скорость вычислений; модель сосредоточенных параметров; уравнения в частных производных

Введение

Природный газ является более экологичным источником получения энергии. Благодаря этому его потребление неуклонно растет [1]. С месторождений подготовленный природный газ поступает в системы транспорта газа для его получения на предприятиях и в городах. Транспортировка природного газа на большие расстояния требует применения сложных технологических комплексов, таких как компрессорные станции, трубопроводы и сопутствующее оборудование. Главным фактором, сдерживающим развитие газовой отрасли, является сложность транспортировки газа, так как объем газа той же энергетической ценности во много раз больше, чем объем жидкого или твердого топлива. По этой причине важной задачей является оптимизация процесса трубопроводного транспорта как наиболее распространенного метода. Стоит отметить, что на сегодняшний день наращиваются обороты транспортировки газа в сжиженном виде, то есть сжиженного природного газа (СПГ). Это позволяет многократно снизить объем, занимаемый газом. Однако, транспортировка СПГ также несет в себе затраты на регазификацию, которые не зависят от расстояния, на которое газ транспортируется.

Проектирование и управление такими системами это серьезный вызов для ученых и инженеров. На сегодняшний день практика эксплуатации современных газотранспортных систем предусматривает управление с использованием систем автоматизации и различных контуров управления наряду с ручным вмешательством операторов компрессорных станций. Операторы следят за тем, чтобы рассчитанные эксплуатационные параметры каждого отдельного компрессорного агрегата и другого оборудования, такого как запорная арматура, находились в пределах уставки. Современные системы управления включают в себя контуры

управления на системах SCADA. Такие системы обеспечивают диспетчерский контроль и сбор данных и являются стандартной конфигурацией в современных трубопроводных системах. С помощью систем SCADA данные в реальном времени собираются и могут быть использованы для определения состояния системы и анализа эффективности ее работы. Кроме того, это позволяет получить исходные данные для задачи по оптимизации работы системы [2].

Системы SCADA являются центром управления газопроводом, однако на сегодняшний день их работа сосредоточена на надзорном уровне. Из-за отсутствия эффективной математической модели трубопровода полностью автоматическая реализация схемы управления газопроводом невозможна [3]. Основные уравнения для таких сложных систем состоят из набора нелинейных гиперболических уравнений в частных производных [4]. Такие системы уравнений могут быть решены только с использованием численных методов. Метод характеристик, явные и неявные методы конечных разностей используются для решения математических моделей газотранспортных систем. Такие исследования направлены на точное моделирование нестационарного потока газа в трубопроводе. Для сложных систем, которые включают в себя сотни или даже тысячи взаимосвязанных элементов, процесс решения систем нелинейных уравнений требует больших вычислительных мощностей, а также времени и памяти вычислительной техники. Кроме того, существует множество различных ограничений, связанных с нормативами по внутреннему давлению в газопроводах в зависимости от того, где проходит трасса трубопровода. Также важно отметить, что внутренние состояния системы зачастую являются неизвестными из-за ограниченного числа измерений в точках, где установлены датчики по контролю расхода и давления. В последнее время были разработаны различные модели на основе состояний пространства для моделирования нестационарного потока в газопроводах [5]. Для этой цели были разработаны некоторые S-функции для работы с MATLAB-Simulink. Также были предложены модели передаточной функции как эффективный метод моделирования [6; 7].

Важно отметить, что модели состояний пространства игнорируют некоторые важные элементы систем уравнений в частных производных, выводимых из основных уравнений гидравлики, однако при этом сохраняют высокий уровень точности вычислений. Благодаря этому модели состояний пространства можно использовать для больших и сложных схем управления газотранспортными сетями. Матрица в моделях состояний пространства является матрицей прямой связи. Это означает, что в модели предусмотрен прямой канал, через который входной сигнал может влиять на выходной сигнал немедленно. Таким образом, входной сигнал с большой амплитудой и высокой частотой приводит к соответствующему изменению поведения выходного сигнала. Другими словами использование модели состояний пространства приводит к тому, что модель системы приобретает импульсный характер. В реальных трубопроводах резкого изменения параметров процесса обычно не происходит [8].

Таким образом, цель представленной работы заключается в разработке модели пространства состояний с большей точностью за исключением прямого канала между входным и выходным сигналом. Исключение прямой связи между входным сигналом и выходными данными позволит сгладить влияние сильных пульсаций на разрабатываемую модель. Это является логичным нововведением, так как реальные газопроводы обладают большой инерцией и переходные процессы в таких системах происходят очень плавно без резких скачков, которые наблюдаются во многих современных моделях газопроводов при расчете неизвестных параметров давления и расхода. Особенно это характерно для моделируемых значений расхода в современных моделях, использующих в своей основе дифференциальные уравнения в частных производных [9].

Математическая модель

Поток газа в трубопроводе описывается классическими законами сохранения массы, энергии и импульса, а также уравнениями состояния, которые используются для расчета неизвестных параметров давления и расхода. Также такие уравнения включают в себя характеристики транспортируемого газа, то есть его плотность и температуру. Кроме того, при моделировании компрессорной станции немаловажную роль играет сжимаемость природного газа, которая должна быть отражена в математической модели компрессорного агрегата. Уравнения сводятся к описанию бесконечно малого контрольного объема общего одномерного потока газа через постоянный диаметр и жесткого трубопровода.

Модель состояний пространства

Из рисунка 1 видно, что газопровод имеет большую задержку отклика при внесении раздражения в систему и в целом является системой с большой инерцией или другими словами медленной динамической системой. Основываясь на этом свойстве, в представленной работе была исключена матрица Якобиана из математической модели. Однако, важно отметить, что в целом, так как модель, разрабатываемая в представленной работе, была получена на основе установившегося состояния относительно заданных граничных условий, то их точность вычислений будет снижена при неустановившемся режиме, когда одно состояние системы сменяется другим. Тем не менее, дальнейшее тестирование модели показало устойчивость к отклонениям в определенном диапазоне.

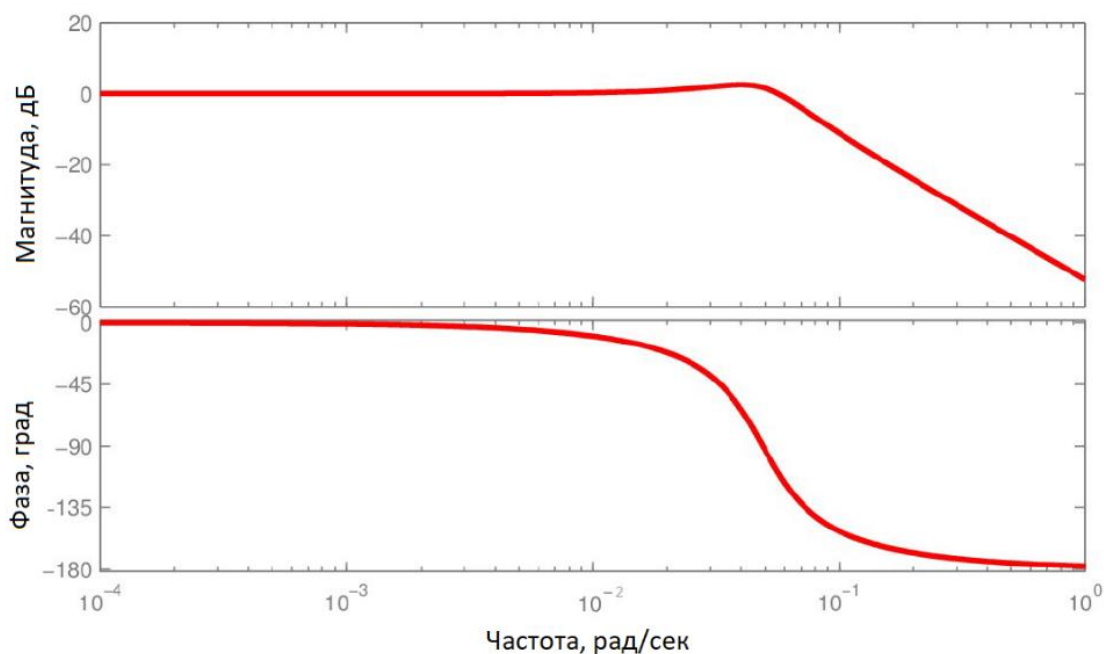


Рисунок 1. График зависимости реакции входного и выходного давлений ($\Delta P_{вх}$ и $\Delta P_{вых}$) от внешнего воздействия (составлено авторами)

Передаточные функции используются для получения модели состояний пространства и анализа переходных процессов [10; 11]. С различными парами ввода/вывода были получены различные модели состояний пространства. Уравнение (1) представляет собой модель пространства состояний с заданными входами, то есть давление газа на входе ($P_{вх}$) и массовым расходом на выходе ($G_{вых}$). Также задается два выхода из модели, то есть давление на выходе из рассматриваемого узла ($P_{вых}$) и массовый расход газа на входе ($G_{вх}$).

$$\begin{aligned} x &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du, \end{aligned} \tag{1}$$

где $u = [P_{\text{вх}}, G_{\text{вых}}]$ и $y = [P_{\text{вых}}, G_{\text{вх}}]$.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{a_2} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_1}{a_2} & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{a_2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_2 T_{21}}{a_2} \\ \frac{k_1}{a_2} & -\frac{k_2}{a_2} \\ \frac{T_{11}}{a_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Для известных значений давления на входе и выходе из трубопровода можно использовать следующую модель состояний пространства, полученную тем же способом:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{a_1 + T_{21}}{a_2 + T_{22} + a_1 T_{21}} & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{a_2 + T_{22} + a_1 T_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T_{21}}{T_{22}} & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{22}} & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{T_{11}}{a_2 + T_{22} + a_1 T_{21}} & -\frac{a_1}{k_2 a_2 + k_2 T_{22} + k_2 a_1 T_{21}} \\ \frac{k_1}{k_2 a_2 + k_2 T_{22} + k_2 a_1 T_{21}} & -\frac{1}{k_2 a_2 + k_2 T_{22} + k_2 a_1 T_{21}} \\ 0 & -\frac{T_{11}}{k_2 T_{22}} \\ -\frac{k_1}{k_2 T_{22}} & \frac{1}{k_2 T_{22}} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

в тоже время

$$T_{22} = \frac{1}{1 + \frac{1}{24}\gamma^2 + \frac{1}{1920}\gamma^4} \left(\frac{D}{\lambda|\omega|} \frac{\lambda L^2|\omega|}{6Dc^2} \left(1 + \frac{1}{40}\gamma^2 \right) + \frac{\lambda L^2|\omega|}{120Dc^2} \frac{\lambda L^2|\omega|}{Dc^2} + \frac{L^2}{6c^2} \left(1 + \frac{1}{40} \right) \right). \quad (4)$$

Процесс моделирования состояний пространства из моделей передаточной функции во многом схож. Однако, модель, разрабатываемая в представленной работе, имеет ряд отличий от предыдущих версий. Главным отличием является степень редукции. Как упоминалось ранее, характерными особенностями газопровода являются его запаздывание реакции на внешние воздействия, медленная динамика и самоуравновешиваемость, что указывает на наличие большой инерции в такой системе. Таким образом была исключена матрица Якобиана в процедуре преобразования и результат моделирования был достаточно близок к данным, полученным на экспериментальном стенде.

Оценка эффективности разрабатываемой модели

В рассмотренных расчетах был использован MATLAB-Simulink для моделирования переходных процессов для сравнения с разрабатываемой моделью. Для того, чтобы наглядно представить основные характеристики модели, использовалось ступенчатое изменение входной переменной (давления на входе), как показано на рисунке 2.

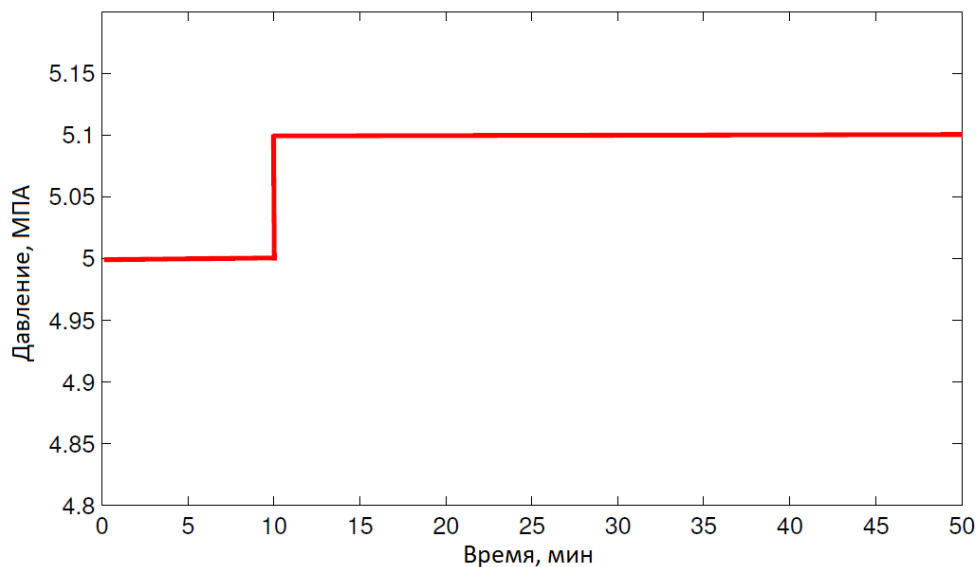


Рисунок 2. Ступенчатое изменение давления на входе в газопровод (составлено авторами)

Параметры рассматриваемого газопровода приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделируемого газопровода

Длина, км	Диаметр, мм	Температура газа, °С	Плотность газа, кг/м ³	Шероховатость стенки трубопровода, мм
60	660	21	0,68	0,012

Составлено авторами

Начальное давление на входе составляло 5 Мпа, а начальный расход составлял 60 м³/с.

По результатам моделирования давление на выходе составило 4,87 МПа. Задержка модели на отклик составила около 200 с. Модель, разрабатываемая в ходе представленной работы, показала результаты точнее, чем модель газопровода в Simulink. Также в

анализируемой модели не было выявлено резкого скачка изменения расхода, как в случае с моделью в Simulink, за счет чего была повышена точность расчета.

Рисунок 3 показывает результаты моделирования и сравнение с моделью, построенной в MATLAB-Simulink.

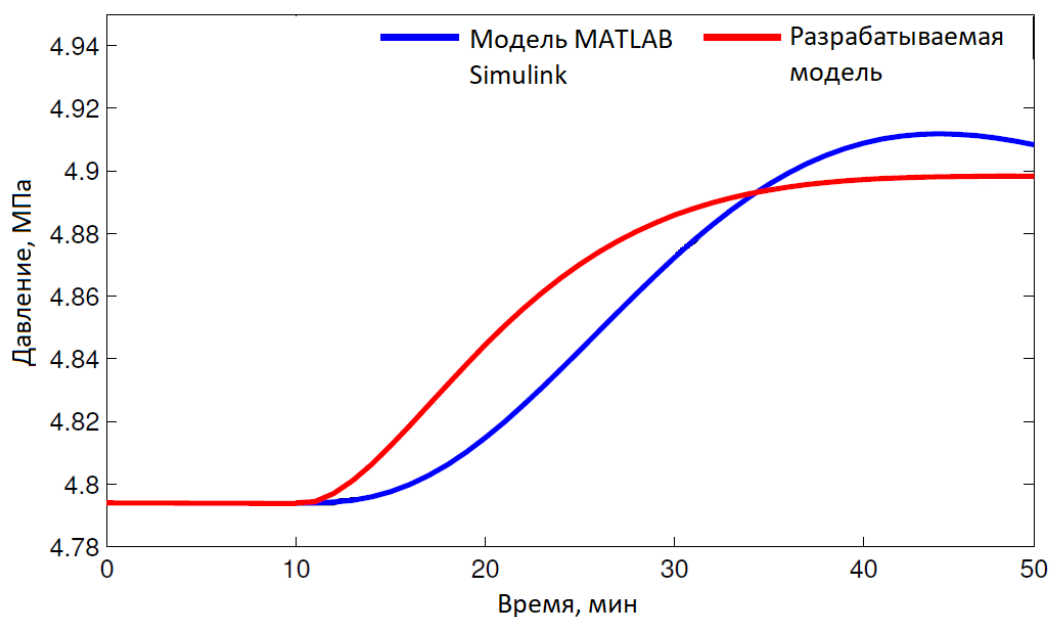


Рисунок 3. Сравнение результатов моделирования с результатами, полученными с помощью MATLAB-Simulink (составлено авторами)

На рисунке 4 показан анализ ступенчатого изменения расхода в разрабатываемой модели в модели MATLAB-Simulink.

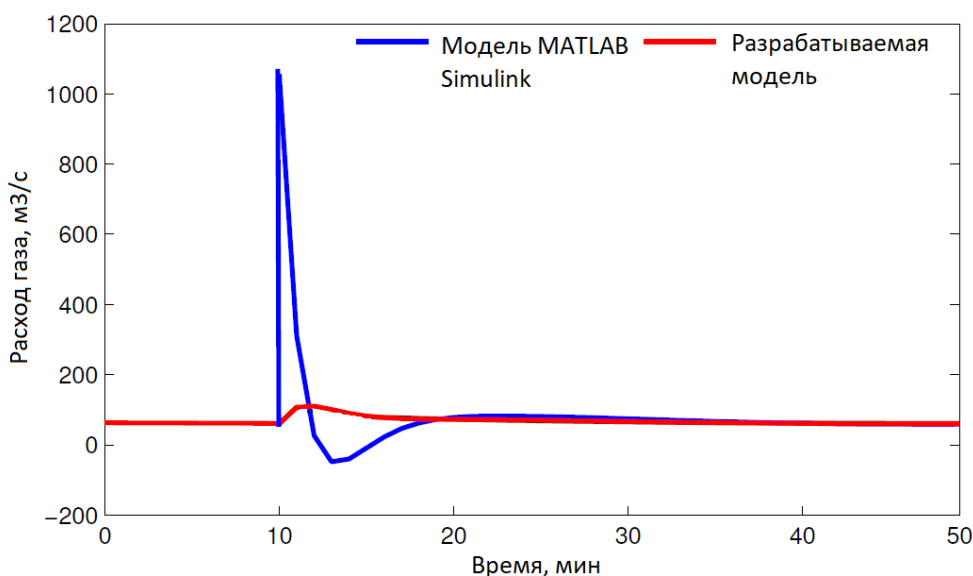


Рисунок 4. Сравнение реакции системы на ступенчатое изменение входного давления относительно расхода газа в системе для разрабатываемой модели и модели MATLAB-Simulink (составлено авторами)

Как видно из представленного графика одним из достоинств разрабатываемой модели является сглаживание эффекта ступенчатого изменения входного параметра, то есть

добавление инерционности в модель, что, как уже упоминалось ранее, хорошо коррелирует с реальными газотранспортными системами.

Ответ на комплексные входные параметры

Объем ежедневно потребляемого природного газа является непредсказуемой величиной для моделирования. Кроме того, расход газа на выходе из системы изменяется по времени. Для оценки эффективности модели в следующем разделе было использовано свободное изменение расхода на выходе из системы. Другими словами, была промоделирована ситуация, когда магистральный газопровод транспортирует газ на потребительский рынок с высокой неравномерностью потребления, которая не сглаживается наличием крупных хранилищ природного газа. Таким образом, из-за необходимости удовлетворять потребностям рынка, возникает сильный разброс неизвестных параметров расхода на выходе из газопровода. Такой пример расчета также может позволить проверить точность, с которой модель отражает поведение реального газопровода. В рассматриваемом примере были использованы другие параметры газотранспортной системы чем в примере под номером 1. В таблице 2 показаны параметры газотранспортной системы, которая использовалась для проверки точности разработанной модели.

Таблица 2

Параметры газотранспортной системы, которая использовалась для проверки точности разработанной модели

Длина, км	Диаметр, мм	Температура газа, °С	Плотность газа, кг/м ³	Шероховатость стенки трубопровода, мм
50	750	10	0,7	0,217

Моделируемый в рассматриваемом примере газопровод является хорошей аналогией ко многим современным магистральным газопроводам Российской Федерации. Это газопровод относительно большого диаметра с низкой температурой перекачиваемого газа, не превышающей 15 °С, а также повышенным коэффициентом сопротивления трения за счет коррозии внутренней стенки газопровода.

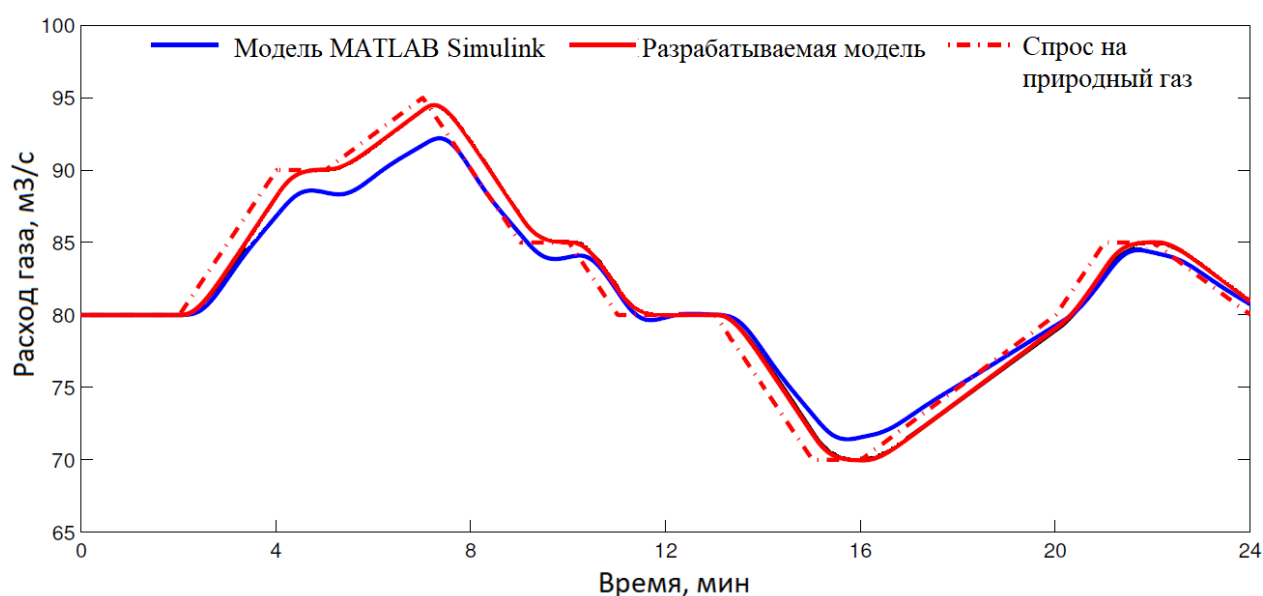


Рисунок 5. Сравнение реакции системы на постоянное изменение входного параметра расхода в разработанной модели и в модели MATLAB-Simulink

В ходе моделирования давление на входе в газопровод поддерживалось на уровне 0,3 МПа. Скорость потока природного газа в системе варьировалась в зависимости от кривой потребления на рынке, как показано на рисунке 5. Сплошная линия на графике показывает, что разработанная модель показывает результат с высокой степенью точности, удовлетворяющий требованиям для вычислительных систем. Модель показывает справедливый ответ на скорость входящего потока. В тоже время в модели MATLAB-Simulink наблюдается более резкий ответ на любое изменение во входном параметре расхода. Инерционность газотранспортной системы должна сглаживать такие колебания по всей длине газопровода, особенно в таких крупных системах как магистральный газопровод большого диаметра.

На практике скорость потока на выходе из газопровода определяется конечным потребителем. Рынок природного газа обладает существенной особенностью, которая затрудняет проектирование таких крупных систем как магистральные газопроводы. Этой особенностью является неравномерность потребления природного газа. Такая особенность связана с тем, что в зависимости от сезона, то есть от климатических особенностей местности, где расположен рынок сбыта природного газа, растет или снижается использование природного газа для отопления, приготовления пищи и генерации электроэнергии. Давление на входе в систему контролируется операторами газотранспортной системы. Управление газопроводом осуществляется за счет изменения параметров давления на входе. В примере моделирования, который показан на рисунке 5 показаны результаты моделирования, при котором давление на входе в газопровод было установлено на уровне 5,6 МПа и расходная на выходе изменялся в зависимости от принятой кривой спроса на природный газ.

Заключение

В представленной работе была разработана модель газопровода на основе уравнений состояний пространства. Главным отличием новой модели является то, что в ней исключена матрица, связывающая напрямую входной и выходной сигнал. Это позволило добавить инертность в имитационную модель. Благодаря такому нововведению точность расчетов по сравнению с моделями, основанными на системах уравнений в частных производных, была повышена за счет придания модели свойства самоуравновешивания.

Кроме уже обозначенного уточнения разработанной модели относительно реальных газотранспортных сетей в области придания инерционных свойств модели, была также повышена скорость вычислений, выполняемых компьютером при моделировании. Главным образом это было сделано за счет исключения матрицы Якобиана из расчетной модели, что позволило получить результат в моделировании даже относительно сложных систем, состоящих из большого количества трубопроводов и вспомогательного оборудования до скорости в менее чем 10 итераций для реализуемого алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Devlin J. et al., “Gas generation and wind power: A review of unlikely allies in the United Kingdom and Ireland” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, pp. 757–768 (2017).
2. Сухарев М.Г., Косова К.О. Идентификация параметров в моделях систем газоснабжения (метод и вычислительный эксперимент) // *Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина*. 2014. № 3. С. 60–68.
3. Behrooz, H.; Boozarjomehry, R. Modeling and state estimation for gas transmission networks. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2015, 22, 551–570. [CrossRef].
4. Лурье М.В. Гидравлика и ее приложения в нефтегазовом производстве / М.В. Лурье, И.М. Астрахан, В.В. Кадет, – М.: МАКС Пресс, 2010. – 332 с.
5. Modisette, J. State Estimation of Pipeline Models using the Ensemble Kalman Filter. In *Proceedings of the PSIG Annual Meeting, Prague, Czech Republic, 16–19 April 2013*.
6. Szoplik, J. Improving the natural gas transporting based on the steady state simulation results. *Energy* 2016, 109, 105–116.
7. Косова К.О. Параметрическая идентификация систем газоснабжения произвольной конфигурации // *Сб. трудов 69-й Междунар. молодежной науч. конф. “Нефть и газ – 2015”*. Москва, 2015. С. 190–199.
8. Sanada, K.; Kitagawa, A. Robust control of a closed-loop pressure control system considering pipeline dynamics. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.* C 2011, 3, 3559–3566.
9. Вельмисов П.А., Гладун А.В. Об управлении динамикой трубопровода // *Журнал Средневолжского математического общества*. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 89–97.
10. Alamian, R.; Behbahani-Nejad, M.; Ghanbarzadeh, A. A state space model for transient flow simulation in natural gas pipelines. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2012, 9, 51–59.
11. Devine M.T., Gabriel S.A., Moryadee S. A rolling horizon approach for stochastic mixed complementarity problems with endogenous learning: application to natural gas markets. *Comput Oper Res.* 2016; 68: 1–15.

Masleev Alexander Vladimirovich

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: masleev.av@students.dvfu.ru

Goncharova Victoria Vladimirovna

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: goncharova.vv@students.dvfu.ru

Eroshkin Dmitry Vladimirovich

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: eroshkin.dv@students.dvfu.ru

Chemezov Il'ya Igorevich

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: chemezov.ii@students.dvfu.ru

Lechenko Gennady Evgenievich

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: lechenko.ge@students.dvfu.ru

Volkov Kirill Romanovich

Far Eastern federal university, Vladivostok, Russia
E-mail: volkov.vk@students.dvfu.ru

New lumped parameter model for gas transmission system control

Abstract. Various numerical methods and algorithms for solving nonlinear equations expressing the mathematical model of gas pipelines, compressor stations and various equipment of gas transportation systems are used to simulate modern gas transmission systems. The most successfully applied methods include the finite difference method and the method of characteristics. From a computational point of view, the space state model is an effective method for solving complex spatial and temporal problems for modeling the state of gas transportation systems. However, this model has discrepancies with real systems in the field of calculating the gas flow impulse. In the presented work, a new model with lumped parameters is proposed to describe the inertial nature of a gas pipeline under pressure. Inlet or outlet pressures and gas flow rates in the system are used as input data for the model. Based on the basic equations of hydraulics in partial derivatives for the total one-dimensional flow of a gas compressible under isothermal conditions, transfer functions are calculated as a basis for further modeling. Using the Taylor expansion and other transformation procedures, the inertial component of the system state model is calculated with due simplification. The main advantage of the proposed algorithm is the increase in the computation speed, which is especially important for complex systems. The presented article also uses an example of calculating a gas transportation system to illustrate the effectiveness of the model proposed in the work. The developed model in the future may allow for the automation of the system using various means in real time. It is assumed that the use of the proposed model will increase the accuracy of system control.

Keywords: gas transportation system; modeling; numerical methods; control systems; system efficiency analysis; computation speed; lumped parameter model; partial differential equations