

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/49SAVN420.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Леченко Г.Е., Волков К.Р., Маслеев А.В., Гончарова В.В., Ерошкин Д.В., Чемезов И.И. Повышение скорости вычислений для имитационной модели модель газопроводной системы // Вестник Евразийской науки, 2020 №4, <https://esj.today/PDF/49SAVN420.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Lechenko G.E., Volkov K.R., Masleev A.V., Goncharova V.V., Eroshkin D.V., Chemezov I.I. (2020). Increasing the speed of computation of a simulation model of a gas pipeline system. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 4(12). Available at: <https://esj.today/PDF/49SAVN420.pdf> (in Russian)

УДК 72

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

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

**Повышение скорости вычислений
для имитационной модели модель газопроводной системы**

Аннотация. Представленная работа рассматривает вопрос разработки имитационной модели для анализа эффективности работы современных магистральных газопроводов. В работе рассмотрена разработка модели сети газопроводов с детальной характеристикой компрессорных станций в разработанной модели. Компрессорная станция является ключевым элементом газотранспортной системы. Компрессорные магистральные агрегаты придают энергию потоку природного газа для того, чтобы он мог двигаться по газопроводу. Целью представленной работы является создание компьютерной модели газотранспортной системы, которая может включать в себя различные конфигурации всех элементов системы для того, чтобы иметь возможность предсказать распределение основных эксплуатационных параметров в системе, таких как расход и давление. Математическая модель для газотранспортной сети была создана на основе уравнений гидравлики для потока жидкости в трубе, уравнений материального баланса, а также характеристик магистральных компрессорных агрегатов. Для определения неизвестных параметров давления и расхода в системе был использован реализован алгоритм решения нелинейных уравнений по методу Ньютона-Рафсона с использованием языка программирования C++. Используя основные эксплуатационные параметры, компьютерная модель оценивает потребление энергии для различных конфигураций системы для подбора оптимального расположения и состава системы. Результаты оценки разработанной модели и сравнение с другими подходами показали, что разработанная модель позволяет определять эксплуатационные параметры менее чем за десять итераций. В представленной работе детально проработан вопрос включения компрессорной станции в имитационную модель на основе рабочей характеристики магистрального компрессорного агрегата. Благодаря этому, точность расчетов для всей газотранспортной сети может быть существенно повышена.

Ключевые слова: газотранспортная сеть; компрессорные станции; моделирование газопроводов; компьютерная модель; потребление энергии; численные методы; состав системы газопровода

Введение

С каждым годом потребление природного газа в различных отраслях как промышленности, так и бытового хозяйства постоянно возрастает. Природный газ приходит на смену углю в области выработки электроэнергии и тепла, а также широко используется как в нашей стране, так и по всему миру для приготовления пищи и подогрева воды. Использование природного газа наносит меньший ущерб для экологии и несет экономическую выгоду, так как стоимость газа ниже, чем других энергоносителей. Месторождения природного газа часто расположены в отдалении от районов потребления, что создает дополнительные трудности и стимулирует развитие направлений по оптимизации работы систем трубопроводного транспорта [1].

При трубопроводном транспорте энергия движения придается газу на компрессорных станциях, после чего газ проходит через трубы и различные устройства, такие как регуляторы давления, клапаны и т. д. Давление газа по мере движения по трубопроводу снижается в основном за счет потерь энергии на трение со стенками трубопровода и теплопередачей между газом и окружающей средой. По этой причине необходимо постоянное поддержание давления по трассе газопровода. Для этого трасса газопровода включает в свой состав промежуточные компрессорные станции, где повышается давление газа. По различным оценкам от 3 до 5 % транспортируемого газа расходуется для работы газотурбинных приводов компрессоров [2]. Чем больше длина газопровода, тем больше газа используется для транспортировки для компенсации потерь давления. Даже при сохранении текущих относительно низких цен на природный газ повышение эффективности работы газопроводов может привести к получению

большой выгоды как для потребителей, так и для производителей природного газа. Главной задачей проектирования газопровода является повышение энергоэффективности системы, то есть достижения максимального расхода газа по трубопроводу с минимальными затратами энергии.

В последние годы, было проведено множество работ, посвященных численному моделированию газопроводов с целью определения оптимальных параметров работы, например, как [3; 4]. Задача по определению оптимальных эксплуатационных параметров газотранспортной системы включает в себя решение нелинейных уравнений, в которых как функция, так и входящие в уравнения аргументы могут быть нелинейны. Были предложены различные методики получения оптимальных параметров газотранспортной сети. Среди таких методов распространение получили метод изменения целевой функции или ослабление влияния некоторых ограничений [5].

Сложность расчетов существенно зависит от протяженности трубопроводной сети и ее конфигурации (наличия лупингов, ответвлений и т. д.). Также большое значение для сложности вычислений имеет характер газа (например, однофазный поток сухого газа или двухфазная смесь газа и жидкости).

Другие факторы, такие как температура газа, наличие различных источников газа (различные промысловые трубопроводы, подходящие к магистральному газопроводу), внутренняя коррозия трубопровода и т. д. также имеют немаловажное влияние на процесс вычисления с помощью численных методов. При добавлении различных элементов в модель системы, расчеты существенно усложняются, так как необходимо введение дополнительных больших нелинейных уравнений.

Компрессорная станция является основным нетрубным элементом газотранспортной системы. По этой причине моделирование компрессорной станции является сложной, но чрезвычайно важной задачей для оптимизации работы всей системы. Кроме того, важно отметить, что основные затраты происходят именно на компрессорной станции для поддержания внутреннего давления в системе [6].

Основная цель представленной работы – разработать имитационную модель газотранспортной системы для анализа производительности с учетом характеристик компрессора, эффекта двухфазного потока и состояния трубопровода.

Разработанная имитационная модель ориентирована на определение давления и расхода в узлах системы. Модель включает в себя подробные характеристики компрессорных станций. Уравнение потока, используемое при создании модели, включает в себя переменные многофазного потока и эффект коррозии внутренней стенки трубопровода. Решение нелинейных уравнений методом Ньютона-Рафсона было реализовано с использованием Visual C++. Преимуществом разработанной модели является возможность создания различных конфигураций газотранспортной системы, что позволит оценить их эффективность. Это может быть чрезвычайно полезно при проектировании газотранспортной системы, когда необходимо принять решение о выборе того или иного инвестиционного предложения.

Математическое выражение разрабатываемой модели

Основой для создания математической модели стали рабочие характеристики магистральных компрессорных агрегатов, уравнения потока, а также закон сохранения массы. Математическая формулировка и типы уравнений, описывающих работу системы, зависят от конфигурации газотранспортной сети, характера газа и коррозии внутренней стенки трубопровода.

Модель газопровода

Уравнение потока газа в трубопроводе является одним из основных уравнений математического моделирования работы газопровода. Это уравнение было получено на основе анализа расхода газа в трубопроводе. На поток газа, проходящий по трубопроводу, могут повлиять различные факторы, такие как свойства газа, коэффициент трения и геометрия трубопровода. Потеря давления по длине, то есть соотношение давления на входе в участок трубопровода и давления на выходе из рассматриваемого участка может быть описано различными уравнениями [7]. В представленной работе используется общее уравнение потока, так как оно включает в себя большое количество параметров системы и, следовательно, позволяет производить вычисления с достаточно большой точностью. Уравнение однофазного потока для элемента трубопровода можно выразить:

$$P_n^2 - P_k^2 = K_{ij} Q_{ij}^2, \quad (1)$$

где K_{ij} принимает различные формы в зависимости от безразмерных параметров, используемых в уравнении. Например, когда основные величины представлены следующим образом P [кПа], T [К], Q [м³/ч] и D [мм], то K_{ij} принимает следующую форму:

$$K_{ij} = 4,3599 \times 10^8 \frac{f_{GZT}}{D^5} \left(\frac{P_n}{T_n} \right)^2 L; \quad (2)$$

Уравнение (1) может также быть представлено в виде функции, где представлены только неизвестные параметры:

$$F(P_i, P_j, Q_{ij}) = 0. \quad (3)$$

Многие исследования [8] показали, что допущение о том, что поток газа является однофазным потоком, часто приводит к появлению неточностей в расчетах и расхождении с данными промышленной эксплуатации газопроводов и с данными экспериментов на экспериментальных стендах. В работе [9] предлагается рассматривать двухфазный поток газа как однофазный поток с измененным коэффициентом трения для компенсации неточностей, возникающих при использовании модели однофазного потока газа. Кроме того, присутствие влаги в потоке газа многократно увеличивает скорость коррозии, что с течением времени существенно влияет на шероховатость внутренней стенки трубопровода. Поэтому уравнение (1) должно быть модифицировано, чтобы учесть влияние многофазного потока и коррозии в трубопроводе.

Модель компрессора

Характеристика компрессора предоставляется производителями. Эта характеристика определяет отношение производительности к давлению. Для того, чтобы интегрировать кривые характеристик компрессора в компьютерную модель, необходимо аппроксимировать эти кривые для создания математического представления зависимости расхода от создаваемого компрессором давления.

Основными величинами, описывающими работу центробежного компрессорного агрегата, являются объемный расход на входе в компрессор (Q), частота вращения рабочего колеса агрегата (n), адиабатический КПД η .

Полином трех степеней дает более точное приближение характеристики компрессора по основным эксплуатационным характеристикам [10]. По этой причине он используется в представленной работе. Применяя принципы аппроксимации полиномиальной кривой для каждого компрессора, взаимосвязь между основными нормализованными параметрами может быть описана следующими уравнениями:

$$\frac{H}{n^2} = A_H + B_H \left(\frac{Q}{n}\right) + C_H \left(\frac{Q}{n}\right)^2 + D_H \left(\frac{Q}{n}\right)^3, \quad (4)$$

$$\eta = A_E + B_E \left(\frac{Q}{n}\right) + C_E \left(\frac{Q}{n}\right)^2 + D_E \left(\frac{Q}{n}\right)^3, \quad (5)$$

где $A_H, B_H, C_H, D_H, A_E, B_E, C_E, D_E$ – постоянные, которые зависят от используемых в уравнении величин.

При рассмотрении влияния компрессора на компьютерную модель газотранспортной сети, как уравнение (4), так и уравнение (5) нельзя использовать напрямую. Характеристика компрессорного агрегата, то есть соотношение давления нагнетания и давления всасывания с расходом должны рассчитываться для использования в модели следующим образом:

$$H = \frac{ZRT_B}{m} \left[\left(\frac{P_H}{P_B}\right)^m - 1 \right], \quad (6)$$

где $m = \frac{(k-1)}{k}$, в свою очередь k – определенный коэффициент теплопередачи компрессора и гага, R – универсальная газовая постоянная, T_B – температура всасывания и Z – сжимаемость природного газа.

Подстановка выраженного напора H из уравнения (4) в уравнение (6) дает уравнение производительности компрессора, которое может быть включено в качестве основного уравнения для создания имитационной модели:

$$\left(\frac{P_H}{P_B}\right)^m = \frac{mn^2}{ZRT_B} \left[A_H + B_H \left(\frac{Q}{n}\right) + C_H \left(\frac{Q}{n}\right)^2 + D_H \left(\frac{Q}{n}\right)^3 \right] + 1. \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой общее уравнение для одного компрессора. Следовательно, при последовательном или параллельном соединении характеристики, такие как напор и расход будут складываться. Важным является то, что основные параметры, описывающие работу компрессора, включены в это уравнение.

Уравнение материального баланса

В дополнение к описанным выше зависимостям в компьютерную модель необходимо включить уравнение материального баланса, чтобы иметь полное математическое описание системы. Уравнение материального баланса выводится на основе принципа сохранения массы на каждом участке газотранспортной системы. На любом участке системы, обобщенное уравнение материального баланса для t входящих в узел трубопроводов, u выходящих и w отводов можно резюмировать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{i=t} Q_i - \sum_{j=1}^{j=u} q_j - \sum_{l=1}^{l=w} D_l = 0, \quad (8)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_t – расход газа через входящие в узел трубопроводы, q_1, q_2, \dots, q_u – расход газа через выходящие из узла трубопроводы и D_1, D_2, \dots, D_l – расход газа через отводы из узла.

Алгоритм решения математической модели

Для анализа в представленной работе будет рассмотрена газотранспортная система с n_t количеством трубопроводов, n_k количеством компрессорных станций, работающих параллельно для достижения максимального расхода, также n_n – количество контуров и n_j – количество переходов.

В таком случае количество уравнений потока газа, уравнений компрессора и уравнений материального баланса соответствует количеству неизвестных параметров расхода и давления в системе, что делает задачу возможной для решения с помощью численных методов.

Примем N_P – общее количество неизвестных параметров давления;

N_Q – общее количество неизвестных параметров потока.

Следовательно, общее количество неизвестных параметров $N_{об}$ определяется как сумма N_Q и N_P .

Набор уравнений газопроводов, компрессорных станций и уравнений материального баланса может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} F_1(P_1, P_2, \dots, P_{N_P}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_Q}) = 0 \\ \vdots \\ F_{N_{об}}(P_1, P_2, \dots, P_{N_P}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_Q}) = 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Система уравнений (9) может быть переписана в матричной форме:

$$\tilde{F}(\tilde{X}) = \tilde{0}, \quad (10)$$

где вектор X представляет общее количество неизвестных параметров давления и расхода. Процедура итераций по методу Ньютона-Рафсона принимает форму:

$$\tilde{X}_{нов} = \tilde{X}_{пр} - [\tilde{A}|_{\tilde{X}_{пр}}]^{-1} \tilde{F}(\tilde{X}_{пр}), \quad (11)$$

где \tilde{A} – это матрица Якобиана, элементы которой это частные производные функций с отсылкой к неизвестным давлениям и расходам.

Матрица \tilde{A} выражается в следующем виде:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial P_{N_P}} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial Q_{N_Q}} \\ \vdots & & & & & \\ \frac{\partial F_{N_{об}}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial F_{N_{об}}}{\partial P_{N_P}} & \frac{\partial F_{N_{об}}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_{N_{об}}}{\partial Q_{N_Q}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) матрица, обратная матрице Якобиана должна быть рассчитана для каждой итерации.

Значение неизвестных параметров может быть рассчитано по уравнению (12) итеративно до тех пор, пока относительная ошибка не достигнет требуемого значения точности.

Для более эффективной работы имитационной модели, программный код разбивается на несколько подзадач. Среди этих подзадач можно отметить математическую формулировку системы уравнений, подзадачу генерации элементов матрицы, подзадачу для входных данных, подзадачу для сортировки ошибок и оценки газотранспортной сети. Процедуры решения были сведены к окончательному решению в зависимости от первоначальной оценки. Важным достижением разработанной модели можно назвать то, что значения неизвестных параметров давления и расхода в большинстве случаев находятся менее чем за десять итераций. Компьютерная модель была протестирована путем предоставления широкого диапазона начальных характеристик газотранспортных сетей различных конфигураций. Сходимость значений, полученных с помощью разработанной модели с данными экспериментов на испытательном стенде была достигнута в абсолютном большинстве случаев. Пользователь имеет возможность получить окончательное решение, а также варьировать как основные

Таким образом, всего для решения рассматриваемой задачи необходимо получить 17 независимых уравнений. Для этого были использованы 10 уравнений потока в трубопроводе, 1 уравнение компрессора, 2 уравнения контура и 4 уравнения материального баланса. Газотранспортная сеть была проанализирована с помощью разработанной имитационной модели в трех условиях, которые включают в себя анализ однофазного газового потока, двухфазный анализ газожидкостного потока и однофазный поток с учетом коррозии внутренней стенки трубопровода. Имитационная модель была протестирована путем варьирования различных эксплуатационных параметров и в результате показала хорошую сходимость получаемых значений с данными промышленной эксплуатации. В узлах 1 и 2 давление газа было получено равным 2 500 и 4 000 кПа соответственно.

Заключение

В разработанной модели включена подробная модель компрессорной станции. Это существенно повышает точность производимых расчетов. Модель позволяет производить детальный расчет эффективности работы системы, в том числе и энергопотребления при работе системы, степень сжатия и общий расход газа. В результате модель может помочь при проектировании и эксплуатации газотранспортных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. P.J. Hibbard and T. Schatzki. The interdependence of electricity and natural gas: current factors and future prospects. *The Electricity Journal*, 25(4):6–17, 2012.
2. Толмачев, В.Н. Оптимизация структуры энергетических комплексов на основе имитационного моделирования / В.Н. Толмачев [и др.] // Газовая промышленность. – 2013. – № 11. – С. 52–56
3. M. Abbaspour, K.S. Chapman, and L.A. Glasgow, "Transient modeling of nonisothermal, dispersed two-phase flow in natural gas pipelines", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, pp. 495–507, 2010.
4. Yongzhi Zhou, Chenghong Gu, Hao Wu, Yonghua Song. An Equivalent Model of Gas Networks for Dynamic Analysis of Gas-Electricity Systems *IEEE Transactions On Power Systems* 2017.
5. H. Egger, T. Kugler, and N. Strogies. Parameter identification in a semilinear hyperbolic system. *Inverse Probl.*, 33(5): 055022, 2017.
6. Чжан Ч., Меньшов И.С. Численное моделирование истечения природного газа из подводного газопровода // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 74. 18 с. DOI: 10.20948/prepr-2017-74.
7. S. Grundel and L. Jansen. Efficient simulation of transient gas networks using IMEX integration schemes and MOR methods. In 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pages 4579–4584, 2015.
8. F. Babonneau, Y. Nesterov, and J.-P. Vial. Design and operations of gas transmission networks. *Operations research*, 60(1): 34–47, 2014.
9. T.G. Grand'ou, H. Heitsch, and R. Henrion. A joint model of probabilistic/robust constraints for gas transport management in stationary networks. *Comput. Manag. Sci.*, 14(3): 443–460, 2017.
10. Чучкалов, М.В. Обеспечение работоспособности газопроводов при диспетчерском управлении технологическими процессами газотранспортной системы / Усманов Р.Р., Чучкалов М.В., Иванов Э.С., Китаев С.В., Дарсалия Н.М. // Газовая промышленность. – 2018. – № 6. – С. 88–93.

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

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

Increasing the speed of computation of a simulation model of a gas pipeline system

Abstract. The presented work considers the issue of developing a simulation model for analyzing the efficiency of modern gas trunklines. The work considers the development of a model of a gas pipeline network with a detailed description of compressor stations in the developed model. The compressor station is a key element of the gas transmission system. Trunk compressor units energize the natural gas stream so that it can move through the pipeline. The aim of the presented work is to create a computer model of the gas transmission system, which can include various configurations of all elements of the system in order to be able to predict the distribution of the main operating parameters in the system, such as flow rate and pressure. The mathematical model for the gas transmission network was created based on the hydraulic equations for the fluid flow in the pipe, the material balance equations, as well as the characteristics of the main compressor units. To determine the unknown parameters of pressure and flow in the system, an algorithm for solving nonlinear equations by the Newton-Raphson method using the C++ programming language was used. Using the basic operating parameters, the computer model estimates the energy consumption for various system configurations to select the optimal system layout and composition. The results of evaluating the developed model and comparison with other approaches showed that the developed model allows the determination of operational parameters in less than ten iterations. In the presented work, the issue of including the compressor station in the simulation model based on the operating characteristics of the main compressor unit is worked out in detail. Due to this, the accuracy of calculations for the entire gas transmission network can be significantly increased.

Keywords: gas transmission network; compressor stations; gas pipeline modeling; computer model; energy consumption; numerical methods; gas pipeline system composition