

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Автоматизация и информатизация ТЭК. 2025. № 2(619). С. 34–47.

Automation and informatization of the fuel and energy complex. 2025; (2(619)):34-47.

Научная статья

УДК 519.673

Шифр научной специальности: 1.2.2

## ИМИТАЦИОННАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ КРУПНОЙ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С АППАРАТНЫМ УСКОРЕНИЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ

Александр Вячеславович Белинский

НИИГазэкономика, г. Москва, Россия, A.Belinskiy@econom.gazprom.ru

**Аннотация.** Рост значимости природного газа в обеспечении энергетической безопасности и надежности энергоснабжения потребителей выдвигает на первый план задачи имитации и планирования нестационарных режимов работы газотранспортной системы (ГТС) Единой системы газоснабжения России. Учитывая высокую размерность этих задач и вычислительную трудоемкость, их решение требует применения рационально построенных математических моделей и алгоритмов, обеспечивающих баланс точности результатов моделирования и быстродействия. В статье предлагается новый подход к компьютерной реализации вычислительных процедур для моделирования нестационарных режимов работы крупных ГТС. В основу имитационного алгоритма предлагается положить разработанную отечественными учеными нестационарную модель течения газа в магистральных газопроводах, требующую значительно меньших вычислительных затрат по сравнению с классическими моделями в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Отличительная особенность настоящей работы состоит в применении новой парадигмы – дифференцируемого программирования ("дифференцируемой физики") – для программной реализации расчетного алгоритма. Представлены основные характеристики разработанной автодифференцируемой имитационной расчетной модели, которая адаптирована для выполнения тензорных параллельных вычислений на графических процессорах (GPU). Показано, что предложенные математические, программные и аппаратные методы вычислений позволяют сформировать новую эффективную компьютерную технологию моделирования (имитации) нестационарных режимов работы крупных ГТС с аппаратным ускорением вычислений. Обсуждается подход к созданию гибридных моделей, сочетающих "точные" физические модели на основе знаний с моделями машинного обучения на основе данных. Отмечается, что дифференцируемое программирование является связующим звеном между классическим моделированием систем и применением моделей машинного обучения, в частности искусственных нейронных сетей. Демонстрируются результаты вычислительных экспериментов, свидетельствующие о высоком быстродействии разработанного алгоритма при имитации режимов функционирования реальных крупных ГТС. Обсуждаются направления дальнейших исследований по созданию новых алгоритмов оптимизации нестационарных режимов крупных ГТС на основе предложенной автодифференцируемой имитационной модели.

**Ключевые слова:** нестационарный процесс, имитация, газотранспортная система, нейронная сеть, дифференцируемое программирование

**Для цитирования:** Белинский А.В. Имитационная нестационарная гибридная модель крупной газотранспортной системы с аппаратным ускорением вычислений на графических процессорах // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 2(619). – С. 34–47.

Original article

### SIMULATION NON-STATIONARY HYBRID MODEL OF A LARGE SCALE GAS TRANSPORTATION SYSTEM WITH HARDWARE ACCELERATION OF COMPUTATIONS ON GRAPHIC PROCESSING UNITS

Alexander V. Belinsky

NIIGazekonomika, Moscow, Russia, A.Belinskiy@econom.gazprom.ru

**Abstract.** The growing importance of natural gas in ensuring energy security and reliability of energy supply to consumers brings to the forefront the tasks of simulating and planning non-stationary modes of the gas transportation system (GTS) operation of the Russian Unified Gas Supply System. With account for the high dimensionality of these problems and the computational complexity,

their solution requires the use of rationally built mathematical models and algorithms that ensure a balance between the accuracy of the simulation results and speed. The author of the article proposes a new approach to the computer implementation of computational procedures for simulating non-stationary modes of operation of large GTS. The simulation algorithm is proposed to be based on a non-stationary model of gas flow in main gas pipelines developed by domestic scientists, which requires significantly lower computational costs compared to classical models in the form of partial differential equations. A distinctive feature of the present article is the use of a new paradigm – differentiable programming ("differentiable physics") – for software implementation of the calculation algorithm. The main characteristics of the developed auto-differentiable simulation calculation model, which is adapted for performing tensor parallel computing on graphics processing units (GPUs), are presented. It is shown that the proposed mathematical, software and hardware computation methods allow possible developing a new efficient computer technology for modeling (simulating) non-stationary operational modes of large GTS with hardware computations acceleration. An approach to creating hybrid models that combine "exact" physical models based on knowledge with machine learning models based on data is discussed. It is noted that differentiable programming is a link between classical modeling of systems and the use of machine learning models, in particular, artificial neural networks. The results of computational experiments are demonstrated, indicating the high performance of the developed algorithm when simulating the operational modes of real large GTS. Directions for further research on the creation of new algorithms for optimizing non-stationary operating modes of large GTS based on the proposed auto-differentiable simulation model are discussed.

**Keywords:** non-stationary process, simulation, gas transportation system, neural network, differentiable programming

**For citation:** Belinsky A.V. Simulation non-stationary hybrid model of a large scale gas transportation system with hardware acceleration of computations on graphic processing units // Automation and informatization of the fuel and energy complex. – 2025. – No. 2(619). – P. 34–47.

### Введение

Имитационное моделирование является важным инструментом для решения задач оперативного управления режимами работы газотранспортных систем (ГТС). Суть имитационного моделирования заключается в разработке специально построенной цифровой модели, адекватно отражающей процессы течения газа в конкретной моделируемой ГТС, и использовании этой модели для исследования (воспроизведения) ожидаемого поведения ГТС при изменении ее характеристик, условий функционирования и/или управляющих воздействий. Такую модель эксперт-технолог может "проиграть" во времени, например задав управляющие воздействия (переключения запорно-регулирующей арматуры, изменение схем работы компрессорных цехов и др.), чтобы оценить их влияние на параметры режима функционирования ГТС. Заметим, что имитационная модель непосредственно не предназначена для расчета (оптимального выбора) значений управляющих воздействий (что является целью оптимизационной модели), а лишь использует в качестве исходных данных их заданные значения для воспроизведения нестационарного режима.

Исследованию решения задач имитации нестационарных режимов транспорта газа по магистральным газопроводам посвящены многочисленные научные работы, в которых предлагаются различные модификации моделей нестационарного течения газа в трубах [1–3]. В дочерних газотранспортных обществах ПАО "Газпром" внедрены несколько программно-вычислительных комплексов (ПВК), которые позволяют проводить моделирование (имитацию) нестационарных режимов работы реальных региональных ГТС. Такие ПВК используются диспетчерским персоналом

эксплуатирующих организаций для планирования режимов транспорта газа.

Принципиальные трудности возникают при создании вычислительных процедур для имитации нестационарных режимов работы крупных ГТС уровня нескольких газотранспортных обществ и ГТС Единой системы газоснабжения (ЕСГ) в целом. Такие модели имеют большой потенциал для совершенствования управления ЕСГ. Однако попытки разработки соответствующих компьютерных программ сталкиваются с их недостаточным быстродействием, что ограничивает возможность их применения на практике при оперативном управлении системами газоснабжения.

Для решения проблемы быстродействия вычислительных алгоритмов предложены нестационарные модели трубопровода с сосредоточенными параметрами [4, 5] (МСП). Такие модели содержат лишь обыкновенные дифференциальные уравнения и достаточно хорошо описывают штатные неаварийные режимы течения, которые характеризуются сравнительно медленными изменениями параметров. Они позволяют значительно сократить время счета (по сравнению с классической моделью в виде дифференциальных уравнений в частных производных) без значимой потери точности. Модели МСП открывают новые возможности для создания эффективных алгоритмов оптимизации нестационарных режимов ГТС, которые могут использовать такие модели для многократного направленного анализа различных вариантов реализации режимов и расчета рациональных управляющих воздействий.

Тем не менее для крупных ГТС время расчета даже одной нестационарной траектории (т. е. одной последовательности временных слоев нестационарного

режима ГТС) зачастую оказывается слишком продолжительным для того, чтобы можно было использовать традиционные компьютерные реализации этих моделей при решении задач оптимизации. В связи с этим исследования в области создания эффективных вычислительных алгоритмов имитации режимов работы крупных ГТС активно продолжаются.

Одним из перспективных направлений развития компьютерного моделирования является внедрение новой парадигмы – дифференцируемого программирования (ДП) – в практику разработки прикладных цифровых моделей крупных ГТС. ДП позволяет создавать автодифференцируемые модели процессов течения газа, при этом скорость счета на таких моделях кратно выше по сравнению с традиционными эффективными компьютерными реализациями [6]. Это достигается за счет быстрого и точного расчета производных, задействованных в решении (не используя традиционное численное дифференцирование), а также программно-аппаратного ускорения тензорных вычислений и решения систем линейных алгебраических уравнений на специально предназначенных для таких вычислений графических процессорах (GPU). Идеи создания подобных моделей почерпнуты из опыта обучения современных больших искусственных нейронных сетей (ИНС), также опирающихся на парадигму ДП и аппаратное ускорение на GPU. Автодифференцируемые модели режимов транспорта газа, использующие аппаратное ускорение вычислений, открывают новые возможности для создания как имитационных, так и оптимизационных моделей нестационарных режимов работы крупных ГТС.

## 1. Имитационная нестационарная модель крупной ГТС

Моделирование штатных переходных процессов в длинных газопроводах на практике характеризуется относительно медленными изменениями параметров газового потока. Такие процессы хорошо описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных [2]

$$\begin{aligned}\frac{\partial p^2}{\partial x} &= -\Lambda q|q|, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -B \frac{\partial q}{\partial x},\end{aligned}\quad (1)$$

где функции  $p = p(x, t)$ ,  $q = q(x, t)$  – средние по сечению трубы, перпендикулярному оси трубопровода, значения давления и коммерческого расхода газа;  $\Lambda$ ,  $B$  – коэффициенты, зависящие от характеристик труб, свойств газа и единиц измерения;  $x$  – пространственная координата, обычно представлена в виде от-

носительной величины (деленной на длину трубопровода);  $t$  – временная координата.

Для того чтобы система (1) имела однозначное решение, требуется задать начальные и граничные условия. В качестве начальных условий зачастую принимают стационарный режим течения, а в качестве граничных условий задают две из четырех функций  $p(x, t)$ ,  $q(x, t)$  на разных концах трубопровода, при этом на одном из концов должна быть задана функция  $p(x, t)$ .

Для численного интегрирования системы (1) обычно используется метод конечных разностей. Однако при моделировании крупных ГТС информация о параметрах газового потока вдоль оси трубопровода зачастую оказывается избыточной, и для решения практических задач достаточно рассчитать значения этих параметров на концах трубопроводов. Это соображение привело к развитию альтернативного подхода к моделированию переходных процессов в ГТС, который использует обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) [3]

$$\begin{aligned}[p^s]^2 - [p^f]^2 &= 0,5\Lambda \left( q^s |q^s| + q^f |q^f| \right) - \\ &- \frac{2\Lambda}{aB} \left[ |q^s| \frac{dp^s}{dt} - |q^f| \frac{dp^f}{dt} \right],\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\frac{dp^s}{dt} + \frac{dp^f}{dt} + \frac{\Lambda}{a} \left[ \frac{q^s |q^s|}{[p^s]^2} \frac{dp^s}{dt} - 2 \frac{|q^s|}{p^s} \frac{dq^s}{dt} - \frac{q^f |q^f|}{[p^f]^2} \frac{dp^f}{dt} + 2 \frac{|q^f|}{p^f} \frac{dq^f}{dt} \right] = \\ = 2B [q^s - q^f],\end{aligned}\quad (3)$$

где  $p^s = p(0, t)$ ,  $p^f = p(1, t)$ ,  $q^s = q(0, t)$ ,  $q^f = q(1, t)$ ;  $a$  – эмпирический параметр модели с рекомендуемым значением  $14 \leq a \leq 16$ .

Начальные условия могут быть получены по нормативной формуле, связывающей расход газа через трубопровод со значениями давления газа на его концах

$$[p^s]^2 - [p^f]^2 = c \frac{\lambda_{cp} z_{cp} \Delta T_{cp} L}{D_{вн}^5} q|q| = \Lambda q|q|, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от единиц измерения;  $\lambda_{cp}$  – осредненный коэффициент гидравлического сопротивления;  $z_{cp}$  – среднее значение коэффициента сжимаемости;  $\Delta$  – относительная плотность газа по воздуху;  $T_{cp}$  – средняя температура газа;  $L$  – протяженность трубопровода;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр трубы.

Для вычисления температуры газа в конце трубопровода  $T^f = T(1, t)$  при известной функции  $T^s = T(0, t)$

можно воспользоваться формулой Шухова с поправкой на эффект Джоуля – Томсона, регламентированной отраслевым стандартом [7]

$$T^f(t) = T_{oc} + (T^s(t) - T_{oc})e^{-a(t)L} - D_i \frac{[p^s]^2 - [p^f]^2}{2a(t)Lp_{cp}(t)} (1 - e^{-a(t)L}), \quad (5)$$

где  $a = 225,5 \cdot 10^6 K_{то} D / q_{cp}(t) \Delta c_p$ ;  $K_{то}$  – коэффициент теплообмена;  $D$  – диаметр трубы;  $q_{cp}(t) = 0,5 \left( |q^s| |q^s| + |q^f| |q^f| \right)^{0,5}$ ;  $D_i$  – среднее значение коэффициента Джоуля – Томсона;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость газа.

Значения  $\lambda_{cp}, z_{cp}, \Delta$  рассчитываются в соответствии со стандартом [7].

Модель (2), (3), (5) относится к классу моделей с сосредоточенными параметрами. Эта модель позволяет перейти к описанию нестационарных течений газа в ГТС произвольной конфигурации с помощью системы ОДУ. Как установлено вычислительными экспериментами [5], для интегрирования системы уравнений МСП целесообразно использовать неявный метод Эйлера.

Конечно-разностная схема в векторно-матричной записи в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned} F_{1,j} &= A^T P_j - \frac{1}{2} \Lambda (\Theta_j^s q_j^s + \Theta_j^f q_j^f) + \frac{2}{\Delta t} \Lambda B^{-1} \left[ \Theta_j^s (A^s)^T (p_j - p_{j-1}) + \Theta_j^f (A^f)^T (p_j - p_{j-1}) \right] = 0, \\ F_{2,j} &= \left[ (A^s)^T - (A^f)^T \right] (p_j - p_{j-1}) + \frac{1}{a} \Lambda \left[ \Psi_j^s (A^s)^T (p_j - p_{j-1}) - \Omega_j^s (q_j^s - q_{j-1}^s) + \right. \\ &\quad \left. + \Psi_j^f (A^f)^T (p_j - p_{j-1}) - \Omega_j^f (q_j^f - q_{j-1}^f) \right] - 2\tau B (q_j^s - q_j^f) = 0, \\ F_{y3,j} &= A^s q_j^s + A^f q_j^f - Q_j = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где матрица инцидентий  $A$  расчетного графа ГТС размером  $m \times n$  представлена в виде суммы  $A = A^s + A^f$ ;  $m, n$  – число узлов и дуг расчетного графа, соответственно; ненулевые элементы  $A^s (A^f)$  равны  $+1 (-1)$ ;  $\tau$  – шаг численного интегрирования;  $j$  – индекс временного слоя;  $P_j$  – вектор потенциала;  $p_j$  – вектор значений давления газа в узлах расчетного графа;  $q_j^s, q_j^f$  – векторы расходов газа в начале и конце каждой дуги;  $\Theta_j^s, \Theta_j^f, \Psi_j^s, \Psi_j^f, \Omega_j^s, \Omega_j^f$  – диагональные матрицы  $n \times n$  с элементами  $|q_{i,j}^s|, |q_{i,j}^f|, |q_{i,j}^s|/P_{i,j}^s, |q_{i,j}^f|/P_{i,j}^f, 2|q_{i,j}^s|/P_{i,j}^s, 2|q_{i,j}^f|/P_{i,j}^f$ ; элементы диагональных матриц  $\Lambda, B$  размером  $n \times n$ , как и прежде, зависят от геометрических размеров трубы, свойств транспортируемого флюида, единиц измерения и режимных параметров;  $Q_j$  – вектор внешних притоков/отборов.

При наличии в моделируемой схеме других типов объектов (компрессорных цехов, гидравлических сопротивлений и др.) система уравнений (6) дополняется замыкающими уравнениями, которые можно представить в виде неявных функций

$$\Phi_l(p_l^s, p_l^f, q_l^s, q_l^f, g_l, r_l) = 0, \quad (7)$$

где  $p_l^s, p_l^f, q_l^s, q_l^f$  – значения давления и расходов газа на входе и выходе  $l$ -й дуги (моделируемого объекта);  $g_l$  – вектор свойств газа и газового потока (включая температуру газа) на входе в  $l$ -ю дугу;  $r_l$  – вектор параметров  $l$ -й дуги.

Соответствующие модели объектов представлены в работе [2]. Например, для моделирования в составе ГТС компрессорных цехов (КЦ) система (6) дополняется уравнениями, описывающими течение газа по этим дугам расчетного графа

$$F_{3,j} = P_j^{sКЦ} - P_j^{fКЦ} - \left[ P_j^{sКЦ} + P_j^{fКЦ} \right] \left[ P_j^{sКЦ} - P_j^{fКЦ} \varepsilon_j(p_j^{sКЦ}, q_j^{sКЦ}) \right], \quad (8)$$

$$F_{4,j} = q_j^{sКЦ} - q_j^{fКЦ},$$

где  $P_j^{sКЦ}, P_j^{fКЦ}$  – вектор потенциала в узлах графа, отвечающих входам и выходам газового потока в (из) КЦ, соответственно;

$\varepsilon_j(p_j^{sКЦ}, q_j^{sКЦ})$  – вектор-функция степени сжатия;  $q_j^{sКЦ}, q_j^{fКЦ}$  – вектор значений расходов газа на входах и выходах КЦ. вектор значений давления газа в узлах графа, отвечающих входам и выходам газового потока в (из) КЦ, соответственно;  $\varepsilon_j(p_j^{sКЦ}, q_j^{sКЦ})$  – вектор-функция степени сжатия;  $q_j^{sКЦ}, q_j^{fКЦ}$  – вектор значений расходов газа на входах и выходах КЦ.

Используя в модели уравнения (8), расчет внутренней мощности центробежных нагнетателей (ЦБН) может быть выполнен (с учетом полученных очередных приближений параметров газового потока на входах и выходах КЦ) с помощью индивидуальных характеристик, зависящих от типа газоперекачивающего агрегата (ГПА), или с помощью приближенной формулы, рекомендуемой стандартом [7]

$$N_{вн} = \frac{13,34 z^s T^s q^s}{\eta_{пол}} (\varepsilon^{0,3} - 1), \quad (9)$$

где  $\eta_{пол}$  – политропный КПД; верхний индекс  $s$  относится к значениям соответствующих параметров на входе в КЦ (или ГПА).

В работе [8] был проведен вычислительный эксперимент, который показал высокую точность соотношения (9), если  $\eta_{\text{пол}}$  вычислять по нормативной характеристике. Рассчитанное таким образом значение внутренней мощности можно использовать для вычисления расхода топливного газа газотурбинных установок (ГТУ) и электроэнергии ГПА с электроприводом, применяя формулы, регламентированные стандартом [7]. Учет расхода топливного газа ГТУ в модели осуществляется в невязке  $F_{4,j}$ .

## 2. Вычислительный алгоритм

Решение системы уравнений (6), дополненной замыкающими уравнениями в виде неявных функций (7), в неизотермическом варианте выполняется с помощью двухуровневой итерационной процедуры, которая предусматривает декомпозицию на гидравлический и тепловой расчеты [9]. Гидравлический (изотермический) расчет выполняется при постоянных значениях температуры газа в узлах расчетного графа ГТС, полученных с предыдущей итерации алгоритма. Тепловой расчет выполняется при постоянных значениях давления газа в узлах графа и объемах транспортировки газа по дугам, также полученных с предыдущей итерации. Модель, реализующая такой подход, называется квазиизотермической.

Гидравлический расчет заключается в решении системы уравнений (6), дополненной соотношениями (7). Решить такую систему уравнений можно с помощью итерационной ньютоновской процедуры. Для этого составим из невязок уравнений  $F_{\bullet,j}(\mathbf{x}_j)$ ,  $F_{\text{уз},j}(\mathbf{x}_j)$  (см. обозначения в формуле (6)) вектор  $\xi_j = \xi_j(\mathbf{x}_j) = (\xi_1, \dots, \xi_{2n+m})$ , здесь  $\mathbf{x}_j = (\bar{\mathbf{p}}_j, \mathbf{q}_j^s, \mathbf{q}_j^f)$  – вектор искомых параметров потоков газа: давлений  $\bar{\mathbf{p}}_j$  в узлах расчетного графа, где оно не задано, расходов газа в начале  $\mathbf{q}_j^s$  и конце  $\mathbf{q}_j^f$  каждой дуги графа;  $j$ , как и прежде, обозначает индекс временного слоя.

Алгоритм итеративно находит значение

$$\mathbf{x}_j^* = \arg \min_{\mathbf{x}_j} \psi_j(\mathbf{x}_j), \quad (10)$$

где  $\psi_j(\mathbf{x}_j) = \sum_{i=1}^{2n+m} (\xi_{j,i}(\mathbf{x}_j))^2$ ;  $\xi_{j,i}(\mathbf{x}_j)$  – невязка  $i$ -го уравнения на  $j$ -м временном слое.

Так как размерности векторов  $\xi_j$  и  $\mathbf{x}_j$  совпадают, метод является обобщением метода Ньютона. Начав с некоторого начального приближения  $\mathbf{x}_j^{(0)}$ , алгоритм осуществляет итерации

$$\mathbf{x}_j^{(k+1)} = \mathbf{x}_j^{(k)} + \alpha^{(k)} \Delta \mathbf{x}_j^{(k)}, \quad (11)$$

где  $\alpha^{(k)}$  – шаг минимизации;  $k$  – номер итерации.

Приращение  $\Delta \mathbf{x}_j^{(k)}$  определяется из решения системы линейных уравнений

$$\mathbf{J}_j^{(k)} \Delta \mathbf{x}_j^{(k)} = \xi_j^{(k)}, \quad (12)$$

где  $\xi_j^{(k)} = \xi_j(\mathbf{x}_j^{(k)})$ ;  $\mathbf{J}_j^{(k)} = \frac{\partial \xi_j(\mathbf{x}_j^{(k)})}{\partial \mathbf{x}_j^{(k)}}$  – матрица Якоби.

Заметим, что локальная аппроксимация целевой функции, используемая в направленном поиске решения задачи (10), корректна лишь только в некоторой окрестности точки  $\mathbf{x}_j^{(k)}$ . Спуск на величину  $\Delta \mathbf{x}_j^{(k)}$  может уводить решение из этой окрестности и ухудшать качество сходимости процедуры. Для выбора шага  $\alpha^{(k)}$  алгоритм использует адаптивный линейный поиск, основанный на правиле Армихо.

В качестве критерия остановки вычислительной процедуры гидравлического расчета можно использовать условие Коши

$$\left\| \frac{\psi_j(\mathbf{x}_j^{(k+1)}) - \psi_j(\mathbf{x}_j^{(k)})}{\varepsilon_a + \varepsilon_r \psi_j(\mathbf{x}_j^{(k)})} \right\|_{\infty} < 1, \quad \left\| \frac{\mathbf{x}_j^{(k+1)} - \mathbf{x}_j^{(k)}}{\varepsilon_a + \varepsilon_r \mathbf{x}_j^{(k)}} \right\|_{\infty} < 1, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_a, \varepsilon_r$  – абсолютный и относительный пороги точности.

При выполнении условия (13) (или достижении максимального числа итераций гидравлического расчета) осуществляется переход к тепловому расчету. На этом этапе выполняется уточнение распределения температуры газа в узлах расчетного графа в соответствии с моделью (5). При этом расходы газа по дугам и давления газа в узлах расчетного графа фиксируются и принимаются равными значениям, полученным на этапе гидравлического расчета. После уточнения распределения температуры газа выполняется уточнение внутренней мощности ЦБН ГПА по формуле (9) (или другой аппроксимации внутренней мощности, например построенной с помощью ИНС), а также уточнение потребляемой мощности, расхода топливного газа ГТУ и электроэнергии ГПА с электроприводом, расхода электроэнергии аппаратов воздушного охлаждения (АВО).

Осуществляется возврат алгоритма на этап гидравлического расчета, в котором используются новые приближения рассчитанных величин. Итерации двухуровневой процедуры повторяются до сходимости температуры газа в узлах и расходов газа по дугам. В случае достижения максимального числа итераций алгоритм может либо завершить работу с информи-

рованием об отсутствии возможности найти сбалансированное решение, либо, записав величину невязки, перейти к следующему временному слою (эта опция может использоваться для корректировки управляющих воздействий с целью поиска сбалансированного режима при его отсутствии). В случае, если решение найдено, осуществляется переход к следующему временному слою  $j \rightarrow j+1$  или завершение расчетов.

Изложенные до настоящего момента положения алгоритма моделирования нестационарных режимов ГТС, вообще говоря, не новы и во многом повторяют идеи, ранее предложенные в области теории гидравлических цепей. Отличительной особенностью настоящей работы является программная реализация этого алгоритма, которая предусматривает использование идеи ДП и дифференцируемой физики.

ДП – это новая парадигма программирования, предполагающая создание автоматически дифференцируемого программного кода (в том числе структурно сложных многопараметрических компьютерных программ с ветвлениями, циклами, подпрограммами, рекурсиями и операциями над различными структурами данных) и оптимизацию параметров этих программ с помощью градиентных методов [6]. Основанная на этих идеях "дифференцируемая физика" (ДФ) – это новый подход к моделированию физических систем, процессов и явлений, предусматривающий объединение технологии ДП и глубокого машинного обучения с идеями и технологиями, получившими развитие в классических численных методах физического моделирования сложных систем. Иными словами, под ДФ понимается применение ДП для создания и использования автодифференцируемых моделей физических явлений и систем.

Рассматриваемый алгоритм использует идеи ДП и ДФ следующим образом:

1. Матрицы и векторы модели ГТС представляются тензорами, а их преобразования реализуются в виде чистых функций – функциональных элементов программного кода, обладающих детерминизмом и не изменяющих среду своего исполнения. Это позволяет выполнить их компиляцию и оптимизацию с помощью методов ускоренной линейной алгебры и компилятора XLA. Скомпилированный таким образом код может исполняться на графических процессорах (GPU), которые предназначены для эффективных тензорных вычислений. В рассмотренной имитационной модели это дает возможность привлечь аппаратное ускорение для вычисления невязок уравнений  $\xi_j$ . Эта особенность программной реализации становится важной при моделировании крупных ГТС с большим числом узлов и дуг в расчетном графе, требующих проведения векторно-матричных операций высокой размерности.

2. Скомпилированная и исполняемая на GPU программная реализация имитационной модели ис-

пользуется для ее автодифференцирования. В частности, вычисление матрицы Якоби  $J_j^{(k)}$  в (12) выполняется методом прямого или обратного автодифференцирования. Как показано в работе [6], применение автодифференцирования позволяет вычислять производные с машинной точностью за время, кратно более низкое по сравнению с традиционными методами численного дифференцирования.

3. Расчеты свойств газа и газового потока, моделирование температурного режима газопроводов, расчеты режимов работы КЦ в предложенной реализации алгоритма выполняются параллельно. Для этого соответствующие расчетные процедуры реализуются как чистые компилируемые функции, оперирующие тензорными исходными данными и возвращающие тензорные расчетные массивы. Параллельные операции также автодифференцируемы.

4. Автодифференцируемо и конечное решение, полученное в результате итерационной вычислительной ньютоновской процедуры балансирования потоков газа. Это дает возможность использовать его при решении задач планирования нестационарных режимов работы ГТС с привлечением градиентных методов.

Следует заметить, что соотношения (7) для отдельных типов объектов или даже конкретных объектов могут быть представлены с помощью параметризованных функций, именуемых прокси-моделями, суррогатными моделями или же метамоделями [10]. Обучение таких моделей можно проводить как на синтезированных выборках (т. е. заранее полученных с помощью "точной" физической модели), так и на данных о фактических режимах эксплуатации ГТС. Универсальная теорема аппроксимации гарантирует любую высокую точность искусственных нейронных сетей при аппроксимации непрерывных функций многих переменных. Это дает основания для использования ИНС с целью аппроксимации моделей объектов ГТС. Такие прокси-модели зачастую позволяют повысить скорость вычислений, а иногда и точность результатов. Примеры прокси-моделей компрессорных станций и трубопроводов, построенных с помощью ИНС, приведены в работах [11, 12].

Вместе с тем необходимо учитывать, что условия сходимости ньютоновских процедур, традиционно используемых при расчетах гидравлических цепей, накладывают на замыкающие уравнения требования непрерывности и монотонности зависимости расхода от давлений на концах дуг. Это обеспечивает существование и единственность решения задачи распределения потоков газа в ГТС [13]. Прокси-модели должны обладать этими свойствами, и их создание не сводится к построению "черного ящика", а требует внимательного участия эксперта при выборе архитектуры модели, ее обучении и оценке качества.

Таким образом, ДП и ДФ дают возможность объединить модели объектов транспорта газа, построенные на основе знаний (т. е. на основе физических соотношений между режимно-технологическими параметрами), с нейросетевыми моделями на основе данных. ДП в таких гибридных моделях ГТС является связующим звеном между этими моделями.

### 3. Автодифференцируемость решения имитационной задачи

Рассмотренная имитационная модель ГТС может быть записана в эквивалентном виде

$$\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j, \boldsymbol{\theta}_j, \Delta t), j = 0, \dots, N-1, \quad (14)$$

где  $\mathbf{F}$  – автодифференцируемая модель (компьютерная программа) имитации нестационарных режимов работы ГТС;  $\mathbf{u}_j$  – вектор управляющих воздействий;

$\boldsymbol{\theta}_j$  – параметры модели (граничные условия, параметры объектов ГТС, свойства газа и т. д.);  $j$  – индекс временного слоя;  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени.

Компоненты вектора управляющих воздействий разделим на две группы:  $\mathbf{u}_j = \|\mathbf{u}_j^c, \mathbf{u}_j^d\|^T$ , где  $\mathbf{u}_j^c$  – вектор непрерывных управляющих воздействий,  $\mathbf{u}_j^d$  – вектор дискретных управляющих воздействий.

Аналогично представим вектор  $\boldsymbol{\theta}_j = \|\boldsymbol{\theta}_j^c, \boldsymbol{\theta}_j^d\|^T$ , где  $\boldsymbol{\theta}_j^c$  – вектор непрерывных параметров модели (например, эквивалентные диаметры труб, коэффициенты гидравлической эффективности труб, другие эмпирические коэффициенты и т. д.),  $\boldsymbol{\theta}_j^d$  – вектор дискретных параметров (например, матрица инцидентий расчетного графа).

Рассмотрим произвольную функцию  $\mathbb{C}_{i,j}(\mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_j, \mathbf{u}_i^c, \dots, \mathbf{u}_j^c, \boldsymbol{\theta}_i^c, \dots, \boldsymbol{\theta}_j^c)$ ,  $\forall j = 0, \dots, N, \forall i = 0, \dots, j$ .

Автодифференцируемость компьютерной программы имитации нестационарных режимов работы ГТС позволяет с машинной точностью с минимальными вычислительными затратами рассчитывать производные

$$\partial \mathbb{C}_{i,j} / \partial \mathbf{x}_k, \partial \mathbb{C}_{i,j} / \partial \mathbf{u}_k^c, \partial \mathbb{C}_{i,j} / \partial \boldsymbol{\theta}_k^c, \quad k \in [i, j], \quad (15)$$

а также производные более высокого порядка.

Например, функция  $\mathbb{C}_{i,j}$  может суммировать затраты топливного газа по компрессорным станциям (КС) ГТС за рассматриваемый временной период

$$\mathbb{C}_{0:N} = \sum_{j=0}^N \sum_{l=1}^M Q_{\text{тг},l}(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j^c), \quad (16)$$

где  $M$  – число КС;  $Q_{\text{тг},l}$  – затраты топливного газа  $l$ -й КС.

Тогда если вектор  $\mathbf{u}_j^c$  составлен из степеней сжатия КЦ, то якобиан  $\partial \mathbb{C}_{i,j} / \partial \mathbf{u}^c$ , который эффективно вычисляется методом обратного автодифференцирования [6], позволяет оценить влияние степени сжатия любого КЦ на суммарное потребление топливного газа в системе на всем моделируемом временном интервале. Очевидно, что способность быстро вычислять подобные производные дает возможность использовать их при решении различных обратных задач, например при адаптации модели к фактическим данным, при планировании нестационарных режимов работы ГТС и в других задачах.

Автодифференцирование итеративных компьютерных программ (в которых относится и рассматриваемая программа  $\mathbf{F}$ , основанная на ньютоновской процедуре) требует рационального выбора между двумя альтернативными способами вычислений. Первый способ предусматривает применение стандартных методов автодифференцирования "плоской развертки" всех итераций алгоритма. Он оказывается эффективным, когда размерность оптимизационной задачи существенно превышает число итераций алгоритма  $K$ , но сопряжен с высокой вычислительной и пространственной сложностью (ПС). Например, ПС метода обратного дифференцирования составляет  $\mathbf{O}(KH)$ , где  $H$  – затраты памяти при обратном распространении ошибки в рамках одной итерации алгоритма. Это приводит к тому, что дифференцирование функции типа  $\mathbb{C}_{0:N}$  может приводить к высоким требованиям к памяти. Классическим приемом решения этой проблемы является использование контрольных точек, которое предусматривает выбор некоторого числа итераций  $Z \in \mathbb{N}(Z < K)$  для периодического сохранения рассчитываемых значений. Это позволяет сократить ПС до  $\mathbf{O}(ZH)$ .

Возможно использование другого подхода к автодифференцированию – неявное дифференцирование на основе теоремы о неявной функции [14]. Его применение позволяет сократить вычислительные затраты, однако требует выполнения условий теоремы.

### 4. Вычислительные эксперименты

Для исследования характеристик предлагаемой компьютерной технологии моделирования (имитации) нестационарных режимов работы крупных ГТС и автодифференцирования получаемых решений проведено три вычислительных эксперимента. Все расчеты выполнены на компьютере с центральным процес-

сором Intel Core i9-14900HX и графическим процессором NVidia GeForce RTX 4070 Max-Q/Mobile 8 Gb.

#### 4.1. Исследование масштабируемости вычислительного алгоритма

Цель первого вычислительного эксперимента состояла в оценке масштабируемости предложенного алгоритма, времени вычислений значений функции  $C_{i,j}$  и ее производных.

На рис. 1 представлена принципиальная схема рассмотренного примера условного магистрального газопровода с последовательным расположением КС, одной точкой входа и одной точкой выхода газового потока. Диаметр труб линейных участков принят равным 1420 мм. Число КС  $n$  варьировало в диапазоне 1...100.

Рассматривалась функция

$$C_{t_0, t_1} = \sum_{t=t_0}^{t_1} \left( Q_{\text{вых}}(t) - \hat{Q}_{\text{вых}}(t) \right)^2, \quad (17)$$

где  $Q_{\text{вых}}(t)$  – рассчитанный объем подачи газа на выходе из газопровода;  $\hat{Q}_{\text{вых}}(t)$  – условный контрактный график подачи газа на выходе из газопровода.

Для каждого числа  $n$  сформирована расчетная схема, на которой проведены следующие расчеты:

- нестационарного режима работы газопровода на интервале  $t_0 \leq t \leq t_1 = 24$  ч с шагом по времени  $\tau = 5$  мин с вычислением значений функции (17);
- градиента функции (17) по степеням сжатия  $\epsilon(t)$  всех КС (методом прямого автодифференцирования);
- того же градиента методом обратного автодифференцирования.

В начальный момент времени во всех расчетах имел место стационарный режим, который получен для условий стационарного течения газа. На всем интервале  $t_0 \leq t \leq t_1$  давление газа в точке выхода поддерживалось постоянным и равным 5,4 МПа. Давление газа на входе в газопровод монотонно снижалось с 7,4 до 7,0 МПа. Для повышения значимости оценок времени вычислений каждый расчет повторялся 10 раз, значение времени вычислений усреднялось.

На рис. 2 представлены графики изменения времени вычислений в зависимости от числа КС. Видно, что время обратного автодифференцирования функции (17) сопоставимо с временем моделирования нестационарного режима работы газопровода и расчета значений этой функции. В рассмотренном примере время обратного автодифференцирования функции (17) превышало время ее расчета не более чем в 1,5 раза, это отношение оставалось примерно постоянным на всем диапазоне  $n$ . При этом время прямого автодифференцирования растет экспоненциально и при больших  $n$  кратно превышает время моделирования режима. Это, с одной стороны, является существенным ограничивающим фактором для использования метода прямого автодифференцирования при решении обратных задач большой размерности. Однако, с другой стороны, вполне допускает применение этого метода для моделирования и оптимизации ГТС с числом КС 20...25 (что соответствует крупному газотранспортному обществу).

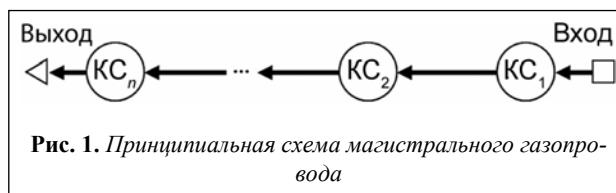


Рис. 1. Принципиальная схема магистрального газопровода

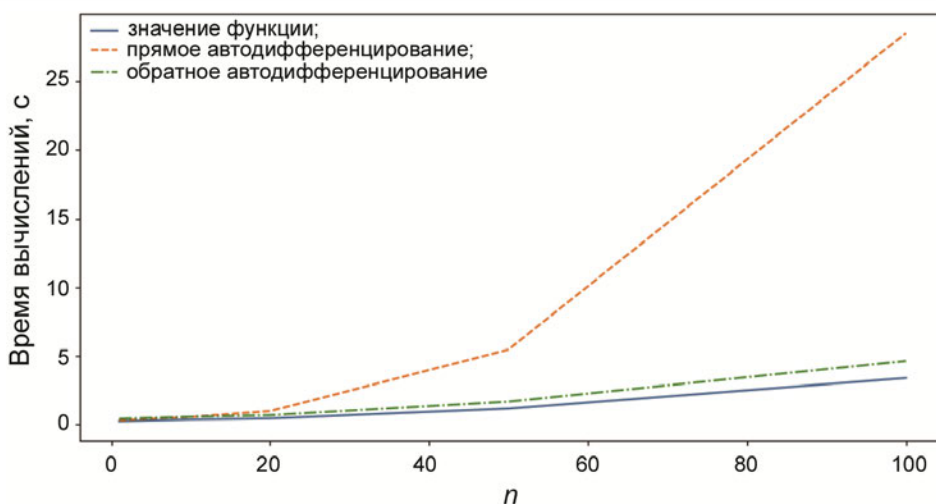


Рис. 2. Время вычислений значений функции и градиентов



Таким образом, результаты первого вычислительного эксперимента показали:

- время моделирования нестационарного режима с помощью предложенного алгоритма остается приемлемым для использования алгоритма на практике даже при большой размерности ГТС (так, при  $n = 100$  время расчета составило около 3 с);
- при рассмотрении ГТС высокой размерности и анализе интегральных стоимостных функций (например, энергетических или стоимостных затрат на транспорт газа, недопоставки газа за временной период и др.) метод обратного дифференцирования является предпочтительным методом дифференцирования таких функций;
- автодифференцирование дает многократный прирост скорости вычислений производных по сравнению с традиционными численными методами дифференцирования;
- требования к памяти, необходимой для обратного дифференцирования, существенно повышаются с ростом размерности задачи.

#### 4.2. Моделирование реальной крупной ГТС

Цель второго вычислительного эксперимента заключалась в исследовании быстродействия предложенного алгоритма при моделировании реальной крупной ГТС ЕСГ России. В качестве объекта иссле-

дования выбрана ГТС, в структуре которой присутствуют 129 многоцеховых КС, газопроводы разных диаметров и протяженностей, 9 крупных узлов редуцирования давления газа. На некоторых участках ГТС параллельно проложено до 10 ниток газопроводов диаметром 1420 мм. Рассматриваемый фрагмент ГТС ЕСГ эксплуатируется несколькими газотранспортными обществами. Принципиальная схема ГТС представлена на рис. 3.

Детализированная модель ГТС излишне сложна для анализа, в связи с чем выполнено ее агрегирование. В агрегированную модель включены основные источники газа и потребители, параллельные нитки газопроводов эквивалентированы, КЦ КС объединены.

В вычислительном эксперименте моделировались 72 ч функционирования ГТС. В начальный момент времени выбран стационарный режим, определенный расчетным путем. Во входных и выходных узлах системы задавались характерные графики граничных условий, в качестве которых выбрано давление газа. Примеры графиков представлены на рис. 4. Расчеты выполнены в едином гидравлическом режиме работы всех объектов ГТС.

На рис. 5 приведен пример результатов расчета расхода газа на входе и выходе одного из участков ГТС. Видно, что процесс характеризуется изменением объема транспортируемого газа как во времени, так и на обоих концах участка. Аналогичные графики

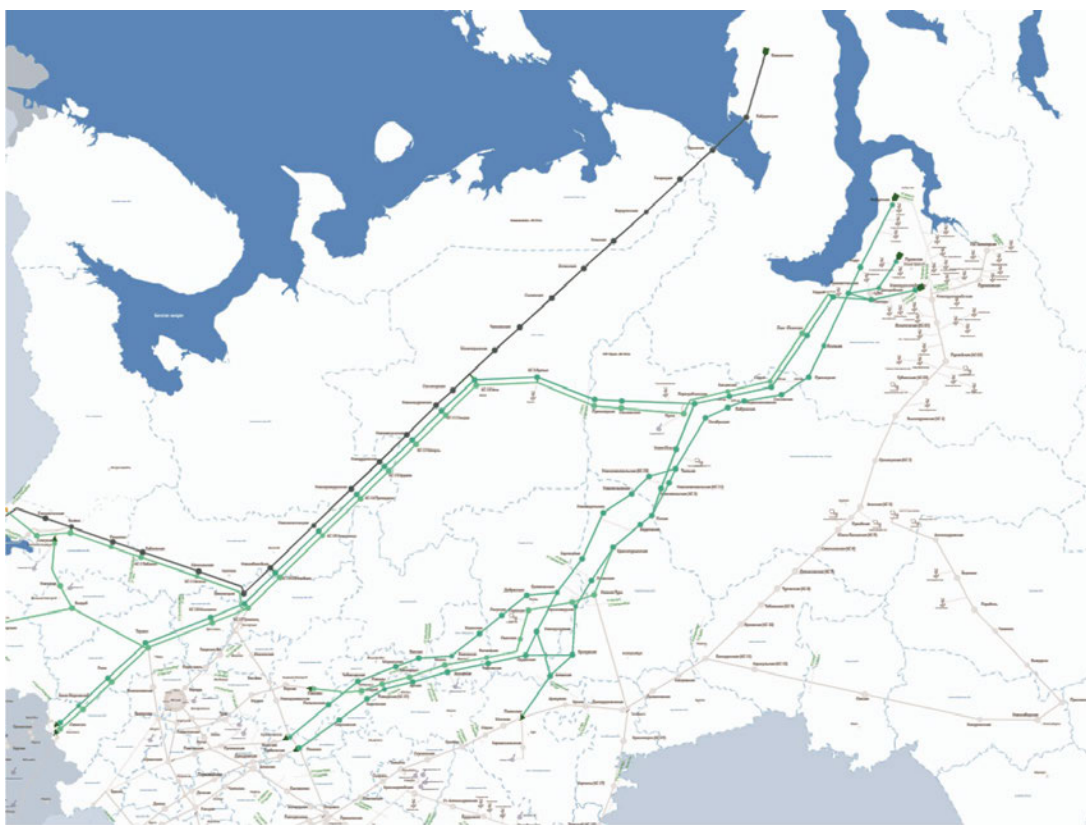


Рис. 3. Принципиальная схема рассматриваемой ГТС

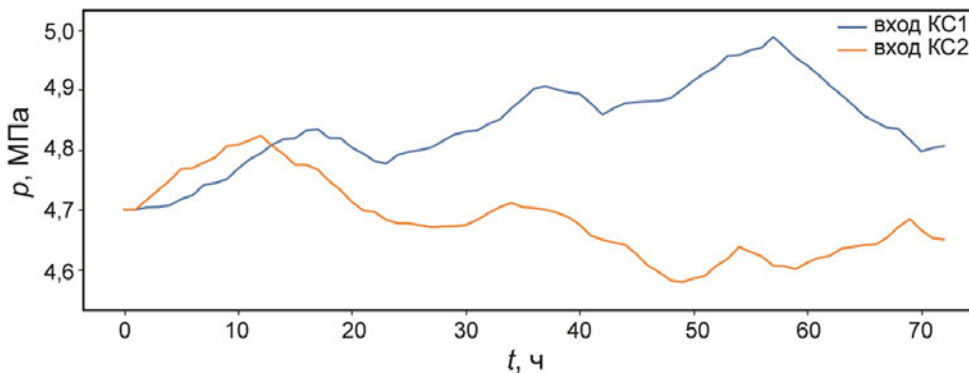


Рис. 4. Примеры граничных условий по давлению газа

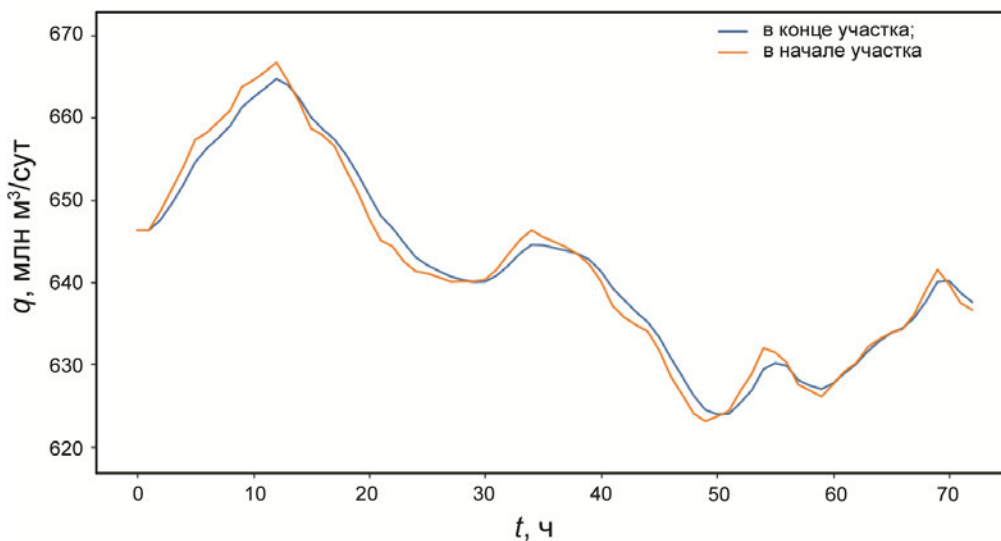


Рис. 5. Пример результатов расчета расхода газа на входе и выходе участка ГТС

получены для всех участков, входящих в структуру ГТС.

На рис. 6 представлен график изменения запаса газа во всех трубопроводах ГТС. Результаты расчета демонстрируют нестационарность процесса, протекающего в системе.

Среднее время расчета одного нестационарного режима работы ГТС в проведенном вычислительном эксперименте составило 4,1 с, что соразмерно времени, полученному в первом вычислительном эксперименте.

#### 4.3. Использование нейросетевых аппроксимаций в единой гибридной модели ГТС

Цель третьего вычислительного эксперимента заключалась в исследовании возможности комбинирования в общей нестационарной модели физических моделей трубопроводов и замыкающих уравнений, часть из которых представлена в виде неявных функций вида (7). В частности, один из кранов-регуляторов представим нейросетевой прокси-моделью и будем использовать ее в составе общей модели ГТС.

В качестве объекта исследования выбрана ГТС, рассмотренная во втором эксперименте.

Расчет режима работы крана можно выполнить на основе решения системы уравнений, состоящих из уравнения потерь давления на сопротивление и уравнения энергии [2]

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = \zeta \frac{\rho_c^2 R}{2 F_{\text{вых}}^2} \frac{T_{\text{вых}} z_{\text{вых}}}{p_{\text{вых}}} \cdot Q_{\text{вх}}^2, \quad (18)$$

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}} - D_i (p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}),$$

где  $p_{\text{вх}}, p_{\text{вых}}, T_{\text{вх}}, T_{\text{вых}}$  – значения давления и температуры газа на входе и выходе крана, соответственно;  $D_i$  – среднее значение коэффициента Джоуля–Томсона;  $z_{\text{вых}}$  – значение коэффициента сжимаемости на выходе крана;  $F_{\text{вых}}$  – площадь сечения трубы за краном;  $\rho_c$  – плотность газа при стандартных условиях;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $Q_{\text{вх}}$  – расход газа через кран.

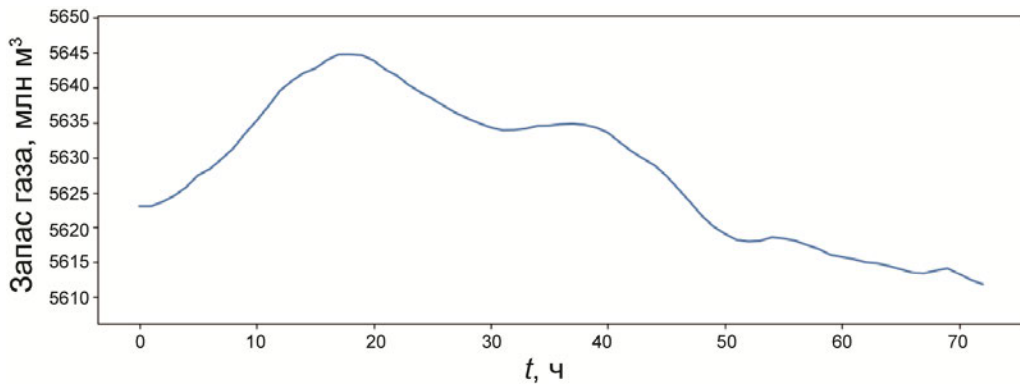


Рис. 6. Изменение запаса газа в ГТС

В систему (18) входит коэффициент  $\zeta$ , который можно вычислить либо по приближенным формулам, приведенным в работе [2], либо определить экспериментально по данным фактических режимов эксплуатации крана.

В настоящем вычислительном эксперименте с использованием модели (18) построена параметрическая зависимость вида  $Q_{\text{вх}} = f_{\theta}(p_{\text{вх}}, p_{\text{вых}}, T_{\text{вх}}, \delta)$ , где  $\delta$  – степень открытия крана-регулятора. Функция  $f_{\theta}: \mathbb{R}^{d_x} \rightarrow \mathbb{R}^{d_y}$  с параметрами  $\theta \in \Theta$  выбрана из семейства искусственных нейронных сетей прямого распространения с  $L$  последовательными нелинейными операциями  $g^{(l)}: \mathbb{R}^{d_l} \rightarrow \mathbb{R}^{d_{l+1}}$  (где  $d_1 = d_x$ ,  $d_L = d_y$ ) над латентными представлениями  $z^{(l)}$

$$f_{\theta}(x) = g_{\sigma_L, \theta_L}^{(L)} \circ g_{\sigma_{L-1}, \theta_{L-1}}^{(L-1)} \circ \dots \circ g_{\sigma_1, \theta_1}^{(1)}(x). \quad (19)$$

Каждый оператор  $g^{(l)}$  представляет собой комбинацию нелинейного и аффинного преобразований

$$g_{\sigma_i, \theta_i}^{(l)}(z^{(l)}) = \sigma_i(W_i z^{(l)} + b_i), \quad (20)$$

где  $\theta_i = \{W_i, b_i\}$  – веса и смещения на слое  $l$ ;  $\sigma_i$  – нелинейная функция активации на слое  $l$ ;  $\theta = \{\theta_L, \dots, \theta_1\}$  – множество параметров нейронной сети.

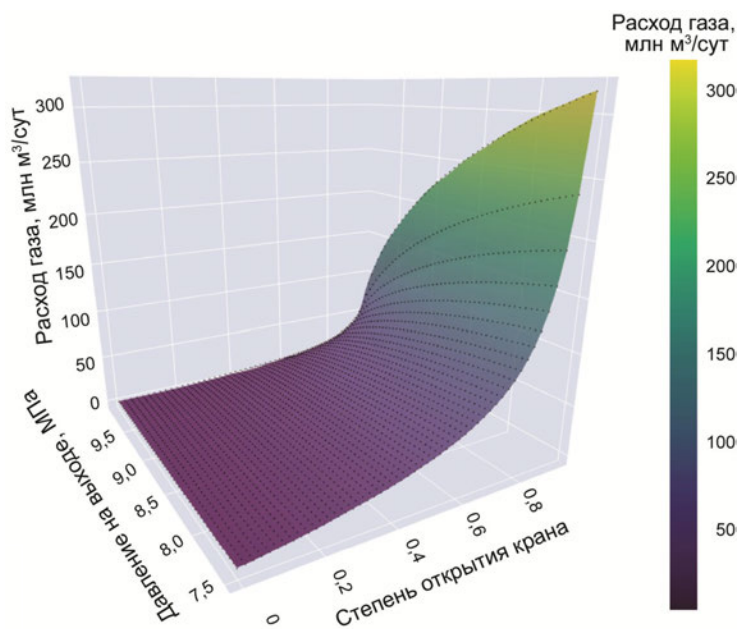
Для обучения нейронной сети, аппроксимирующей режим работы крана-регулятора, подготовлена выборка обучающих примеров  $\{x_i, y_i\}$ , где  $x_i = (p_{\text{вх}}, p_{\text{вых}}, T_{\text{вх}}, \delta)$ ,  $y_i = Q_{\text{вх}, i}$ . Размер выборки составил около 1 млн обучающих примеров. Значения признаков, т. е. входных параметров ИНС  $x_i$ , варьировались в технологически возможном диапазоне режимов работы крана-регулятора. Обход признакового пространства и подготовка исходных данных выполнены с помощью метода латинского гиперку-

ба [10]. По результатам расчетных экспериментов число скрытых слоев ИНС принято равным трем, функция активации – гиперболический тангенс, число нейронов в каждом слое – 128.

Для обеспечения стабильности обучения выполнена нормализация входных данных ИНС. Обучение ИНС выполнено методом обратного распространения ошибки с использованием программного фреймворка JAX и метода оптимизации Adam. Минимизировалось среднеквадратичное отклонение (метрика  $MSE$ ) расчетных значений от обучающих примеров. Так как обученная ИНС предполагается для использования в качестве замыкающего соотношения при решении задачи потокораспределения в ГТС, требование монотонности зависимости расхода от входных значений может быть обеспечено за счет использования специальной архитектуры ИНС [15].

На рис. 7 приведена поверхность, отражающая зависимость между  $Q_{\text{вх}}$  и  $p_{\text{вых}}$ ,  $\delta$  (при фиксированных  $p_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}$ ). Поверхность построена с помощью обученной ИНС, а точками обозначены расчетные значения, полученные по модели (18). Визуально видно, что  $y_j \approx f_{\theta}(x_j)$ . Значения используемой метрики качества  $MSE$  подтверждают это наблюдение для всего рассмотренного пространства данных. Это делает возможным применение функции  $f_{\theta}$  в качестве замыкающего соотношения при расчете потокораспределения в ГТС.

Представленная ИНС, реализованная в парадигме ДП, естественным образом встраивается в общую архитектуру компьютерной реализации нестационарной модели ГТС. Инференс, т. е. расчет прогнозных значений при заданных входных данных ИНС, использует аппаратное ускорение вычислений на графических процессорах. Функция  $f_{\theta}$  непрерывна в рассматриваемой области входных параметров, вычисление производных выполняется с помощью эффективных методов автодифференцирования. Указанные характеристики ИНС обеспечили возможность ее внедрения в нестационарную модель рассматриваемой ГТС.



**Рис. 7.** Нейросетевая аппроксимация режимно-технологических характеристик работы крана-регулятора

В вычислительном эксперименте моделировались 72 ч функционирования ГТС. Построенная гибридная модель, сочетающая физические модели с нейросетевой моделью крана-регулятора, в целом является автодифференцируемой. Это позволило применить к ней расчетные процедуры балансирования потоков газа, рассмотренные в настоящей статье. Среднее время расчета одного нестационарного режима работы ГТС в проведенном вычислительном эксперименте, так же как и в предыдущем эксперименте, составило около 4 с. Это подтвердило отсутствие деградации скорости вычислений при комбинировании в модели разных подходов к описанию отдельных фрагментов системы.

Проведенный эксперимент позволил убедиться в возможности объединения физических и нейросетевых моделей в единую модель. Такая техника может применяться для интеграции в общую модель иных прокси-зависимостей, построенных для других типов объектов. Например, ИНС могут использоваться для укрупненного моделирования КЦ: отражать зависимость между расходом газа, потребляемой мощностью и режимно-технологическими параметрами газового потока на входе и выходе цеха (пример нейросетевого моделирования КС приведен в [12]). Кроме того, отдельные подсистемы ГТС (например, некоторые участки ГТС) могут быть представлены укрупненной прокси-моделью (описание таких моделей приведено в работе [16]), не препятствуя более детальному моделированию других фрагментов с помощью традиционных моделей. Например, предложенная архитектура гибридной модели позволяет включить в нее детальные нестационарные модели с распределенными параметрами для некоторых (в частности, подводных) трубопроводов. Такие модели

могут быть представлены с помощью нейронных операторов. Пример использования нейронного оператора Фурье для описания нестационарных режимов работы газопроводов с распределенными параметрами приведен в [11].

В целом, рациональная комбинация моделей может подбираться в зависимости от вида решаемой задачи, требований к точности результатов моделирования, наличия исходных данных. Комбинированная модель, построенная в парадигме ДП, сохраняет свойства автодифференцируемости и аппаратного ускорения вычислений на графических процессорах. Это, в свою очередь, открывает новые возможности для решения задач оптимизации режимов работы крупных ГТС.

## Заключение

Предложенная автодифференцируемая имитационная модель, адаптированная для вычислений на графических процессорах, может составить основу для прикладного ПВК-моделирования и оптимизации нестационарных режимов работы крупных ГТС. Предложенные подходы целесообразно использовать при разработке оптимизационных алгоритмов, основанных как на градиентных, так и неградиентных методах оптимизации. Градиентные методы могут опираться на свойство автодифференцируемости модели. Неградиентные методы (например, эволюционные расчетные процедуры типа генетических алгоритмов), чувствительные к скорости имитационных вычислений, могут использовать преимущества аппаратного ускорения предложенной реализации модели и возможности ее параллелизации как на одном устройстве GPU, так и в вычислительном кластере. Возможно, для достижения наилучшего качества оп-

тимизационного алгоритма (скорости вычислений, технологичности результатов) следует развивать гибридные алгоритмы. Они могут как опираться на предложенные в работе методы гибридизации самой имитационной модели, так и сочетать эффективные алгоритмы дискретной (прежде всего, для выбора схемно-структурных решений) и непрерывной оптимизации. Создание таких оптимизационных алгоритмов и основанного на них ПВК нового поколения является предметом дальнейших исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Моделирование транспорта природного газа в режиме онлайн. Программно-вычислительный комплекс "Волна" / М.Г. Анучин, М.Г. Анучин, А.А. Анфалов [и др.] // Нефть. Газ. Новации. – 2017. – № 5. – С. 27–35.
2. Сарданашивили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). – М.: Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 577 с.
3. Сухарев М.Г., Самойлов Р.В. Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. – М.: Издат. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2016. – 399 с.
4. Сухарев М.Г., Самойлов Р.В. Модели с сосредоточенными параметрами для нестационарного течения газа в магистральных газопроводах // Науч.-техн. сб. Вести газовой науки. – 2022. – № 2(51). – С. 4–15.
5. Сухарев М.Г., Попов Р.В. Новая методика моделирования нестационарных течений газа в системах газоснабжения // Изв. РАН. Энергетика. – 2015. – № 2. – С. 150–159.
6. Белинский А.В. Дифференцируемая физика – основа цифровых двойников в нефтегазовом комплексе // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2024. – № 12(617). – С. 38–50.
7. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. – Введ. 2006–07–03. – М.: ИРЦ Газпром, 2006. – 196 с.
8. Энергоэффективные режимы газотранспортных систем и принципы их обеспечения / А.М. Карасевич, М.Г. Сухарев, А.В. Белинский [и др.] // Газовая пром-сть. – 2012. – № 1(672). – С. 30–34.
9. Корельштейн Л.Б., Пашенкова Е.С. Опыт использования методов глобального градиента и декомпозиции при расчете установившегося неизотермического течения жидкостей и газов в трубопроводах // Трубопроводные системы энергетики. Мат. моделирование и оптимизация. – Новосибирск: Наука, 2010. – С. 103–114.
10. Разработка и апробация методических подходов и цифровых технологий нейросетевого прокси-моделирования установившегося двухфазного течения многокомпонентной смеси в системах сбора и промышленной подготовки газа (на примере Чаяндинского НГКМ) / А.В. Белинский, В.А. Маришкин, В.В. Самсонова, П.В. Пя-

тибратов // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2024. – № 4(609). – С. 44–59.

11. О новом методе цифрового моделирования нестационарных режимов течения газа в магистральных газопроводах с применением нейронных операторов / А.В. Белинский, Д.В. Горлов, И.А. Пяташев, А.Е. Титов // Газовая пром-сть. – 2024. – № 5(865). – С. 54–66.
12. О возможности использования технологии машинного обучения для моделирования компрессорной станции магистрального газопровода / А.В. Олейников, В.А. Шевченко, А.В. Белинский, А.В. Малетин // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2024. – № 6(611). – С. 35–45.
13. Корельштейн Л.Б. Существование, единственность и монотонность решения задачи потокораспределения в гидравлических цепях с зависящими от давления замыкающими соотношениями // Мат. модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: тр. XVI Всерос. науч. семинара, Иркутск, 26 июня – 2 июля 2018 г. – Иркутск: Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2018. – С. 55–83.
14. Blondel M., Roulet V. The Elements of Differentiable Programming. – 2024. – 437 p. – DOI: 10.48550/arXiv.2403.14606
15. Runje D., Shankaranarayana S.M. Constrained Monotonic Neural Networks. – 2023. – 16 p. – DOI: 10.48550/arXiv.2205.11775
16. Об обоснованности применения, современном состоянии и некоторых перспективах развития нейросетевых моделей Единой системы газоснабжения России / Н.А. Кисленко, А.В. Белинский, А.С. Казак, О.И. Белинская // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 5(586). – С. 6–17. – DOI: 10.33285/2782-604X-2022-5(586)-6-17

## SPISOK ISTOCHNIKOV

1. Modelirovanie transporta prirodnogo gaza v rezhime onlayn. Programmno-vychislitel'nyy kompleks "Volna" / M.G. Anuchin, M.G. Anuchin, A.A. Anfalov [i dr.] // Neft'. Gaz. Novatsii. – 2017. – № 5. – S. 27–35.
2. Sardanashvili S.A. Raschetnye metody i algoritmy (truboprovodnyy transport gaza). – M.: Izd-vo "Neft' i gaz" RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2005. – 577 s.
3. Sukharev M.G., Samoylov R.V. Analiz i upravlenie statsionarnymi i nestatsionarnymi rezhimami transporta gaza. – M.: Izdat. tsentr RGU nefti i gaza (NIU) im. I.M. Gubkina, 2016. – 399 s.
4. Sukharev M.G., Samoylov R.V. Modeli s sosredotochennymi parametrami dlya nestatsionarnogo techeniya gaza v magistral'nykh gazoprovodakh // Nauch.-tekhn. sb. Vesti gazovoy nauki. – 2022. – № 2(51). – S. 4–15.
5. Sukharev M.G., Popov R.V. Novaya metodika modelirovaniya nestatsionarnykh techeniy gaza v sistemakh gazosnabzheniya



// Izv. RAN. Energetika. – 2015. – № 2. – S. 150–159.

6. Belinskiy A.V. Differentsiruemaya fizika – osnova tsifrovyykh dvoynikov v neftegazovom komplekse // Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK. – 2024. – № 12(617). – S. 38–50.

7. STO Gazprom 2-3.5-051-2006. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya magistral'nykh gazoprovodov. – Vved. 2006–07–03. – M.: IRTs Gazprom, 2006. – 196 s.

8. Energoeffektivnye rezhimy gazotransportnykh sistem i printsipy ikh obespecheniya / A.M. Karasevich, M.G. Sukharev, A.V. Belinskiy [i dr.] // Gazovaya prom-st'. – 2012. – № 1(672). – S. 30–34.

9. Korel'shteyn L.B., Pashenkova E.S. Opyt ispol'zovaniya metodov global'nogo gradienta i dekompozitsii pri raschete ustanovivshegosya neizotermicheskogo techeniya zhidkostey i gazov v truboprovodakh // Truboprovodnye sistemy energetiki. Mat. modelirovanie i optimizatsiya. – Novosibirsk: Nauka, 2010. – S. 103–114.

10. Razrabotka i aprobatsiya metodicheskikh podkhodov i tsifrovyykh tekhnologiy neyrosetevogo proksi-modelirovaniya ustanovivshegosya dvukhfaznogo techeniya mnogokomponentnoy smesi v sistemakh sbora i promyslovoy podgotovki gaza (na primere Chayandinskogo NGKM) / A.V. Belinskiy, V.A. Marishkin, V.V. Samsonova, P.V. Pyatibratov // Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK. – 2024. – № 4(609). – S. 44–59.

11. O novom metode tsifrovogo modelirovaniya nestatsionarnykh rezhimov techeniya gaza v magistral'nykh gazoprovodakh s primeneniem neyronnykh operatorov

/ A.V. Belinskiy, D.V. Gorlov, I.A. Pyatyshev, A.E. Titov

// Gazovaya prom-st'. – 2024. – № 5(865). – S. 54–66.

12. O vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnologii mashinnogo obucheniya dlya modelirovaniya kompressornoy stantsii magistral'nogo gazoprovoda / A.V. Oleynikov, V.A. Shevchenko, A.V. Belinskiy, A.V. Maletin // Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK. – 2024. – № 6(611). – S. 35–45.

13. Korel'shteyn L.B. Sushchestvovanie, edinstvennost' i monotonnost' resheniya zadachi potokoraspredeleniya v gidravlicheskikh tsepyakh s zavislyashchimi ot davleniya zamykayushchimi sootnosheniyami // Mat. modeli i metody analiza i optimal'nogo sinteza razvivayushchikhsya truboprovodnykh i gidravlicheskikh sistem: tr. XVI Vseros. nauch. seminar, Irkutsk, 26 iyunya – 2 iyulya 2018 g. – Irkutsk: In-t sistem energetiki im. L.A. Melent'eva SO RAN, 2018. – S. 55–83.

14. Blondel M., Roulet V. The Elements of Differentiable Programming. – 2024. – 437 p. – DOI: 10.48550/arXiv.2403.14606

15. Runje D., Shankaranarayana S.M. Constrained Monotonic Neural Networks. – 2023. – 16 p. – DOI: 10.48550/arXiv.2205.11775

16. Ob obosnovannosti primeneniya, sovremennoy sostoyanii i nekotorykh perspektivakh razvitiya neyrosetevykh modeley Edinoy sistemy gazosnabzheniya Rossii / N.A. Kislenko, A.V. Belinskiy, A.S. Kazak, O.I. Belinskaya // Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK. – 2022. – № 5(586). – S. 6–17. – DOI: 10.33285/2782-604X-2022-5(586)-6-17

Информация об авторе:

**Александр Вячеславович Белинский**, канд. техн. наук, зам. генерального директора по науке

Information about the author:

**Alexander V. Belinsky**, PhD (engineering), Deputy General Director for Science

Статья поступила в редакцию 20.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.10.2024 г.; принята к публикации 20.01.2025 г.

neftegaz.gubkin.ru #НЕФЕГАЗ\_25

21-25 АПРЕЛЯ

22-25 АПРЕЛЯ

ОИЛГАС\_25

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ НЕФТЬ И ГАЗ 2025

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ НЕФТЬ И ГАЗ 2025

Более 200 организаций

Более 550 научных докладов

Более 1000 участников