

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ПОТРЕБЛЕНИЯ

С.Г. Марченко (ООО «Газпром трансгаз Москва»)

Рассматриваются задачи моделирования и управления газотранспортной системой (ГТС) в условиях нестационарных режимов. Решается задача формализованного описания процессов функционирования компонентов ГТС, которые дают основу построения методики оптимизации управления в условиях нестационарности газопотребления. Формируется система критериев оптимизации функционирования ГТС. Решаются задачи максимизации потоков в сети. Разработаны методы расчета потоковых схем для динамического режима управления ГТС.

Ключевые слова: управление, газотранспортная система, нестационарный режим, план поставок.

### Введение

Для газораспределительной системы промышленного кластера самым «жестким» ограничением является безусловное выполнение плановых поставок газа потребителям с устранением выявленных отклонений в процессе оперативного диспетчерского управления (рис. 1).

При этом сложность управления газотранспортной системой (ГТС) на этом горизонте планирования обоснована:

- инерционностью системы;
- ограниченностью имеющегося запаса в трубопроводах;
- ограничениями на максимальное и минимальное давление;
- ограничениями на максимальную скорость изменения давления;
- ограничениями на максимальную пропускную способность участка труб (УТ);
- и другими факторами.

Отметим, что описанию нестационарных режимов функционирования ГТС, когда в течение суток могут меняться заявки потребителей, в настоящее время уделяется недостаточно внимания. Данная статья посвящена моделированию и оптимизации управления ГТС в нестационарных режимах потребления газа. Новизна исследований заключается в формальном представлении ГТС в виде двухуровневой схемы вложенных моделей, которая приводится

к формализму гибридного автомата. При этом взаимная параметризация моделей верхнего и нижнего уровня формирует уравнения баланса, а динамика функционирования представлена имитационной схемой. Кроме того, предложена модель управления нестационарными режимами в виде последовательности стационарных потоковых схем, расчет которых выполняется на основе критерия минимизации их рассогласования.

### Модели и методы

Аналитические и статистические методы исследования [1-3] показали, что переходные процессы распространяются по длине газопровода весьма медленно. Так, для газопровода длиной 700 км головная волна изменения достигает значения, равного 0,85 от единичного скачка, через 7...10 ч, а весь газопровод перейдет на новый стационарный режим спустя 3 сут. Такие особенности технологических процессов добычи и транспорта газа накладывают серьезные ограничения на системы управления этим процессом, придавая каждой АСУТП как общие для конкретного процесса, так и специфические, присущие только ей, черты.

Уже в течение суток [4, 5] запрашиваемые объемы газа от крупных потребителей могут циклически повторяться, в том числе из-за корректировки плановых показателей. Для планирования режима ГТС и составления плана переключений в настоящее время активно используются нестационарные математические модели ГТС в режиме вариантных расчетов, где в качестве начального состояния берется текущий on-line режим. Это определяется тем, что существует значительная суточная и дневная неравномерность потребления газа, а имеющиеся ресурсы (запас газа в трубопроводе, резервы мощности ГПА и поступление газа) ограничены.

Математические модели нестационарных неизотермических процессов течения в трубах хорошо известны, и имитация режимов с их помощью для несложных по конфигурации систем технически вполне осуществима [6, 7].

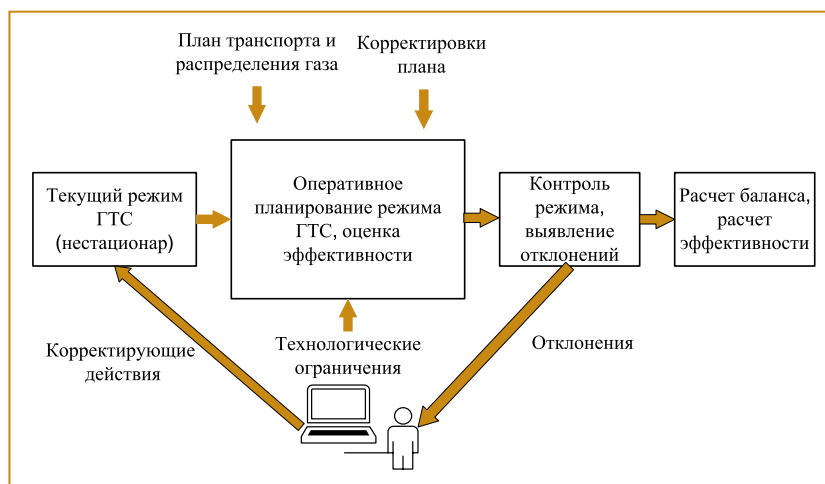


Рис. 1. Процесс оперативного диспетчерского управления ГТС

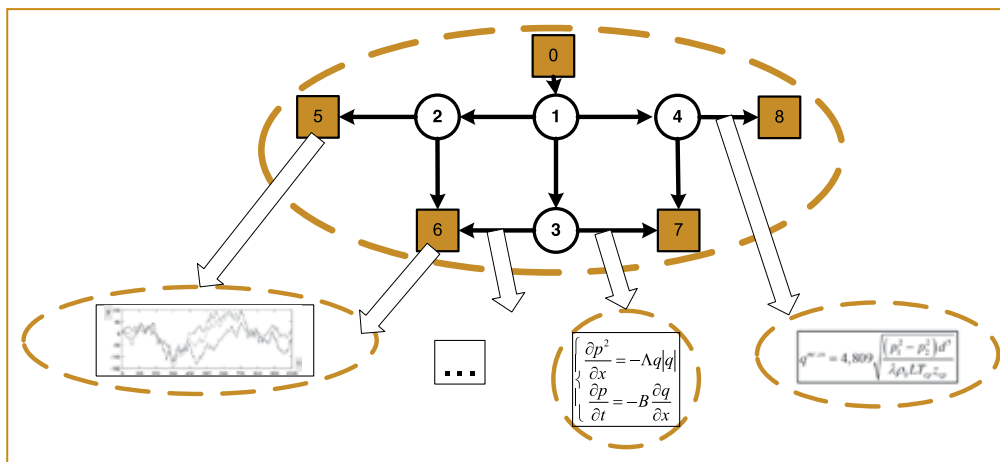


Рис. 2. Двухуровневая гибридная модель ГТС

Принципиальные трудности появятся при попытке создать и реализовать метод определения оптимальных нестационарных режимов для сложных крупномасштабных систем [8].

**Гибридный подход к построению аналитико-имитационной модели функционирования ГТС**

При разработке модели функционирования ГТС базовым принципом полагается учет текущего состояния всех участков труб (УТ), которое определяется массой газа, приходящейся на УТ, и давлением в начале и конце УТ. При этом основной задачей считается балансирование этой массы для поставок потребителям заказанного объема газа.

Естественно, что при формировании общей модели поставок необходимо сформировать потоковые схемы для обеспечения заданных объемов поставок, которые на каждом временном интервале постоянства потребления могут быть рассчитаны на основе стандартных методов вычисления стационарных характеристик. При этом следует учитывать массу газа, которая присутствует в УТ на данный момент, поскольку она существенным образом влияет на давление, которое в свою очередь определяет пропускную способность.

Такая постановка задачи моделирования ГТС приводит к представлению общей структуры модели в виде вложенной двухуровневой схемы (рис. 2). На рисунке кружками обозначены компрессорные станции с газораспределительными узлами (2, 3, 4, 5), а квадратами – поставщик (1) и потребители (6, 7, 8, 9).

Верхний уровень представляет собой взвешенный орграф ГТС. В модели топологии ГТС вершины представляют такие объекты ГТС, как скважины (СК), подземные хранилища газа (ПХГ), компрессорные станции (КС), газораспределительные станции (ГРС), магистральный газопровод (МГ), участки труб (УТ). На этом уровне выполняется описание потоковых схем для стационарных режимов обеспечения потребителей, а также описание управлений

однородными либо неоднородными в зависимости от методов расчета.

Предлагается выполнить объединение этих двух процессов в схему вложенных описаний, когда расчет модели верхнего уровня задает параметры течения газа в моделях нижнего уровня. В свою очередь расчет характеристик газовых потоков реализует параметризацию модели верхнего уровня, поскольку перерасчет может изменить пропускную способность каждого УТ.

В качестве реализации этого совмещенного дискретно-непрерывного процесса, то есть дискретных управляющих воздействий модели верхнего уровня вместе с реализацией непрерывных динамических моделей изменения состояния всех УТ, предлагается использовать модели гибридного автомата.

В программно-моделирующем комплексе модели нижнего уровня могут представляться в нескольких формах.

1. В виде системы дифференциальных уравнений, в которых предполагается непрерывность функций в заданной окрестности. При этом должны быть формально описаны используемые численные методы решения дифференциальных уравнений.

2. Система алгебраических уравнений в предположениях, что система является правильно определенной (равенство числа переменных и числа уравнений).

3. Непрерывная система задана набором аналитических выражений, которые соответствуют решению систем алгебраических или дифференциальных уравнений.

**Параметризация модели функционирования ГТС в нестационарном режиме**

Параметры модели функционирования ГТС обязательно должны задавать топологию сети в виде орграфа, а также модели каждого поставщика и каждого потребителя. Орграф ГТС -  $Gr=(G,E)$ , где  $G=\{G_i\}$ ,  $i=1,\dots,N$  - множество вершин,  $E=\{E_{ij}\}$ ,  $i, j=1,\dots,N$  - множество дуг (рис. 3). В привязке к рисунку  $G=\{G_i\}$ ,  $i=1,\dots,9$  и  $E=\{E_{ij}\}$ ,  $i, j=1,\dots,9$ .

в экстремальных ситуациях. Нижний уровень представляет собой совокупность моделей физических процессов течения газа в трубе, которые в основном описываются системой дифференциальных уравнений. Результатом расчета являются функции давления на всем участке трубы, скорость, коммерческий расход газа и другие характеристики. Эти модели могут быть

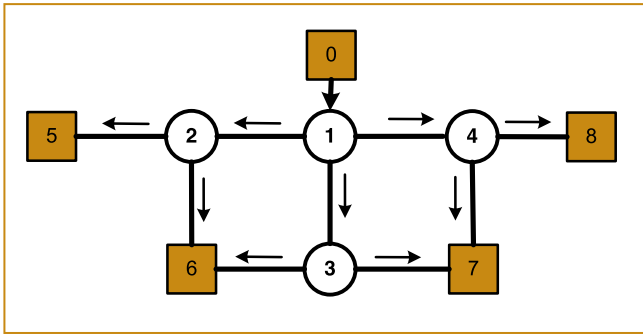


Рис. 3. Топология ГТС

Множество вершин  $G$  разбивается на:

- $G^H$  – вершины-истоки поставщиков не имеют входящих дуг (на рисунке  $G^H = \{G^1\}$ );
- $G^C$  – вершины-стоки потребителей не имеют исходящих дуг (на рисунке  $G^C = \{G^6, G^7, G^8, G^9\}$ );
- $G^K$  – транзитные вершины представляют компрессорные станции с газораспределительными узлами (на рисунке  $G^K = \{G^2, G^3, G^4, G^5\}$ ).

Исходя их общей постановки задачи моделирования и оптимизации процесса транспорта газа, будем считать, что имеются четыре типа объектов, а именно:

- поставщики (истоки – вершины графа –  $I_1, I_2, \dots, I_n$ ), которые задают процессы закачки газа  $Min_i(t)$  в единицу времени (объемы закачки будут измеряться в единицах массы);
- участки труб (дуги графа), для которых определяется объем  $V_{ij}$ , что в свою очередь при ограничении давлений (это константы  $\rho_{min}$  и  $\rho_{max}$ ) имеем минимальную  $M_{ij}^{min}$  и максимальную  $M_{ij}^{max}$  массу газа в трубе;
- компрессорные станции (вершины графа -  $KC_1, KC_2, \dots, KC_m$ ), которые определяют механизмы управления в соответствии с выбранной потоковой схемой;
- потребители (стоки – вершины графа -  $P_1, P_2, \dots, P_k$ ), для которых формируются прогнозы газопотребления на долгосрочный и краткосрочный период  $Mout_i(t)$ .

Параметры дуг сводятся в матрицы  $L = \|l_{ij}\|$ , где  $l_{ij}$  – длины труб, и  $D = \|d_{ij}\|$ , где  $d_{ij}$  – диаметры труб. Для преобразования матричных представлений параметров сети будем использовать произведение Адамара, используя которое объемы труб можно представить в виде  $V = L \odot D$ ,  $V = \|v_{ij}\|$ , где  $v_{ij}$  – объемы труб.

В качестве состояния модели ГТС на каждый момент времени  $t$  будем использовать комбинацию всех значений массы  $M_{ij}(t)$ ,  $i, j = 1, \dots, N$  (для всех УТ орграфа сети), то есть остаточную массу газа во всех трубах при соблюдении ограничений  $M_{ij}^{min} \leq M_{ij}(t) \leq M_{ij}^{max}$ .

Шаг дискретизации моделей поставщика и потребителя составляет 1 час, то есть в течение 1 часа

график плановых поставок и плановых потреблений не меняется. После выбора шага дискретизации модели функционирования объемы  $Mout_i(t)$  и  $Min_i(t)$  пересчитываются. Для изменения состояния модели выбирается шаг дискретизации  $\Delta t = 0,01 \dots 0,10$  часа, и формируются ограничения по выборке и закачке газа.

**Адаптация физических моделей для расчета ограничений по закачке и отбору газа**

Модели физических процессов в УТ в основном приводятся к системе дифференциальных уравнений, а ее решение определяет поведение основных параметров во времени и пространстве, то есть зависимости плотности, скорости, давления и температуры от времени  $t$  и положения  $x$ . В общую структуру программно-моделирующего комплекса должны быть включены известные газодинамические модели [9], а также модели интегрированных характеристик стационарных и нестационарных физических процессов течения газа в УТ. Для большинства задач моделирования процессов перемещения газа можно рассматривать лишь изотермические процессы, где температура равна температуре грунта. Эти модели необходимы для формирования интегрированных компонентов моделей нижнего уровня с целью параметризации модели верхнего уровня, то есть потоковой модели ГТС, которая направлена на решение задач оптимизации управления.

Для функционирования имитационной схемы физические модели преобразуются в интерфейсные модели ограничений закачки/отбора газа, где  $\Delta M_{ij}^+(t)$  – закачка в трубу  $E_{ij}$  в момент  $t$  за один такт, а  $\Delta M_{ij}^-(t)$  – отбор из трубы  $E_{ij}$  в момент  $t$  за один такт.

Для стационарного режима  $i, j, t$ :  $\Delta M_{ij}^+(t) = \Delta M_{ij}^-(t)$ . Для нестационарного режима это равенство может не выполняться. После выбора дискретизации времени моделирования для каждого УТ вычисляются ограничения по закачке  $\Delta M_{ij}^+(M_{ij}(t))$  и отбору  $\Delta M_{ij}^-(M_{ij}(t))$ , связанные с общими ограничениями по скорости газа при текущем давлении в трубе, пропорциональном  $M_{ij}(t)$ . При этом закачать можно не больше  $\Delta M_{ij}^{+max}(M_{ij})$ , а выбрать не больше  $\Delta M_{ij}^{-max}(M_{ij})$ , что определяется ограничением на скорость нагнетания и отбора.

Общая рекуррентная схема модели функционирования подсети ГТС в стационарном режиме представляет собой реализацию некоторой выбранной потоковой схемы. Для реализации модельного алгоритма каждый сток (модель потребителя) будет пытаться забрать из соответствующих УТ необходимый поток. Однако физические ограничения могут сократить эти потоки. Алгоритм преобразования состояния модели функционирования ГТС предполагает пересчет ограничений закачки/отбора. Затем с учетом этих ограничений выполняется расчет масс закачки и отбора газа для реализации текущей потоковой схемы. Стратегия управления определяется

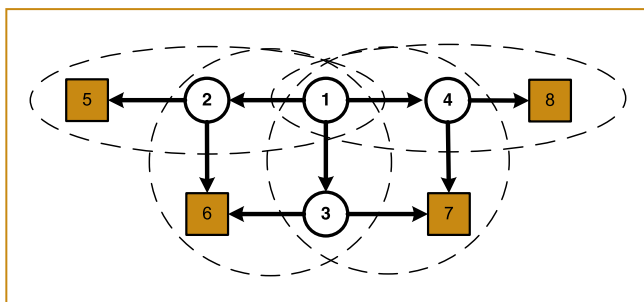


Рис. 4. Оценка общих запасов и максимальных потоков

динамикой формирования матриц потоков по всем УТ. Алгоритм изменения состояний предполагает пересчет масс за два полутакта:

- первый полутакт – формирование матрицы добавок масс -  $\Delta M^+(t)$  с учетом текущих ограничений на скорость закачки и текущей массы;
- второй полутакт – формирование матрицы выборки масс -  $\Delta M^-(t)$  с учетом текущих ограничений на скорость выборки и текущей массы.

В итоге новая матрица состояния  $M(t+T) = M(t) + \Delta M^+(t) - \Delta M^-(t)$ .

В качестве основного критерия используется аддитивная свертка недопоставок газа по всем потребителям и по всему горизонту планирования. Однако в рамках общей задачи возможна параметризация модели функционирования различными стратегиями управления. К ним относится стратегия поддержания максимального запаса газа в системе, стратегия минимизация энергозатрат при отсутствии дефицита, минимизация дефицита газа и др. При реализации имитационных алгоритмов совокупность используемых критериев определяется лицом, принимающим решение, в зависимости от конкретной ситуации. Сами критерии не влияют на механизмы продвижения модельного времени. А на основе этих критериев формируется алгоритм управления потоковыми схемами в динамическом режиме.

При управлении нестационарными режимами потребления с возможным дисбалансом поставок и потребления важными показателями являются суммарный запас газа во всех УТ ГТС и выделенный запас для каждого потребителя. Этот показатель формируется из матрицы объемов  $V = \|v_{ij}\|$ , где  $v_{ij}$  – объемы труб.

Возможный запас для каждого потребителя  $G_i^c$  определяется на основе формирования подсети снабжения данного потребителя (рис. 4).

Формирование подсети  $E'$  выполняется на основе введения отношения достижимости ( $\rightarrow$ ) вершин графа. Для всех узлов подсети должно выполняться условие достижимости, то есть  $\forall j, G_j \rightarrow G_i$ . Поиск узлов подсети выполняется на основе перехода к обратному орграфу  $\bar{G}_r \in (G_i, G_j) \leftarrow G_r \in (G_i, G_j)$ . В обратном графе для каждого потребителя определяется множество вершин  $G'$ , которые достижимы из вершины, соответствующей поставщику, то есть

$G': G_i \rightarrow G_j$ . Именно эти вершины  $G'$  представляют собой полное множество вершин подсети, обеспечивающей снабжение поставщика. Затем в подсеть включаются все дуги, начало и конец которых соответствует вершинам множества  $G'$ , то есть  $e_{ij}: G_i \in G' \wedge G_j \in G'$ . Результирующая подсеть формируется с использованием алгоритма Флойда-Уоршелла, который находит все расстояния между вершинами обратного графа.

Кроме суммарных запасов для обеспечения потребителей требуемыми объемами также необходимо оценить максимальные потоки для каждого  $i$ -го потребителя в рамках его подсети запасов  $Gr_i$ .

Потоковые схемы, полученные в результате расчета стационарных режимов для различных объемов потребления, являются базовыми для формирования динамического управления нестационарными режимами поставок газа потребителям. Для формирования управления на выбранном горизонте планирования предлагается использовать комбинации потоковых схем для различных состояний ГТС. Также при формировании общей агрегированной модели выбора оптимального управления предполагается, что имеет место множество моделей описания динамики движения газа в УТ и множество моделей управления потоковыми схемами. В связи с этим в систему моделирования включены различные схемы расчета, такие как модель Сарданашвили С.А. [6] и др. Кроме того, включена разработанная автором модель расчета потоковой схемы по близости состояний. Основу метода [6] составляет процедура решения системы уравнений баланса в узлах расчетной схемы в соответствии с первым законом Кирхгофа и учетом режимно-энергетических ограничений по каждому моделируемому объекту-дуге графовой схемы ГТС.

Для расчета стационарного режима, рекомендованного для организации диспетчерского управления, используется система уравнений второго закона Кирхгофа  $Bu=0$ , где  $B$  – цикломатическая матрица, а  $u$  – разность потенциалов, которая рассчитывается на основании коэффициента сопротивления с учетом ряда других показателей.

В общем случае решение задачи выбора потоковой схемы для заданных моделей поставок и потребления неоднозначно. Кроме того, можно предположить, что в динамической модели управления нестационарным режимом переходы с одной потоковой схемы на другую будут осуществляться с меньшими затратами, если эти сменяемые потоковые схемы будут ближе друг к другу в смысле обычного евклидова или обобщенного расстояния  $\sum_i |q_i^{(1)} - q_i^{(2)}|$  на взвешенном графе.

Для расчета введем параметры:  $q = (q_1, q_1, \dots, q_{|E|})$  – вектор потоков;  $Q = (Q_1, Q_1, \dots, Q_C)$  – вектор узловых расходов;  $|G|$  – число вершин графа (узлов);  $|E|$  – число дуг (участков труб). Базовым условием для расчета стационарного режима является выполнение первого закона Кирхгофа  $Aq=Q$ , где  $A = \|a_{ij}\|$  – матрица инцидентности графа ГТС -  $Gr^{ГТС}$ , размер-

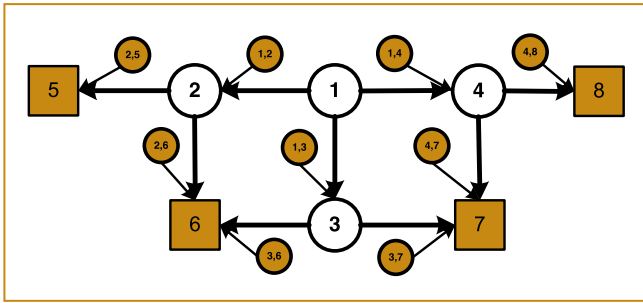


Рис. 5. Формирование схемы фиктивных истоков

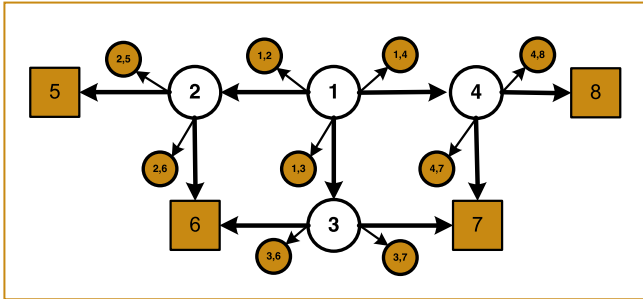


Рис. 6. Формирование схемы фиктивных стоков

ности  $|G| \times |E|$  и  $a_{ij}=1$ , если  $j$ -ая дуга выходит из узла  $i$ ,  $a_{ij}=-1$ , если  $j$ -ая дуга входит в  $i$ -ый узел и  $a_{ij}=0$ , в противном случае.

При формировании моделей нестационарного управления предлагается ограничиться лишь первым законом Кирхгофа, а дополнительные условия для решения задачи поиска стационарных потоков выбирать из постановки оптимизационных задач.

При параметризации моделей будем варьировать потреблением. Введем обозначение  $Q^{CT}=(Q_1^{CT}, Q_2^{CT}, \dots, Q_{|CT|}^{CT})$  - вектор стоков. Предположим, что необходимо рассчитать стационарные потоки для структуры графа (рис. 3) с потреблением  $Q^{CT}=[1,6,5,2]=Q^1$ . Будем считать, что в качестве сменяемого необходимо выполнить расчет потоковой схемы для потребления  $Q^{CT}=[2,7,4,1]=Q^2$ . Метод заключается в совместном расчете сразу двух стационарных потоковых схем исходя из постановки оптимизационной задачи нелинейного программирования:

$$\sum_i |q_i^{(1)} - q_i^{(2)}| \rightarrow \min,$$

$$Aq^1 = Q^1, Aq^2 = Q^2,$$

$$q^1 \leq P, q^2 \leq P,$$

где  $P$  – матрица пропускных способностей УТ.

Предполагается, что более близкая совокупность всех потоков первого и второго режимов потребления обеспечит более быстрый и экономичный переход с одной схемы поставок на другую.

### Результаты

Алгоритм динамического управления потоками в модели оптимизации управления нестационарным

режимами потребления представляется как последовательность переходов между различными стационарными потоковыми схемами, соответствующих интервалам постоянства заявок на потребление.

**Шаг 1.** Формируются интервалы постоянства заявок на поставки  $T_k=[T_k^b, T_k^e]$ , на которых  $\forall t_1 \in [T_k^b, T_k^e], t_2 \in [T_k^b, T_k^e], \dots$

**Шаг 2.** Формируются потоковые схемы  $\Pi_k$  для каждого интервала постоянства поставок/потребления с учетом соблюдения или несоблюдения баланса.

А) Если баланс соблюдается  $\sum_{i \in G} M_i = \sum_{j \in G} M_j$ , то выполняется традиционный расчета близости схем. Однако переход на следующую потоковую схему осуществляется на основании решения задачи минимизации различия между текущей и последующей.

Б) Если баланс нарушен и потребление превышает поставки  $\sum_{i \in G} M_i > \sum_{j \in G} M_j$ , предполагается выбор всех запасов из всех УТ. Формально потоковая схема рассчитывается на основании включения в оргграф ГТС фиктивных истоков, которые вводятся для всех УТ (рис. 5). Новые вершины фиктивных истоков имеют на рисунке двойную нумерацию, соответствующую входным/выходным вершинам графа.

В данном случае одной из задач является расчет максимального времени реализации рассчитанной потоковой схемы, связанного с ограниченной массой газа во всех УТ. Кроме того, при расчете потоковой схемы производится минимизация дисбаланса между подсетями снабжения каждого потребителя.

В) Если баланс нарушен в другую сторону, то есть поставки превышают потребление  $\sum_{i \in G} M_i < \sum_{j \in G} M_j$ , то все УТ становятся дополнительными стоками. Формально расчет потоковой схемы выполняется аналогично предыдущему случаю. Для каждого УТ вводится фиктивная вершина стока (рис. 6). Новые вершины фиктивных стоков имеют на рисунке двойную нумерацию, соответствующую входным/выходным вершинам графа.

В данном случае при введении фиктивных стоков производится расчет времени реализации потоковой схемы, но из ограничений максимального давления в УТ, что определяется ограниченным объемом всех УТ.

**Шаг 3.** В зависимости от выбранного критерия управления переход между потоковыми схемами может осуществляться единовременным изменением всех потоков либо с упреждением и плавным переходом на основании введения взвешенной потоковой схемы для различных стационарных режимов, которая определяется следующим образом. Пусть  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – матрицы потоков для двух стационарных состояний ( $\Pi = \|\Pi_{ij}\|$ , тогда взвешенная потоковая схема будет задаваться на основании соотношения  $\Pi(t) = \alpha(t) * \Pi_1 + (1 - \alpha(t)) * \Pi_2$ , где  $\alpha(t)$  – монотонно убывающая функция времени от 1 до 0.

**Заключение**

В результате разработана аналитико-имитационная модель, которая для заданной топологии ГТС, нестационарных объемов поставок и потребностей позволяет моделировать динамику поставок газа. Представлен алгоритм пересчета состояния модели и всех УТ при сформированной стратегии управления, которая представляет собой динамическую последовательность потоковых схем, рассчитанную по принципу близости потоков. Система моделирования направлена на решение задач оптимизации динамического управления ГТС в нестационарных режимах.

**Список литературы**

1. Бернер Л.И., Ковалёв А.А. Моделирование и прогнозирование режимов работы газотранспортных сетей системы поддержки принятия диспетчерских решений // Автоматизация и управление в технических системах. Электронный научный журнал. 2012. №1. С. 55 – 61.
2. Ванчин А.Г. Общие принципы определения оптимальных параметров работы газотранспортного узла // Нефтегазовое дело. 2014. № 2. С. 81–86.
3. Ионин А.А. Газоснабжение: Уч. для вузов. М.: АСВ. 2011. 472 с.
4. Ванчин А.Г. Определение границ применения стационарной и нестационарной моделей работы газопровода // Нефтегазовое дело. 2014. №1. С.598-617.
5. Марченко С.Г., Никаноров В.В., Бернер Л.И., Зельдин Ю.М. Нестационарная модель в задаче управления газотранспортной системой крупного промышленного узла. Интеллектуальные ИТ в управлении // ИТНОУ. 2018. №2. С. 3-6.
6. Сарданашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2005. – 577 с.
7. Сухарев М.Г., Самойлов Р.В. Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. 2017. – 399 с.
8. Марченко С.Г. Общая схема решения задачи оптимизации поставок природного газа потребителям промышленного кластера. Интеллектуальные ИТ в управлении // ИТНОУ. 2018. №3. С.43-47.
9. Сухарев М.Г., Самойлов Р.В. Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина. 2016. – 399 с.

*Сергей Григорьевич Марченко – гл. инженер, первый зам. ген. дир. ООО «Газпром трансгаз Москва».  
E-mail: marchenko@mtg.gazprom.ru*

**Самая высокая статуя в мире создана с помощью технологии BIM**

*Самая высокая статуя в мире – Статуя Единства, возведенная в Индии в 2018 г., создана с помощью технологии информационного моделирования – BIM и программного обеспечения Tekla. Применение BIM позволило завершить строительство на 2 мес. раньше планируемого срока и повысить эффективность работ на 25%.*

Расположенная в штате Гуджарат, на западе Индии, Статуя Единства посвящена известному индийскому политическому деятелю, одному из лидеров национально-освободительного движения Валлабхаи Пателю. Высота статуи без постамента составляет 182 м, что почти в 2,5 раза больше, чем высота Статуи Свободы в Нью-Йорке.

Работы по созданию металлического каркаса статуи проводились компанией Eversendai, крупнейшим международным производителем металлоконструкций, с использованием программного обеспечения Tekla Structures и Tekla Model Sharing. Полный цикл работ занял рекордные 33 мес., что на 2 мес. меньше планируемого срока.

Для реализации амбициозного проекта потребовалось 210 тыс. м<sup>3</sup> цемента, 18,5 тыс. тонн арматурной стали, 6,5 тыс. тонн металлоконструкций и 1,85 тыс. тонн облицовочных пластин из бронзы. Столь масштабный проект потребовал участия многочисленных команд, работавших одновременно над различными задачами. В этих условиях большое значение имел постоянный обмен актуальной и точной информацией между участниками проекта, что стало возможно благодаря применению технологии BIM. Использование BIM не только позволило исключить коллизии уже на ранних этапах работы, но и повысило общую эффективность работ на 25%.

Проект создания Статуи Единства выделяется не только тем, что изваяние имело огромные размеры, но и тем, что он

выполнялся в сложных геологических условиях. Дополнительной сложностью стал исключительный дизайн статуи: она должна была в точности повторять изображение Валлабхаи Пателя на его прижизненной фотографии, во многократно увеличенных масштабах. Это потребовало от проектировщиков и производителей конструкций создать в каждом соединении уникальные узлы. Кроме того, статую проектировали таким образом, чтобы она смогла выдерживать сильный ветер скоростью около 180 км/ч, а также землетрясения магнитудой до 6,5 баллов по шкале Рихтера в радиусе 12 км.

Статуя Единства, открытая премьер-министром Индии Нарендрой Модии в 2018 г., стала одним из наиболее ярких примеров сочетания оригинального дизайна, инженерной мысли, грамотного управления проектом и прогрессивных методов ведения строительных работ. Статуя является одной из достопримечательностей Индии и местом проведения официальных государственных мероприятий.



<http://www.tekla.com>