

УДК 519.87:622.691.4.053

## Подход к моделированию работы больших газотранспортных систем в условиях крупномасштабных возмущений с применением методов линейного программирования

С.И. Долгов<sup>1</sup>, Е.В. Пожидаев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

\* E-mail: E\_Pozhidaev@vniigaz.gazprom.ru

### Ключевые слова:

Единая система газоснабжения, математическое моделирование, крупномасштабные возмущения, запас газа в трубах.

**Тезисы.** В статье представлен подход к моделированию функционирования больших газотранспортных систем в условиях крупномасштабных возмущений с использованием потоковых алгоритмов и с учетом изменения запасов газа в трубах. Подход предполагает имитацию процессов изменения запасов газа в трубах, связанных с оперативным диспетчерским управлением, и учет режимно-технологических ограничений. Возможная реализация подхода показана на примере моделирования процессов изменения транспортных режимов при переходе газотранспортной системы из одного потокового состояния в другое.

Ввиду сложности и технологической специфики работы больших газотранспортных систем моделирование является эффективным инструментом решения широкого спектра задач управления такими системами. Уровень детализации модели и методы моделирования выбираются в зависимости от постановки задачи и масштабов газотранспортной системы (ГТС). Повышение детальности приводит к значительному увеличению трудоемкости как на этапе создания модели, так и на этапах подготовки исходных данных и проведения вычислительного эксперимента. Это обусловлено большим количеством элементов, входящих в состав ГТС, и сложностью формализации процессов ее функционирования. Поэтому при выборе уровня детализации и методов моделирования очень важно правильно – в соответствии с решаемой задачей, возможностями подготовки расчетных данных и требованиями к оперативности получения результатов моделирования – оценить необходимую сложность модели.

Например, расчет производительности ГТС при планировании поставок газа в годовом или месячном разрезе может осуществляться с использованием методов решения транспортных задач на графах и опираться на проектную пропускную способность агрегированных (эквивалентных) участков. Для более детального моделирования, когда нужно оценивать расходы и запасы газа по участкам системы в суточном или даже часовом разрезе, могут подойти математические модели для расчета гидравлических и температурных режимов при нестационарном течении газа в трубах [1].

Отдельно можно выделить задачи оперативного управления большими ГТС в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС). При крупномасштабных возмущениях в протяженных ГТС переходные процессы могут длиться от нескольких часов до нескольких суток, соответственно, минимальное временное разрешение моделирования таких процессов должно составлять не более одного-двух часов. Однако применение точных математических моделей в данном случае неэффективно из-за высокой трудоемкости подготовки детальной информации для описания начальных условий моделирования и проблем обеспечения сходимости решения при значительных изменениях режима работы системы.

Кроме того, в условиях ЧС точность таких моделей избыточна, так как в первую очередь требуется оценивать не конкретные технологические режимы транспорта газа, а предельные возможности системы газоснабжения с точки зрения обеспечения

потребителей, а именно – ее производительность. Оценка производительности системы при заданных пропускных способностях ее отдельных участков может осуществляться при помощи потоковых моделей. Однако данный тип моделей не позволяет учитывать изменения запаса газа в трубах, уровень которого в больших ГТС может оказывать весьма значительное влияние на функционирование системы. С одной стороны, запас газа в трубах необходим для обеспечения процесса транспортировки, и его объем влияет на производительность участков, а с другой – он может использоваться для кратковременной компенсации дефицита либо нивелирования избытка газа [2]. С учетом использования запаса газа в трубах для обеспечения краткосрочного балансирования системы газоснабжения в условиях крупномасштабных возмущений уровень запасов газа на участках газопроводов может изменяться в широких пределах, что непосредственно сказывается как на пропускной способности отдельных участков, так и на производительности всей системы в целом.

Далее авторами предлагается подход к моделированию работы больших ГТС в условиях крупномасштабных возмущений с применением методов решения транспортных задач на графах, позволяющий учитывать динамику изменения запаса газа в трубах и зависимость пропускной способности от текущего запаса.

### **Моделирование процесса изменения транспортного режима ГТС в условиях крупномасштабных возмущений**

Рассмотрим некоторые технологические особенности транспорта газа на примере участка газопровода между двумя компрессорными станциями. Режим транспорта газа на отдельном участке газопровода регулируется в первую очередь за счет разности давлений в его начальной и конечной точках. Перепад давления определяет скорость движения потока, но из-за сжимаемости газа при одинаковом объемном расходе массовый расход газа в трубе может быть разным. Этот параметр обусловлен плотностью газа и зависит от запаса газа в трубе. Максимальный допустимый перепад давления имеет технологические ограничения и определяется на этапе проектирования газопровода. Максимальный запас газа в трубе ограничен допустимым рабочим давлением. Массовый расход (выраженный через коммерческий

объемный расход), который достигается при максимальном перепаде давления и значении давления в начале участка, равно допустимому рабочему, определяет технически возможную пропускную способность (ТВПС) участка. Следует отметить, что технически возможный запас газа достигается при давлении, на всей протяженности участка равно допустимому рабочему давлению газопровода, т.е. при отсутствии разницы между давлениями в начале и в конце участка. Поскольку для осуществления транспортировки газа необходим перепад давлений, из-за ограничения допустимого рабочего давления запас газа на участке снижается относительно технически возможного. Исходя из того, что основной функцией газопровода является транспортировка газа и приоритетен режим, обеспечивающий достижение ТВПС, под максимальным запасом будем понимать такой запас газа, при котором обеспечивается ТВПС участка. Если запас газа на участках магистральных газопроводов между компрессорными станциями, протяженность которых, как правило, не превышает 200 км, находится на максимальном уровне, то за счет изменения перепада давления на концах участка расход можно достаточно быстро менять от нуля до ТВПС. Ввиду наличия технологических пределов увеличения перепада давления на межкомпрессорных участках газопровода снижение запаса газа ограничивает пропускную способность участка. Таким образом, для адекватной оценки транспортных возможностей ГТС в условиях крупномасштабных возмущений необходимо учитывать текущие пропускные способности газопроводов, определяемые располагаемыми на участках запасами газа.

В условиях крупномасштабных возмущений возможен выход из строя отдельных объектов ГТС или их элементов, а вышедшие из строя объекты могут впоследствии восстановиться. При этом изменяются режимы транспорта газа на соответствующих участках системы, что приводит к изменению как расходов газа, так и объемов поставок газа потребителям. При моделировании процессов, протекающих в системе в результате воздействия крупномасштабных возмущений и при последующем восстановлении системы, необходимо учитывать, что режимы транспорта газа и объемы поставок газа потребителям могут многократно изменяться. Традиционные

методы решения транспортных задач на графах позволяют оценивать возможности ГТС в рамках отдельных стационарных состояний с установившимися значениями расходов газа на участках ГТС. Для корректной оценки возможностей ГТС в условиях многократных изменений режимов транспорта газа также необходимо учитывать динамику переходов системы между отдельными стационарными состояниями, т.е. кроме времени нахождения системы в каждом из промежуточных состояний следует оценивать период перехода системы из одного потокового состояния в другое.

На рис. 1 показан пример изменения состояния гипотетической ГТС после повреждения одного из элементов системы. Состояние каждого участка характеризуется расходом  $q$  и запасом  $v$  газа. Запас газа позволяет изменять расход в пределах  $0 \leq q \leq q_{\max}(v)$ , где  $q_{\max}(v)$  – максимально достижимый расход при текущем уровне запаса. До выхода из строя элемента система находится в потоковом состоянии  $Q$  (см. рис. 1а). В результате значительного снижения производительности источника газа  $I_1$  система должна перейти в потоковое состояние  $Q'$  (см. рис. 1б). Расход на участке  $I_1 \dots KC_2$  снижается, а на участках  $KC_3 \dots KC_2$ ,  $KC_4 \dots KC_3$ ,  $I_2 \dots KC_4$  – увеличивается. Если

текущий уровень запаса газа на участках с увеличившимся расходом не позволяет достичь требуемых значений расхода, то необходимо пополнить запас, причем без снижения поставок газа потребителям. На участке  $I_1 \dots KC_2$  высвобождается некоторое количество газа, которое в случае необходимости может быть использовано для снабжения потребителей или увеличения запаса на других участках. Таким образом, изменение потоковых состояний возможно только после определенного переходного процесса, и при моделировании изменения состояния ГТС кроме расчетных потоков, связанных с обеспечением потребителей, требуется учитывать дополнительные расчетные потоки, связанные с изменением запаса газа в трубах.

В упрощенном виде процесс изменения потокового режима отдельного межкомпрессорного участка можно разделить на два этапа: 1) пополнения, в случае необходимости, запаса газа на участке до уровня, достаточного для обеспечения требуемого расхода и 2) изменения расхода на участке. Соответственно, полное переключение потокового состояния системы произойдет не раньше, чем завершатся оба этапа на каждом из транспортных участков, на которых предусматривается изменение

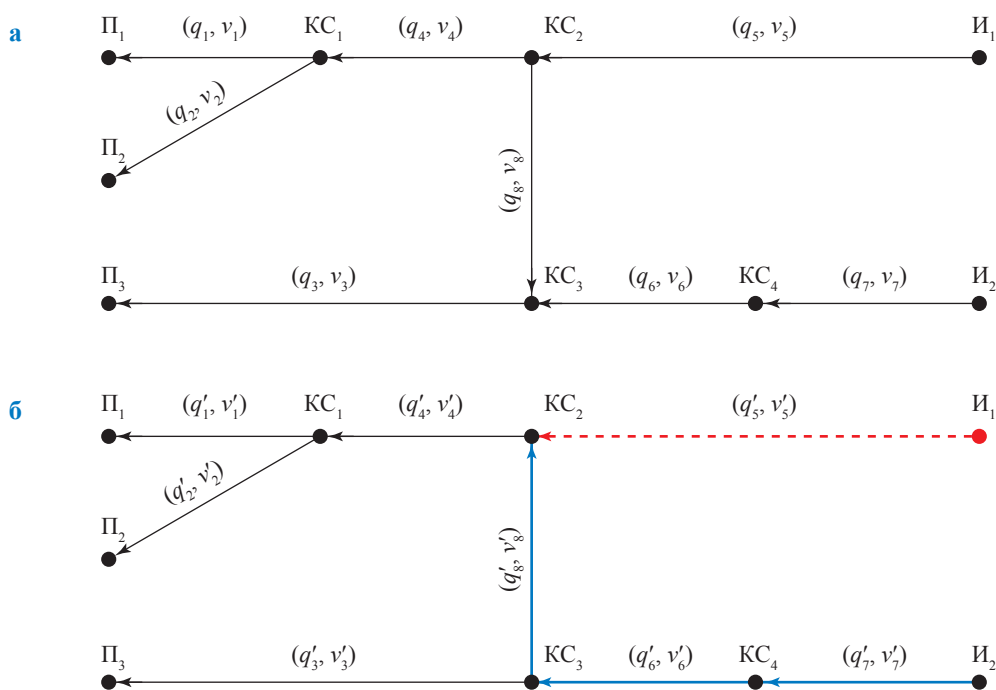


Рис. 1. Схема гипотетической ГТС в первоначальном состоянии (а) и в состоянии сниженной производительности узла  $I_1$  (б):

$\Pi$  – потребитель газа;  $I$  – источник газа;  $KC$  (компрессорная станция) – транзитный узел

расхода. Поэтому общее время переключения состояния системы зависит от необходимых объемов пополнения запасов, возможной скорости их пополнения и времени непосредственного изменения расхода. Длительности периодов непосредственного изменения расхода на участках при достаточном запасе газа можно рассматривать как постоянные величины, значения которых совпадают для всех сопоставимых по длине участков газопровода одинакового диаметра. Данные константы могут быть оценены с использованием газодинамических математических моделей. При этом заполнение участков с недостаточными уровнями запаса газа возможно за счет использования излишков с мало загруженных участков.

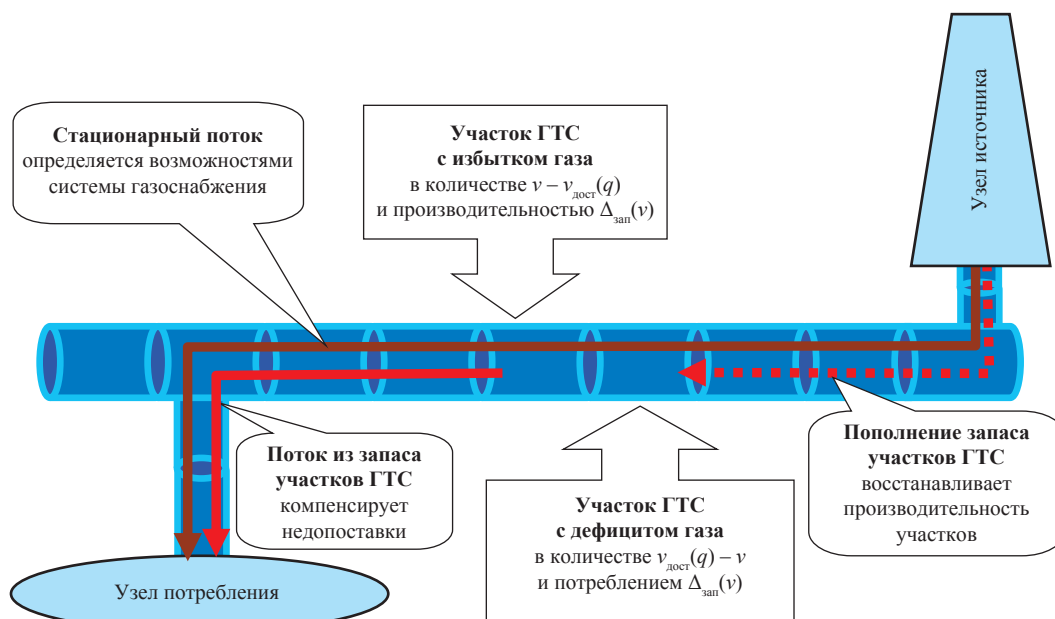
Для имитации процессов изменения запасов газа при смене транспортных режимов предлагается ввести в стационарную потоковую модель дополнительные расчетные потоки, связанные с изменением запасов газа на участках ГТС (рис. 2).

Дополнительные потоки формируются исходя из того, что участки с дефицитом запаса можно рассматривать как дополнительные узлы потребления, а участки газопроводов с избытком запаса – как источники газа. Параметры виртуальных источников и потребителей определяются на основе расчетной зависимости

запаса газа, достаточного для обеспечения заданного расхода  $q$ , от значения  $q$ . Зависимость  $v_{\text{дост}}(q)$  является обратной для зависимости  $q_{\text{макс}}(v)$ .

При таком подходе расчетная скорость изменения запасов ограничивается пропускной способностью транспортной сети и производительностью узлов источников газа. В условиях относительно стабильной работы реальных ГТС скорость изменения запаса газа в трубах так же определяется в основном пропускными возможностями газопроводов, задействованными для отбора либо пополнения газа на участках, и возможностями системы газоснабжения по добыче и управлению потреблением газа. Однако в условиях крупномасштабных возмущений значительное влияние на скорость изменения запасов газа могут оказывать технологические ограничения, связанные с режимами работы технологической обвязки крановых узлов и компрессорных станций. Для учета этих ограничений при расчете потоков, обусловленных изменением запасов газа на участках, предполагается использование зависимости максимальной возможной скорости изменения запаса  $\Delta_{\text{зап}}$  от значения  $v$ , т.е. текущего уровня запаса участков ГТС.

Зависимости  $q_{\text{макс}}(v)$ ,  $v_{\text{дост}}(q)$  и  $\Delta_{\text{зап}}(v)$  могут быть получены путем численного



**Рис. 2. Движение газа в ГТС, представленное в виде отдельных расчетных потоков:**  
 $v$  – располагаемый запас (объем) газа на участке;  $q$  – величина стационарного потока через участок (расход газа);  $v_{\text{дост}}$  – запас газа, достаточный для обеспечения заданного расхода  $q$ ;  
 $\Delta_{\text{зап}}$  – максимально возможная скорость изменения запаса

моделирования процессов заполнения и опорожнения участков с использованием фактических технологических параметров и усредненных локальных значений параметров газа. Для определения характера и параметризации вышеупомянутых расчетных зависимостей авторы использовали конечно-разностные модели. Параметризация осуществлялась на основе ретроспективных данных о режимах транспорта газа в Единой системе газоснабжения России (ЕСГ) за период кризисной ситуации в отношениях с Украиной с 1 по 22 января 2009 г. В результате получены характерные расчетные зависимости для ряда участков трубопроводов, расположенных в различных сегментах ЕСГ и различающихся длинами и диаметрами. Проверка адекватности этих зависимостей осуществлялась обратным моделированием для участков, не рассматривавшихся на этапе параметризации, при этом установлена высокая степень сходимости результатов моделирования с фактическими характеристиками.

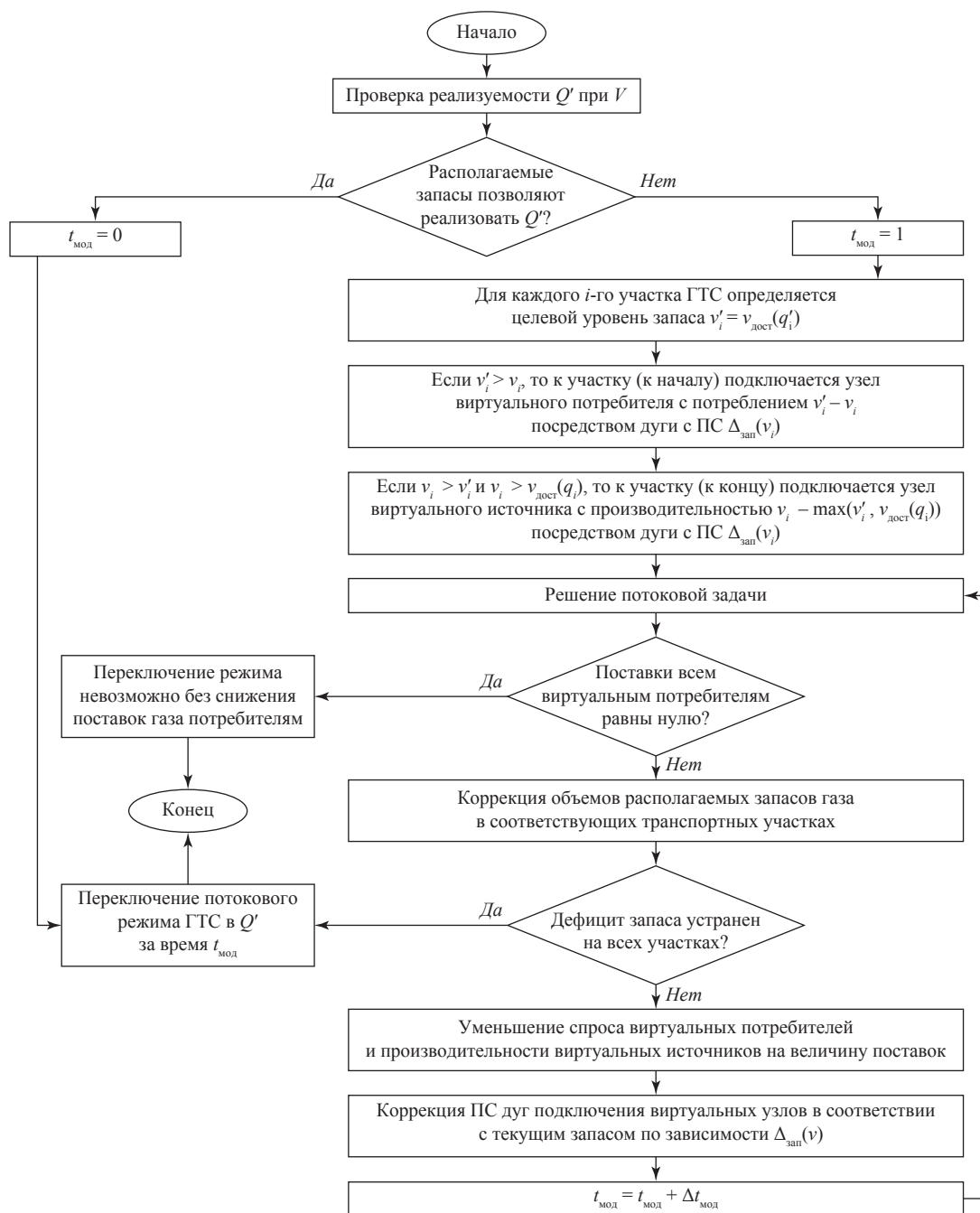
Рассмотрим подход к моделированию процессов изменения транспортных режимов на примере перехода ГТС из потокового состояния  $Q$  в потоковое состояние  $Q'$ . Каждому из состояний соответствуют определенные значения расхода по участкам ГТС. Кроме того, для состояния  $Q$  заданы значения запаса газа на каждом транспортном участке, которые формируют состояние системы по запасам  $V$  и определяют располагаемые пропускные способности участков. Предполагается, что  $V$  достаточно для обеспечения расходов  $Q$ , но возможен и избыток запасов. Для каждого транспортного участка заданы зависимости  $\Delta_{\text{зап}}(v)$ ,  $q_{\text{макс}}(v)$  и  $v_{\text{дост}}(q)$ . Время, необходимое для переключения ГТС из одного потокового режима в другой при достаточном уровне запаса газа в трубах, принимается равным нулю. Дискретный временной шаг модели  $\Delta t_{\text{мод}}$  выбран равным единице измерения времени в расходных характеристиках объектов системы (производительности источников, пропускной способности транспортных участков, спросе потребителей). Принципиальная схема расчетов приведена на рис. 3.

На первом шаге проводится проверка реализуемости потокового состояния  $Q'$  при заданных начальных уровнях запаса газа и располагаемых пропускных способностях транспортных участков. Очевидно, что если  $Q'$  может быть реализовано при текущих запасах,

то изменения запасов не требуется. Далее, при необходимости пополнения запасов, определяются участки с дефицитом и участки с избытком запаса. Для определения целевых уровней запасов, позволяющих реализовать состояние  $Q'$ , используются зависимости  $v_{\text{дост}}(q)$ . К начальным узлам участков с дефицитом подключаются узлы виртуального потребления со спросом, равным необходимому для пополнения объема запаса. К конечным узлам участков с избытком запаса подключаются узлы виртуальных источников, производительность которых устанавливается равной объему располагаемого избытка запаса газа. Для того чтобы учесть ограничение скорости изменения запаса, связанное с технологическими возможностями компрессорных станций, для дуг подключения виртуальных узлов устанавливается пропускная способность в соответствии с характеристикой  $\Delta_{\text{зап}}(v)$ . Пропускная способность виртуальных дуг корректируется при каждом изменении запаса. Расчетный граф ГТС (см. рис. 1) показан на рис. 4.

Далее производится расчет потокораспределения в сети. Результирующие поставки виртуальным потребителям соответствуют объему пополнения запаса за время  $\Delta t_{\text{мод}}$ . Величина поставок вычитается из спроса виртуальных потребителей. Таким образом формируется задание на поставку необходимых объемов на следующий итерационный шаг. Аналогично обрабатываются поставки от виртуальных источников. Размер поставок вычитается из производительности источников. Далее в соответствии с изменившимися запасами газа на участках корректируется ПС дуг подключения виртуальных потребителей и источников, и повторяется расчет потокораспределения.

Условием выхода из цикла и окончания алгоритма является либо достижение целевых уровней запаса на участках с его дефицитом, либо отсутствие возможности пополнения запаса при фиксированных объемах поставок газа потребителям. Если переключение в состояние  $Q_2$  все-таки происходит, то необходимое время оценивается как количество итераций с расчетом потоков, умноженное на временной шаг  $\Delta t_{\text{мод}}$ . Таким образом, алгоритм реализует возможность квазидинамического моделирования процесса изменения потокового режима работы ГТС и позволяет оценить время, необходимое для переключения в новый потоковый режим.



**Рис. 3. Принципиальная схема расчетов при моделировании изменения транспортного режима ГТС:** ПС – пропускная способность;  $q_i, v_i$  – значения расхода и запаса на  $i$ -м участке ГТС в первоначальном потоковом состоянии системы  $Q$ ;  $q'_i, v'_i$  – значения расхода и запаса на  $i$ -м участке ГТС после переключения системы в потоковое состояние  $Q'$ ;  $i = 1..n$ , где  $n$  – количество участков на расчетной схеме ГТС;  $t_{\text{мод}}$  – расчетное время, необходимое для переключения ГТС из  $Q$  в  $Q'$

Для облегчения восприятия в данном примере показана упрощенная стратегия переключения в новый потоковый режим, которая заключается в следующем:

- изменение пропускных способностей транспортных участков (кроме виртуальных) происходит одновременно и только после

полного перехода ГТС в состояние по запасам  $V_2$  (таким образом, все промежуточные расчетные потоковые режимы рассчитываются на пропускных способностях состояния  $V_1$ );

- инерционность источников газа не учитывается;



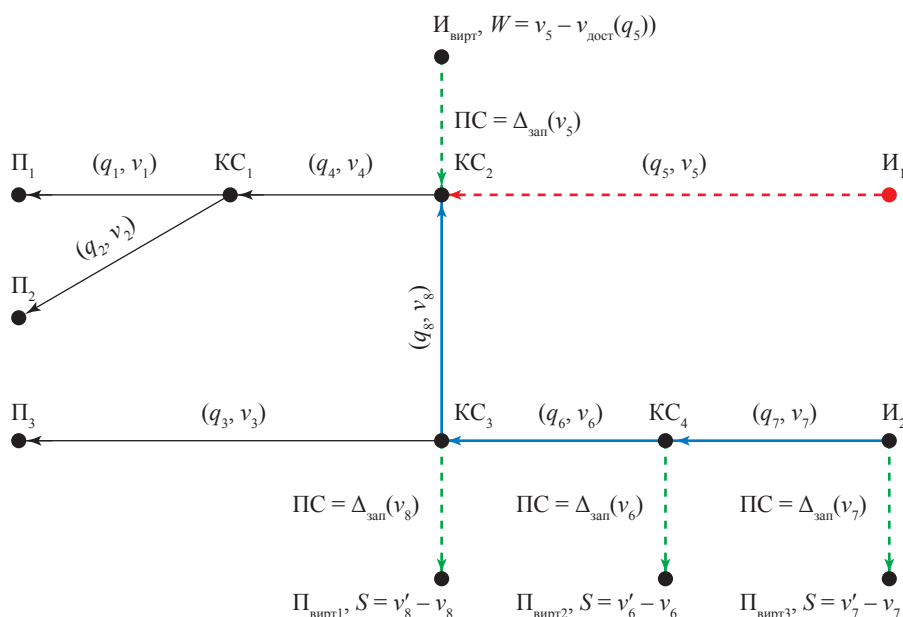


Рис. 4. Расчетный граф с виртуальными элементами:

$W$  – производительность виртуального источника  $И_{\text{вирт}}$ ;

$S$  – потребление виртуального потребителя  $\Pi_{\text{вирт}}$

- допускается отличие промежуточных расчетных потоковых режимов от  $Q_1$  при условии сохранения объемов газоснабжения потребителям (таким образом, потоковый алгоритм может предлагать планы потокораспределения, значительно отличающиеся от исходного, но обеспечивающие более быстрое пополнение запасов);

- снижение поставок потребителям относительно потокового состояния  $Q_1$  не допускается, для чего при решении потоковой задачи вводится безусловный приоритет поставок реальным потребителям, а ситуация, когда пополнение запасов газа транспортных участков невозможно, приводит к остановке алгоритма.

При решении реальных задач могут потребоваться более сложные сценарии переключения, в том числе предусматривающие:

- изменение ПС участков на каждом итерационном шаге по мере изменения запасов газа;

- снижение поставок реальным потребителям в пользу виртуальных для более быстрого достижения целевых уровней запаса и переключения в целевой потоковый режим либо в случае, когда располагаемые ПС участков ГТС не позволяют произвести пополнение запасов без ущерба газоснабжению потребителей;

- минимальное изменение первоначально заданного потокового состояния в ходе

промежуточных потоковых расчетов, например, с целью снижения временных издержек, если учитываются технологические задержки при изменении режимов работы участков газопроводов, и др.

\*\*\*

Большая протяженность газопроводов ЕСГ, сложность топологической структуры, зависимость режима работы системы от работы большого количества технологических установок и положения запорно-регулирующей арматуры приводят к значительной трудоемкости создания как самих физико-математических моделей, позволяющих оценивать динамику изменения режимов транспорта газа в масштабах всей системы, так и начальных сценарных условий для проведения расчетов, особенно при необходимости моделирования ситуаций, возникающих в условиях крупномасштабных возмущений. Кроме того, в условиях чрезвычайных и кризисных ситуаций точность и высокая детализация результатов моделирования не являются приоритетными. С этой точки зрения разработка упрощенных полумпирических моделей, позволяющих моделировать динамику поведения больших газотранспортных систем, является перспективным и востребованным направлением.

Основу предлагаемого подхода к моделированию динамики поведения больших газотранспортных систем составляют: введение в потоковую модель ГТС дополнительных расчетных потоков, связанных с изменением запасов газа; учет изменений пропускных способностей газотранспортных участков в зависимости от располагаемых объемов запаса газа; учет ограничений на скорость изменения запасов газа, обусловленных технологическими возможностями компрессорных станций.

Описанный подход нашел применение при реализации имитационной модели для оценки динамики изменения состояний ЕСГ России. В рамках ее усовершенствования разрабатываются методики, позволяющие учитывать

при моделировании поведения ЕСГ дополнительные внешние факторы, такие как сезонные колебания температуры окружающей среды, неравномерность газопотребления с учетом отраслевой структуры потребителей.

### Список литературы

1. Карасевич А.М. Модели и методы разработки стратегии развития Единой системы газоснабжения: обзорная инф. / А.М. Карасевич, Е.В. Леонтьев, Е.Р. Ставровский и др. – М.: ИРЦ Газпром, 2006.
2. Сухарев М.Г. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов / М.Г. Сухарев, А.М. Карасевич. – М.: Нефть и газ, 2000.

---

## Approach to modelling work of big gas transportation systems in conditions of major disturbances by means of linear programming

S.I. Dolgov<sup>1</sup>, Ye.V. Pozhidayev<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

\* E-mail: E\_Pozhidaev@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** This article represents a way to design models of big pipelines operating in conditions of wide-scale perturbations. That means application of the flow algorithms and consideration of the in-pipe gas stock fluctuations. The named approach supposes simulation of the in-pipe gas stocks changing due to dispatch control, and account of the process constraints. Possible realization of this scheme is exemplified by a case of transport regimes modelling when a gas transportation system transfers from one flow state to another.

**Keywords:** Unified Gas Supply System, mathematical modelling, wide-scale disturbances, gas reserve in pipes.

### References

1. KARASEVICH, A.M., Ye.V. LEONTYEV, Ye.R. STAVROVSKIY, et al. *Models and methods for designing strategy of the Unified Gas Supply system development* [Modeli i metody razrabotki strategii razvitiya Yedinoj sistemy gazosnabzheniya]: review. Moscow: IRTs Gazprom, 2006. (Russ.).
2. SUKHAREV, M.G., A.M. KARASEVICH. *Process design and reliability support for gas and oil pipelines* [Tekhnologicheskii raschet i obespecheniye nadezhnosti gazo- i nefteprovodov]. Moscow: Neft i gaz, 2000. (Russ.).