

УДК 662.76:51.001.57(47+57)

Особенности математического моделирования при распределении излишков газа в Единой системе газоснабжения России*

С.В. ВОРОБЬЕВ, А.В. ЕДЕЛЕВ

¹ 664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, аспирант. E-mail: seregavorobev@isem.irk.ru

² 664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: flower@isem.irk.ru

В данной статье подробно рассмотрен программно-вычислительный комплекс «Нефть и газ России» и продемонстрированы возможности его применения при рассмотрении вопросов живучести больших трубопроводных систем. В основе данного программно-вычислительного комплекса лежит потоковая модель оценки производственных возможностей систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения. Математически Единая система газоснабжения и Единая система нефтепродуктоснабжения России представляются как сети, изменяющиеся во времени, в узлах которых находятся предприятия по добыче, преобразованию и потреблению материальных потоков, реализующих материальные связи между предприятиями. При решении задачи оценки состояния системы после возмущения критерием оптимальности распределения потоков служит минимум дефицита энергоресурса у потребителя при минимальных затратах на его доставку. Для расчетов задачи потокораспределения и дальнейшего анализа результатов расчета в программно-вычислительном комплексе «Нефть и газ России» используется специализированная геоинформационная среда. В ней схема Единой системы газоснабжения или Единой системы нефтепродуктоснабжения представлена в виде электронной карты, состоящей из слоев с векторными данными, отражающими состояние производителей, нужды потребителей энергоресурса, и с линиями, дающими представление о степени загруженности транспортной подсистемы. Для хранения технологических характеристик объектов Единой системы газоснабжения и Единой системы нефтепродуктоснабжения используются базы данных. Структура баз данных ориентирована на объекты рассматриваемых трубопроводных систем. Для записи в базы данных выделены объекты добычи, хранения, потребления и транспорта энергоресурсов. В качестве примера работы программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России» приведен расчет распределения возможных излишков газа в Единой системе газоснабжения России при кратковременном сокращении экспорта российского газа в Европу.

Ключевые слова: программно-вычислительный комплекс, система энергетики, геоинформационная система, топливоснабжение, энергоснабжение, живучесть, потоковые модели, подземные хранилища газа

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-181-194

* Статья получена 02 сентября 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Важным аспектом бесперебойного топливно- и энергоснабжения потребителей является надежная устойчивая работа систем энергетики (СЭ), при этом понятие надежности функционирования СЭ включает такое важнейшее свойство, как живучесть, определяемая как способность СЭ противостоять крупным возмущениям, не допуская каскадного развития аварии с массовым нарушением питания потребителей. В силу невозможности проведения крупномасштабных экспериментов на федеральных технологических СЭ наиболее удобным при исследовании живучести СЭ является использование имитационного подхода.

Актуальность исследований живучести СЭ в настоящее время весьма высока, и определяется это значительным количеством угроз процессу нормального топливно- и энергоснабжения, таких как изношенность оборудования, социальная напряженность, высокая концентрация энергетических мощностей и т. д. Значительная роль при этом отводится работе систем газоснабжения (ЕСГ), нефте- и нефтепродуктоснабжения (ЕСН), отвечающих за добычу и транспорт до основных мест потребления нефти и газа. В силу специфики организации работы этих отраслей в России (когда основные места добычи находятся в тысячах километров от мест основного потребления) особую значимость приобретают вопросы исследования возможностей работы их транспортных составляющих – больших трубопроводных систем (БТС).

Одним из важных аспектов исследования живучести СЭ является рассмотрение вопросов распределения излишков энергоресурсов. Так, распределение излишков газа в ЕСГ необходимо в ряде нестандартных ситуаций (например, при кратковременном сокращении экспорта российского газа). По различным причинам, прежде всего технического характера, объемы экспорта российского газа могут резко снижаться на период от нескольких дней до 2-3 недель. В такой ситуации в газотранспортной системе (ГТС) России возникают излишки газа, а при резком возникновении значительных объемов неостребованного газа появляется необходимость скорейшего использования этих излишков газа. В противоположном случае накопление в ГТС непротраченного газа может привести к нарушению баланса между добычей и потреблением газа и как следствие – к повышению давления в сети и возникновению аварийных ситуаций. Все это негативным образом скажется на работе газовой отрасли России.

1. СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

При решении различных задач, связанных с вопросами исследования живучести СЭ, сформировалась общая схема таких исследований, представляющая взаимосвязь основных задач, составленная согласно [1] и показанная на рис. 1.

Формирование множества сценариев возмущений, отражающих наиболее представительные или характерные сочетания внешних условий развития и функционирования СЭ, является важной составляющей исследований. Количество таких характерных ситуаций для сложной СЭ может оказаться чрезвычайно большим.

Следующие две задачи – выявление слабых мест в топливо- и энерго-снабжении потребителей и оценка эффективности мероприятий при конкретных сценариях возмущений – имеют свои особенности в части моделирования СЭ. Модели конкретных отраслевых СЭ различаются более или менее детальным представлением структурных и технологических свойств этих систем, а также состояний и поведения энергообъектов и потребителей при возмущениях. В любом случае модель должна достаточно полно отражать структуру СЭ, определяя ее основными объектами производства, хранения, транспорта и потребления энергоресурсов и связями между ними.

Следующая задача заключается в оценке приемлемости и эффективности мероприятий по повышению живучести СЭ и обеспечению ЭБ при конкретных сценариях возмущений. Из-за сложности используемых моделей и слабой формализации критериев оценка производится в рамках соответствующих имитационных процедур при большой роли эксперта.



Рис. 1. Взаимосвязь основных задач в общей схеме исследования живучести СЭ

Отбор инвариантных и наиболее эффективных мероприятий на всем множестве сценариев возмущений менее формализован по сравнению с предыдущей задачей.

Завершающим этапом исследований является принятие решений о реализации мероприятий по повышению живучести ТЭК и СЭ и обеспечению

ЭБ, которое рассматривается на уровне лица, принимающего решение, при этом могут использоваться модели и экспертные оценки по другим факторам, в частности условия реализации мероприятий с точки зрения экономики в целом, экологических, социальных и других требований и ограничений и т. д.

2. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ, НЕФТЕ- И НЕФТЕПРОДУКТОСНАБЖЕНИЯ

Как уже указывалось ранее, наиболее удобным при исследовании живучести СЭ является использование имитационного подхода. Поэтому широкое применение получили модели оценки производственных возможностей ЕСН и ЕСГ России с позиций обеспечения их живучести при различного рода возмущениях. Модели в целом схожи между собой и используются на вышеописанных этапах выявления слабых мест в снабжении потребителей ТЭР и оценки эффективности мероприятий по повышению живучести СЭ при конкретных сценариях возмущений.

Математически ЕСГ России представляется как сеть, изменяющаяся во времени, в узлах которой находятся предприятия по добыче, преобразованию и потреблению материальных потоков, реализующих материальные связи между предприятиями. При решении задачи оценки состояния системы после возмущения критерием оптимальности распределения потоков служит минимум дефицита энергоресурса у потребителя при минимальных затратах на его доставку.

Изменение состояния объектов системы приводит к решению задачи распределения потоков в системе с целью максимальной подачи энергоносителя потребителям, т. е. модель можно формализовать как задачу о максимальном потоке [2, 3]. Тогда схему-граф следует дополнить двумя фиктивными узлами (O – суммарный источник, S – суммарный сток) и ввести дополнительные участки, соединяющие узел O со всеми источниками и всех потребителей с узлом S . Математическая запись поставленной задачи имеет следующий вид:

$$f(x) \rightarrow \max \quad (1)$$

при условиях, что

$$\sum_{i \in N_j^+} x_{ij} - \sum_{i \in N_j^-} x_{ji} = \begin{cases} -f, & j = O, \\ 0, & j \neq O, S, \\ f, & j = S, \end{cases} \quad (2)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij} \text{ для всех } (i, j). \quad (3)$$

В данной постановке f – максимизируемая переменная, соответствующая максимальному потоку.

При работе со сложными схемами, такими как ЕСГ, может быть несколько вариантов решения, т. е. несколько возможных максимальных потоков.

Тогда целесообразно говорить о минимизации затрат на доставку газа потребителям и использовать алгоритм Басакера–Гоуэна

$$\sum_{(i,j)} C_{ij} x_{ij} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Его применение позволяет определить максимальный поток ресурса при его минимальной стоимости или оптимальные объемы суточного отбора газа из резерва, максимально обеспечивающие заданные объемы газоснабжения потребителей при минимальных затратах на добычу, транспортировку газа и его отбор из ПХГ.

Здесь O – номер узла общего источника; S – номер узла общего стока; N_j^+ – подмножество «входящих» в узел j дуг; N_j^- – подмножество «выходящих» дуг из узла j ; f – величина суммарного потока по сети; x_{ij} – поток по дуге (i, j) ; d_{ij} – ограничения на поток по дуге (i, j) ; C_{ij} – удельные затраты на транспорт газа.

Задача о распределении энергоресурса по БТС также реализована в разных научных организациях. В качестве примера можно выделить программный комплекс моделирования потоков ЕСГ «ИРС ЕСГ» [4], оптимизационную производственно-финансовую модель развития газовой отрасли «Омо Газ», входящую в состав модельно-информационного комплекса SCANNER [5]. Среди зарубежных моделей следует выделить модель TIGER (Transport Infrastructure for Gas with Enhanced Resolution), применяемую для анализа газового рынка Европы в суточном разрезе [6]. Она представляет собой потоковую модель Европейской газотранспортной сети, в состав которой входят 900 дуг, представляющих собой участки газопроводов, и 600 узлов, представляющих собой источники газа, компрессорные станции, потребителей газа, подземные хранилища газа (ПХГ), терминалы приема сжиженного природного газа. В указанных комплексах отсутствуют возможности анализа последствий от чрезвычайных ситуаций в ГТС и не затрагиваются вопросы живучести и надежности функционирования ГТС. Поэтому ввиду отсутствия необходимого функционала эти программные комплексы не могут быть применены при рассмотрении проблем живучести и надежности функционирования СЭ.

3. ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «НЕФТЬ И ГАЗ РОССИИ»

При исследовании живучести ЕСГ и ЕСН по схеме, приведенной на рис. 1, исследователь сталкивается с проблемой обработки расчетной информации. В связи со значительными объемами информации, включающими в себя технологические характеристики около 50 объектов добычи нефти, 30 – газа, 80 – угля, около 700 источников электроэнергии, 32 потребителя сырой нефти, около 80 потребителей газа и столько же потребителей нефтепродуктов, более 2500 дуг транспорта, исследователь испытывает большие сложности с формированием четкой логической схемы работы исследуемых систем энергетики без достаточной степени наглядности. Наиболее сложно в такой ситуации определить слабые или «узкие» места, сдерживающие возможности удовлетворения потребности отдельных районов или существенно снижаю-

шие эффективность функционирования ЕСГ и ЕСН (увеличение затрат из-за необходимости использования более дорогих способов производства и транспорта ТЭР).

Для решения этих проблем в ИСЭМ СО РАН был разработан программно-вычислительный комплекс (ПВК) «Нефть и газ России», который позволяет следующее:

- проводить комплексное исследование условий работы нескольких отраслевых СЭ;
- получать на картографической основе наглядное отображение исходной информации и графической интерпретации рассчитанной на моделях информации о работе любого из объектов ЕСГ и ЕСН;
- исследовать возможности удовлетворения спроса потребителей на тот или иной энергоресурс и оказание реальной помощи в определении потенциальных «узких» мест при различных условиях работы СЭ.

При отображении результатов расчета возможные узкие места системы выделяются из общей массы объектов, для того чтобы именно на них обратил первоочередное внимание исследователь.

3.1. АРХИТЕКТУРА

Первоначально ПВК «Нефть и газ России» состоял:

- 1) из модуля ГАЗЕЛЬ, обеспечивающего расчет задачи потокораспределения (1)–(4) для ЕСГ [7];
- 2) модуля НЕФРИТ, реализующего задачу потокораспределения (1)–(4) для ЕСН [8];
3. интегрированной инструментальной среды для графической интерпретации результатов расчета на модулях ГАЗЕЛЬ и НЕФРИТ [9].

Далее внешние модули ГАЗЕЛЬ и НЕФРИТ были заменены библиотекой для решения задач целочисленного и смешанного целочисленного линейного программирования `lp_solve`, разработанного Михаелем Беркеларом из Технологического университета Эйндховена (Нидерланды) [10]. Решатель `lp_solve` был встроен в интегрированную инструментальную среду, которую в настоящее время можно назвать специализированной геоинформационной системой (ГИС) [11].

Архитектура ПВК «Нефть и газ России» постепенно менялась от монолитной к модульной по мере добавления новых модификаций задачи (1)–(4) (рис. 2).

Исходная информация по СЭ импортируется из внешнего источника данных. На основе исходной информации строится расчетная схема СЭ, представляющая собой ориентированный граф. В зависимости от цели исследования граф СЭ при расчете преобразуется в одну из следующих задач потокораспределения:

- нахождение максимального потока минимальной стоимости;
- оптимальное преобразование сети [12];
- распределение излишков добытого или выработанного энергоресурса.

Непосредственный расчет задачи потокораспределения осуществляется с помощью решателя `lp_solve`.

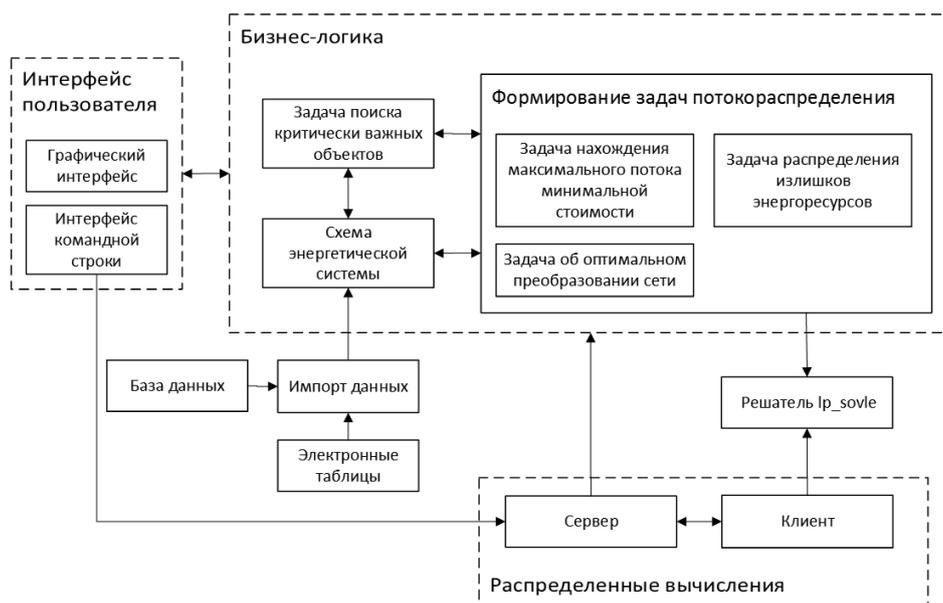


Рис. 2. Основные компоненты ПВК «Нефть и газ России»

Современная архитектура ПВК «Нефть и газ России» учитывает использование его модулей в распределенной вычислительной среде (РВС), поэтому в случае необходимости множественного расчета задачи потокораспределения может быть распределен по вычислительным узлам РВС. Для последних разработан расчетный модуль, вызываемый из командной строки.

Для однократных расчетов задачи потокораспределения и дальнейшего анализа результатов расчета используется специализированная ГИС. В ней схема ЕСГ и ЕСН представлены в виде электронной карты, состоящей из двух слоев с векторными данными. Первый слой, представленный точечными объектами, характеризует состояние производителей, а также показывает, полностью ли удовлетворены нужды потребителей энергоресурса. Второй слой, представленный линиями, дает представление о степени загруженности транспортной подсистемы. С точечными объектами первого слоя связывается атрибутивная информация о производстве и потреблении энергоресурса, а с линиями второго слоя – информация об участках магистральных трубопроводов (пропускная способность, количество труб, их диаметр и т. д.).

Характеристика текущего режима работы объектов СЭ определяется в результате расчета задачи потокораспределения и отображается цветом компонентов векторных слоев. Например, для производителей и транспорта ТЭР черный цвет означает, что объект работает в нормальном режиме с определенным запасом по производственным мощностям, красный – объект полностью загружен (никакого запаса по производственным мощностям нет), синий – объект не был задействован (по разным причинам, определяемым в ходе специального анализа).

3.2. БАЗА ДАННЫХ ЕСГ И ЕСН

Для хранения технологических характеристик объектов ЕСГ и ЕСН используются базы данных (БД) [13]. Структура БД ЕСГ и ЕСН ориентирована на объекты рассматриваемых трубопроводных систем. Для записи в базы данных выделены объекты добычи, хранения, потребления и транспорта. На рис. 3 изображена схема базы данных по объектам ЕСГ.

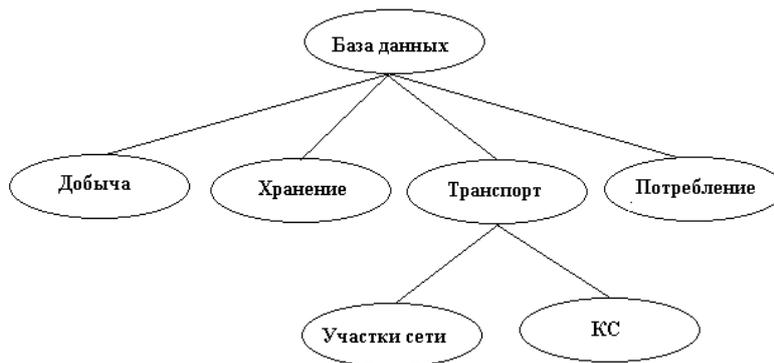


Рис. 3. Структура БД ЕСГ

- Объекты добычи в БД ЕСГ представлены совокупностью нескольких характеристик, включая объем добычи, запаса и отпускную цену производителя.
- ПХГ описаны следующими характеристиками: активный объем, максимальные возможности по закачке и отбору газа из ПХГ.
- Объекты потребления представлены величиной потребности в газе.
- Дуги представлены совокупностью следующих характеристик: пропускная способность, наличие и количество компрессорных станций, тариф на перекачку по дуге, длина дуги.

БД ЕСН состоит из двух взаимосвязанных частей: БД-нефть и БД-нефтепродукты, которые имеют схожую с БД ЕСГ структуру представления объектов. При исследовании работы системы нефтеснабжения НПЗ являются потребителями, а при исследовании работы системы нефтепродуктоснабжения НПЗ уже являются источниками, т. е. объекты нефтепереработки связывают между собой две части БД ЕСН.

В БД ЕСН учтена возможность транспортировки энергоресурсов как трубопроводным, так и дискретным транспортом.

Кроме всех описанных характеристик в БД ЕСГ и ЕСН хранятся реальные географические координаты объектов для корректного их отображения на расчетной схеме в специализированной ГИС.

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛИШКОВ ЭНЕРГОРЕСУРСА

Для решения проблемы наличия невостребованных излишков газа в ЕСГ предлагается изменение режимов функционирования ПХГ. Зимой ПХГ отдают газ в сеть, покрывая тем самым увеличенные объемы потребления газа в холодное время. Однако, в ситуации с возникновением невостребованных

излишков газа ПХГ должны иметь возможность перейти из категории источников газа в категорию его потребителей, тем самым сократив или полностью вместив в себя невостребованные объемы газа. Так как базовая модель определения максимального потока минимальной стоимости (1)–(4) не позволяет этого сделать, то ниже приведена следующая ее модификация, реализованная в ВПК «Нефть и газ России»:

$$f(x) \rightarrow \max \quad (5)$$

при условиях, что

$$0 \leq x_{ij} \leq a_{ij}d_{ij}, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_j^+} x_{ij} - \sum_{i \in N_j^-} x_{ji} = \begin{cases} -f, & j = O, \\ 0, & j \neq O, S, \\ f, & j = S, \end{cases} \quad (7)$$

где a_{ij} – целочисленная переменная, служащая для включения или отключения потока по дуге из узла i в узел j .

Каждое из хранилищ энергоресурсов представлено отдельными источником и потребителем, поэтому необходимо ввести дополнительное уравнение для хранилищ энергоресурсов, которое свяжет их в один объект:

$$a_{oi} + a_{js} = 1, \quad (8)$$

где i – номер хранилища как источника энергоресурсов, j – номер хранилища как потребителя.

Здесь

$$\begin{aligned} a_{oi} &\in \{0, 1\}, \quad i \in N^{\text{ист}}, \\ a_{js} &\in \{0, 1\}, \quad j \in N^{\text{пот}}, \\ a_{ij} &= 1, \quad i, j \notin N^{\text{ист}} \cup N^{\text{пот}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $N^{\text{ист}}$ – подмножество хранилищ во множестве источников энергоресурсов; $N^{\text{пот}}$ – подмножество хранилищ во множестве потребителей энергоресурсов.

Так как задача (5)–(9) имеет не единственное решение, то далее решается задача о максимальном потоке минимальной стоимости:

$$\sum_{(i,j)} C_{ij}x_{ij} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Модель (5)–(10) является задачей смешанного целочисленного линейного программирования.

Таким образом, модель распределения излишков газа позволяет автоматически переключать режимы функционирования ПХГ, т. е. когда это необходимо, переводить ПХГ из источников газа в его потребителей, и наоборот.

В качестве примера работы модели (5)–(10) рассмотрим возможную ситуацию с кратковременным прекращением транзита газа в Европу через Украину. В результате реализации такой ЧС европейские страны не получают 165 млн м³ газа в сутки. Газ в таком объеме останется в ГТС России (табл. 1).

Таблица 1

Невостребованные объемы газа при прекращении транзита газа через Украину для условий декабря 2013 г.

Добыча газа по федеральным округам	Возможный, млн м ³ /сут	Расчетный, млн м ³ /сут	Резерв, млн м ³ /сут
Северо-Западный	5	5	0
Центральный	0	0	0
Приволжский	48,7	48,7	0
Южный	46,4	46,4	0
Уральский	1467	1302	165
Сибирский	13,4	13,4	0
Всего по России	1580,5	1415,5	165

Указанный в табл. 1 в графе «Резерв» объем газа – это добываемый газ, не пошедший потребителям внутри страны и на экспорт, его необходимо распределить в ГТС России. В это же время идет следующий отбор газа из ПХГ в сеть (табл. 2).

Таблица 2

Отбор газа из ПХГ для условий декабря 2013 г.

Отбор газа из ПХГ по федеральным округам	Возможный, млн м ³ /сут	Расчетный, млн м ³ /сут	Резерв, млн м ³ /сут
Северо-Западный	21,4	6	15,4
Центральный	112,4	15	97,4
Приволжский	155,3	52	103,3
Южный	46,3	0	46,3
Уральский	35	35	0
Сибирский	0	0	0
Всего по России	370,4	108	262,4

Из данных табл. 6 видно, что максимально возможный отбор газа из российских ПХГ может достигать до 370 млн м³ газа в сутки. В декабре 2013 года отбор газа из ПХГ был 108 млн м³ газа в сутки.

В заданной ситуации, при кратковременном прекращении транзита газа в Европу через Украину в декабре 2013 года, модель (5)–(10) прекратит отбор

газа из ПХГ, снизив излишки газа до 57 млн м³ газа в сутки ($57 = 165 - 108$). Оставшийся газ будет распределен по ПХГ, т. е. ПХГ из источников газа станут его потребителями (табл. 3).

Таблица 3

Закачка газа в ПХГ для условий декабря 2013 г.

По федеральным округам	Возможная, млн м ³ /сут	Расчетная, млн м ³ /сут
Северо-Западный	21,4	2
Центральный	112,4	10
Приволжский	155,3	25
Южный	46,3	0
Уральский	35	20
Сибирский	0	0
Всего по России	370,4	57

Отбор газа из ПХГ в сеть и закачка газа в ПХГ осуществляются по одним и тем же газопроводам, поэтому максимально возможный объем закачки газа в ПХГ будет равен максимально возможному объему отбора газа из ПХГ. В данном случае излишки газа будут распределены по ПХГ Северо-Западного, Центрального, Приволжского и Уральского федеральных округов. В результате такого потокораспределения, выполненного моделью (5)–(10) в рамках рассмотренной ситуации, в ГТС России не останется неостребованного газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью создания ПВК «Нефть и газ России» была поддержка исследований живучести ЕСГ и ЕСН, при этом особое внимание уделяется исследованию возможностей функционирования их транспортных составляющих.

ПВК «Нефть и газ России» позволяет следующее:

- проводить комплексное исследование возможностей функционирования ЕСГ и ЕСН как в нормальных условиях, так и в условиях чрезвычайной ситуации;
- оперативно выявлять «узкие» места в работе исследуемых СЭ;
- графически отображать сеть системы трубопроводного транспорта в удобном для исследователя виде;
- представлять исследователю как исходную, так и расчетную информацию о любом объекте ЕСГ или ЕСН, а также подробную картину степени удовлетворения как отдельных потребителей, так и их групп нефтью, газом и нефтепродуктами.

Использование электронных карт для отображения пространственно-распределенных данных СЭ дает возможность исследователю анализировать состояние СЭ на более высоком качественном уровне. Электронные карты

помогают исследователю получить целостную оценку состояния СЭ, составить список объектов СЭ, требующих первоочередного внимания, быстро определить «узкие» места, ограничивающие поток ресурсов к потребителям.

Помимо этого были разработаны следующие модели и методики, реализованные в ПВК «Нефть и газ России»:

- базовая модель нахождения максимального потока минимальной стоимости;
- модель оптимального преобразования сети и методика определения «узких» мест в работе ЕСГ и ЕСН с позиций обеспечения их живучести;
- модель распределения излишков энергоресурса, позволяющая исследовать режим функционирования хранилищ энергоресурсов.

Таким образом, использование ПВК «Нефть и газ России» позволяет провести менее трудоемкий, а главное – наиболее качественный и эффективный анализ ситуации и осуществить выбор соответствующих действий или мероприятий при конкретных сценариях возмущений, что позволит в дальнейшем, основываясь на многоитерационных расчетах, экспертным путем выявить наиболее рациональные пути повышения живучести СЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев и др. – Новосибирск: Наука, 1998. – 302 с.
2. Программное и информационное обеспечение решения задач живучести Единой системы газоснабжения СССР / А.В. Храмов др. // Методы и модели исследования живучести систем энергетики / под ред. Ю.Н. Руденко. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 86–91.
3. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Потоки в сетях: пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 276 с.
4. Трубопроводные системы энергетики: математическое и компьютерное моделирование / Н.Н. Новицкий и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – 274 с.
5. SCANNER: модельно-информационный комплекс / Ф.В. Веселов, О.А. Елисеева, В.А. Кулагин, В.А. Малахов, Т.А. Митрова, С.П. Филиппов. – М.: ИНЭИ РАН, 2011. – 38 с.
6. Lochner S., Dieckhöner C. TIGER: Infrastructure and dispatch model of the European gas market – model description. – Cologne, Germany: EWI, 2010.
7. Lochner S. Identification of congestion and valuation of transport infrastructures in the European natural gas market // Energy. – 2011. – Vol. 36, iss. 5. – P. 2483–2492.
8. Lochner S., Bothe D. From Russia with gas: an analysis of the Nord Stream pipeline's impact on the European gas transmission system with the TIGER-model / Institute of energy economics at the University of Cologne. – Cologne, Germany, 2007. – (EWI Working Paper; N 07.02).
9. Lochner S., Richter J. The impact of recent gas market development on long-term projections for global gas supply // Zeitschrift für Energiewirtschaft. – 2010. – Vol. 34, iss. 1. – P. 61–69.
10. Клименко С.М., Сендеров С.М., Янченко В.А. Исследование проблем повышения устойчивости и экологической безопасности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов // Новые информационные технологии управления развитием и функционированием трубопроводных систем энергетики. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1993. – С. 119–127.
11. Еделев А.В., Сендеров С.М. Интегрированная инструментальная среда ПВК «Нефть и газ России» // Информационные технологии в энергетике: современные подходы к анализу и обработке информации: сборник докладов. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000. – С. 165–169.
12. Mixed integer linear programming (MILP) solver lp_solve [Electronic resource]. – URL: <http://sourceforge.net/projects/lpsolve> (accessed: 12.04.2016).
13. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 290 с.
14. Еделев А.В., Воробьев С.В. Методика определения узких мест в работе больших трубопроводных систем // Программные продукты и системы. – 2014. – № 3. – С. 174–176.

15. Еделева А.В., Еникеева С.М., Сендеров С.М. Информационное обеспечение при исследовании вопросов функционирования больших трубопроводных систем // Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4, № 5. – С. 30–35.

Воробьев Сергей Валерьевич, инженер Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Еделева Алексей Владимирович, кандидат технических наук, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Features of mathematical modeling in the distribution of natural gas excess in the Russian Unified Gas Supply System*

S.V. VOROB'EV¹, A.V. EDELEV²

¹ *Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: seregavorobev@isem.irk.ru*

² *Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation, Ph D. E-mail: flower@isem.irk.ru*

This article describes the software complex "Oil and Gas of Russia" and demonstrated its application in considering the vitality of large pipeline systems. At the core of the software complex is a flow-oriented model for assessing production capacities of gas, oil and oil products supply systems. Mathematically the Unified Gas Supply System and the Unified System of Russian Oil Supplies are represented as networks varying with time in whose nodes are located enterprises for production, conversion and consumption of material flows which realize material links between enterprises. While assessing the system state after a disturbance a minimum energy shortage at the lowest delivery cost at the consumer end is a flow distribution optimality criterion. To calculate the flow distribution and to analyze the results of calculations in the software complex "Oil and Gas of Russia" a specialized geoinformation system is used. In this system the Unified Gas Supply System in the Unified Oil Products Supply System is presented in the form of an electronic map consisting of layers of vector data reflecting the status of producers and needs of energy consumers as well as with lines that give an idea of the degree of the transport subsystem congestion. Specialized databases are used to store technological characteristics of the Unified Gas Supply System and the Unified System of Oil Products Supply objects. The structure of the databases is focused on the pipeline systems under study. Objects of production, storage, transportation and consumption of energy are taken to enter into databases. As an example of the software complex "Oil and Gas of Russia" application the calculation of the possible gas excess distribution in the Unified Gas Supply System of Russia on a short-term reduction of Russian gas exports to Europe is given in the paper.

Keywords: Software complex, energy systems, geoinformation system, fuel supply, energy supply, vitality, flow model, underground gas storage

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-181-194

* Received 02 September 2015.

REFERENCES

1. Bushuev V.V., Voropai N.I., Mastepanov A.M., Shafranik Yu.K. et al. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii* [Energy security Russia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998. 302 p.
2. Khramov A.V., Enikeeva S.M., Khrustaleva N.M. et al. Programmnoe i informatsionnoe obespechenie resheniya zadach zhivuchesti Edinoi sistemy gazosnabzheniya SSSR [The software and information support for solving Unified Gas Supply System survivability USSR]. *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki* [Methods and models of research vitality energy systems]. Ed. by Yu.N. Rudenko. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, pp. 86–91.
3. Ford L.R., Fulkerson D.R. *Flows in networks*. Princeton, Princeton University Press, 1962. 194 p. (Russ. ed.: Ford L.R., Falkerson D.R. *Potoki v setyakh*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1966. 276 p.).
4. Novitskii N.N., Sukharev M.G., Sardanashvili S.A. et al. *Truboprovodnye sistemy energetiki: matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie* [Energy pipeline systems: mathematical and computer modeling]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014. 274 p.
5. Veselov F.V., Eliseeva O.A., Kulagin V.A., Malakhov V.A., Mitrova T.A., Filippov S.P. *SCANER: model'no-informatsionnyi kompleks* [SCANER: model-information complex]. Moscow, ERI RAS Publ., 2011. 38 p.
6. Lochner S., Dieckhöner C. *TIGER: Infrastructure and dispatch model of the European gas market – model description*. Cologne, Germany, EWI, 2010.
7. Lochner S. Identification of congestion and valuation of transport infrastructures in the European natural gas market. *Energy*, 2011, vol. 36, iss. 5, pp. 2483–2492.
8. Lochner S., Bothe D. *From Russia with gas: an analysis of the Nord Stream pipeline's impact on the European gas transmission system with the TIGER-model*. Institute of Energy Economics at the University of Cologne. *EWI Working Paper*, no. 07.02. Cologne, Germany, 2007.
9. Lochner S., Richter J. The impact of recent gas market development on long-term projections for global gas supply. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 2010, vol. 34, iss. 1, pp. 61–69.
10. Klimenko S.M., Senderov S.M., Yanchenko V.A. Issledovanie problem povysheniya ustoychivosti i ekologicheskoi bezopasnosti magistral'nykh nefte- i nefteproduktoprovodov [Study of the problems of environmental sustainability and enhance the safety of trunk oil and product pipelines]. *Novye informatsionnye tekhnologii upravleniya razvitiem i funktsionirovaniem truboprovodnykh sistem energetiki* [New information technology management development and operation of pipeline systems of energy]. Irkutsk, SEI SB RAS Publ., 1993, pp. 119–127.
11. Edelev A.V., Senderov S.M. [Integrated tool environment SC "Oil and gas of Russia"]. *Informatsionnye tekhnologii v energetike: sovremennye podkhody k analizu i obrabotke informatsii: sbornik dokladov* [Information technologies in the energy sector: modern approaches to the analysis and processing of information. The collection of reports]. Irkutsk, ESI SB RAS Publ., 2000, pp. 165–169.
12. Mixed integer linear programming (MILP) solver lp_solve. Available at: <http://sourceforge.net/projects/lpsolve> (accessed 12.04.2016)
13. Tsvetkov V.Ya. *Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii* [Geographic information systems and technologies]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1997. 290 p.
14. Edelev A.V., Vorob'ev S.V. Metodika opredeleniya uzkiikh mest v rabote bol'shikh truboprovodnykh sistem [Methods of determining the bottlenecks of large pipeline systems]. *Programmnye produkty i sistemy – Software and Systems*, 2014, no. 3, pp. 174–176.
15. Edelev A.V., Enikeeva S.M., Senderov S.M. Informatsionnoe obespechenie pri issledovanii voprosov funktsionirovaniya bol'shikh truboprovodnykh sistem [Informational support for the study of issues in the great pipeline systems]. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational technologies*, 1999, vol. 4, no. 5, pp. 30–35.