

---

---

УДК 622.691.019.3(470)

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕЧНЕЙ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ И ИХ СОЧЕТАНИЙ С ПОЗИЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ

© 2019 г. С. М. Сендеров<sup>1</sup>, С. В. Воробьев<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелетьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*e-mail: seregavorobev@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 15.10.2018 г.

Статья посвящена вопросам поиска критически важных объектов газовой отрасли России и их наиболее важных сочетаний с другими объектами газовой отрасли с позиций энергетической безопасности государства и газопотребляющих регионов. Представлены показатели, характеризующие критичность данных объектов и их сочетаний с позиций работоспособности системы. Представлен алгоритм распределения таких объектов по перечням федерального и регионального уровня. Сформирован перечень критически важных объектов газовой отрасли федерального уровня, включающий в себя наряду с объектами газотранспортной сети головные станции месторождений и отдельные подземные хранилища природного газа. Представлен перечень критически важных сочетаний объектов газовой отрасли с позиций обеспечения энергетической безопасности страны и регионов.

*Ключевые слова:* газовая отрасль, критически важные объекты, работоспособность системы, энергетическая безопасность

DOI: 10.1134/S0002331019010114

### ВВЕДЕНИЕ

При управлении развитием топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны необходимо учитывать требования энергетической безопасности. По-крупному, таких требований – два. Первое из них – долгосрочное бездефицитное обеспечение внутренних потребителей страны всеми необходимыми видами топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и выполнение в полном объеме обязательств государства по экспортным поставкам российских ТЭР при функционировании ТЭК в штатных условиях. Второе требование – создание условий для обеспечения внутренних потребителей страны всеми видами ТЭР и экспортных поставок российских ТЭР при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС), не допуская значительных по объёмам и продолжительности перерывов в поставке конечных видов энергии. При этом должны учитываться обязательства, как по внутренним, так и по экспортным поставкам ТЭР. В данном случае под ЧС может подразумеваться частичный или полный выход из строя одновременно ограниченного числа объектов. Возможно рассмотрение и крупномасштабных критических ситуаций, когда объекты ТЭК (или отдельных систем энергетики (СЭ)) вынуждены функционировать в нештатном режиме на территории нескольких регионов и даже федеральных округов, к примеру, в условиях значительных похолоданий или любых других крупных внешних (по отношению к ТЭК) воздействий.

Учет второго требования связан с необходимостью тщательно обоснованного выделения *критически важных объектов (КВО) ТЭК и СЭ*, то есть тех объектов, частичный или полный выход из строя которых в разных условиях может существенным образом снизить производственные возможности СЭ и ТЭК в целом и привести к значительным дефицитам в поставках соответствующих видов энергии. ТЭК и СЭ в разное время рассматриваемой перспективы могут и должны иметь разные перечни КВО. Это объясняется тем, что с течением времени постепенно изменяется конфигурация энерготранспортных коммуникаций и загрузка узлов, как потребления, так и производства. Одни объекты со временем могут потерять свою значимость, но могут появиться новые более значимые объекты, выход из строя которых критическим образом повлияет на производственные возможности СЭ или ТЭК страны. Анализ взаимосвязанной работы отраслевых СЭ в рамках единого ТЭК позволит понять — какие КВО из перечней таких объектов выявленных для отдельных СЭ могут быть включены в перечень КВО уровня ТЭК. Критерием такого отбора может быть уровень негативных последствий для потребителей при выходе из строя конкретного КВО одной из СЭ при учете компенсирующих способностей самого ТЭК по снижению негативных последствий (взаимозаменяемость ТЭР, диверсификация их источников и т.д.). При рассмотрении данной темы необходимо так же обратить внимание и на важнейшие с позиций энергетической безопасности сочетания объектов СЭ. Как и в случае КВО идет речь о тех сочетаниях объектов СЭ (пока речь идет о сочетаниях по два объекта) выход из строя которых может сопровождаться значительными ограничениями соответствующих поставок энергетических ресурсов потребителям. Выявление КВО в ТЭК и формирование их перечня и перечня наиболее важных сочетаний энергетических объектов позволяет эффективно решать задачи анализа и минимизации последствий реализации разного рода угроз, чреватых возникновением кризисных и чрезвычайных ситуаций на объектах ТЭК, а также задачи заблаговременной подготовки этих объектов к работе в данных условиях. При этом решается задача концентрации материальных, денежных и людских ресурсов на решении проблем повышения устойчивости функционирования именно выделенных объектов ТЭК без распыления ограниченных, как правило, ресурсов.

### АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕЧНЕЙ КВО СЭ

Сегодня главенствующая роль в ТЭК страны принадлежит природному газу. Его доля в балансе котельно-печного топлива (КПТ) составляет в целом по России 74%. Однако, для районов европейской части и Урала (где проживает 88% населения РФ) эта доля в ряде регионов доходит до 90–95%, а в отдельных субъектах РФ — до 98–99%. На основании сказанного выше, на первом этапе рассмотрения проблем выделения КВО в ТЭК страны остановимся на Единой системе газоснабжения (ЕСГ) страны (включая экспортные выходы российского газа за ее пределы и входы импортного газа на территорию России). На примере ЕСГ рассмотрим следующие вопросы:

- разработка алгоритма выявления КВО конкретной системы;
- оценка роли конкретных КВО в обеспечении работоспособности конкретной СЭ в условиях реализации различного рода ЧС;
- формирование перечня мероприятий по минимизации негативных последствий от снижения уровня работоспособности каждого выделенного КВО рассматриваемой СЭ;
- обоснование перечня инвариантных мероприятий по минимизации негативных последствий от действия разного рода ЧС на выделенных КВО рассматриваемой СЭ, с учетом возможных одновременных сочетаний ЧС на разных объектах.

С позиций энергетической безопасности в качестве КВО СЭ могут быть признаны два типа объектов:

- объекты, прекращение работы которых может вызвать существенные недопоставки соответствующих ТЭР в целом по стране (дефицит в относительной величине  $\delta_{\text{сум}}$  и

более от суммарной потребности страны в данном виде ТЭР). Такие объекты можно считать КВО СЭ федерального уровня;

– объекты, не входящие в перечень федеральных КВО по данной системе, но прекращение работы которых может вызвать существенные недопоставки соответствующих ТЭР хотя бы в один из регионов (дефицит в относительной величине  $\delta_{\text{рег}}$  и более от суммарной потребности региона в данном виде ТЭР). Такие объекты можно считать КВО СЭ регионального уровня.

Ранее [1, 2] уже проводились результаты исследований посвященных выявлению КВО в газотранспортной сети. Был определен перечень пересечений магистральных газопроводов (МГ) в ЕСГ России, нарушение работы которых способно привести к относительному дефициту суточных поставок газа по системе в целом в размере 5% и более. Также проводились исследования по поиску сочетаний отдельных участков МГ, одновременное нарушение функционирования которых может привести к дефициту суточных поставок газа по системе в целом в размере 5% и более [3, 4]. Таким образом, в качестве  $\delta_{\text{сум}}$  по газовой отрасли в этих исследованиях была принята величина в 5%. В качестве  $\delta_{\text{рег}}$  в первом приближении может использоваться величина в 30%. При этом нужно понимать, что данные величины пока весьма условны, для их комплексного обоснования необходимо проведение специальных исследований.

Алгоритм формирования перечней КВО регионального и федерального уровней конкретной СЭ представлен на рис. 1.

### ХАРАКТЕРИСТИКА РАСЧЕТНОЙ СЕТИ

Обратимся к реальной ситуации в газовой отрасли России. В 2017 г. в России было добыто чуть более 690 млрд м<sup>3</sup> газа (обычный сетевой природный газ и попутный газ нефтяных месторождений), импортировано в страну 8 млрд м<sup>3</sup> природного газа (из среднеазиатских стран). В этом же 2017 г. внутреннее потребление (вместе с собственными нуждами газовой отрасли) составило 472 млрд м<sup>3</sup>, а экспортные поставки составили 226 млрд м<sup>3</sup>, в т.ч. в дальнее зарубежье было поставлено чуть более 192 млрд м<sup>3</sup>.

В стране функционирует ЕСГ с разветвленной системой МГ, охватывающих большую часть территории России. Сложившаяся территориальная структура системы газоснабжения России обладает рядом существенных недостатков. Фактически, основной потребитель газа внутри страны – ее европейская часть – расположен в 2–2.5 тыс. км от мест добычи этого газа. Сегодня более 85% всего российского газа добывается в северных районах Тюменской области (СРТО). Причем, из СРТО весь этот газ транспортируется на дальние расстояния с помощью газотранспортных многониточных коридоров с колоссальной концентрацией газовых потоков в одном коридоре. Эти коридоры имеют большое число взаимных пересечений и перемычек. Сами нитки в одном коридоре могут находиться друг от друга на очень малом расстоянии. В настоящее время в газотранспортной системе России можно выделить более 20-ти потенциально опасных для функционирования ЕСГ пересечений МГ. Нарушение работы некоторых из них может привести к ограничению до 85% поставки газа внутренним потребителям в целом по стране или к практически полному прекращению поставок газа на экспорт (при сохранении 50%-го ограничения поставок газа внутренним потребителям).

В исследованиях, проводимых ранее [1, 2] уже были показаны объекты, характеризующиеся как КВО газотранспортной сети России. В то же время вопрос об остальных объектах газовой отрасли на предмет их отнесения к перечню КВО с позиций ЭБ до сих пор не ставился. Наряду с крупными пересечениями МГ на узловых компрессорных станциях и вне их, важнейшими объектами газовой отрасли с позиций ее работоспособности являются головные компрессорные станции на выходах с месторождений и подземные хранилища газа (ПХГ).

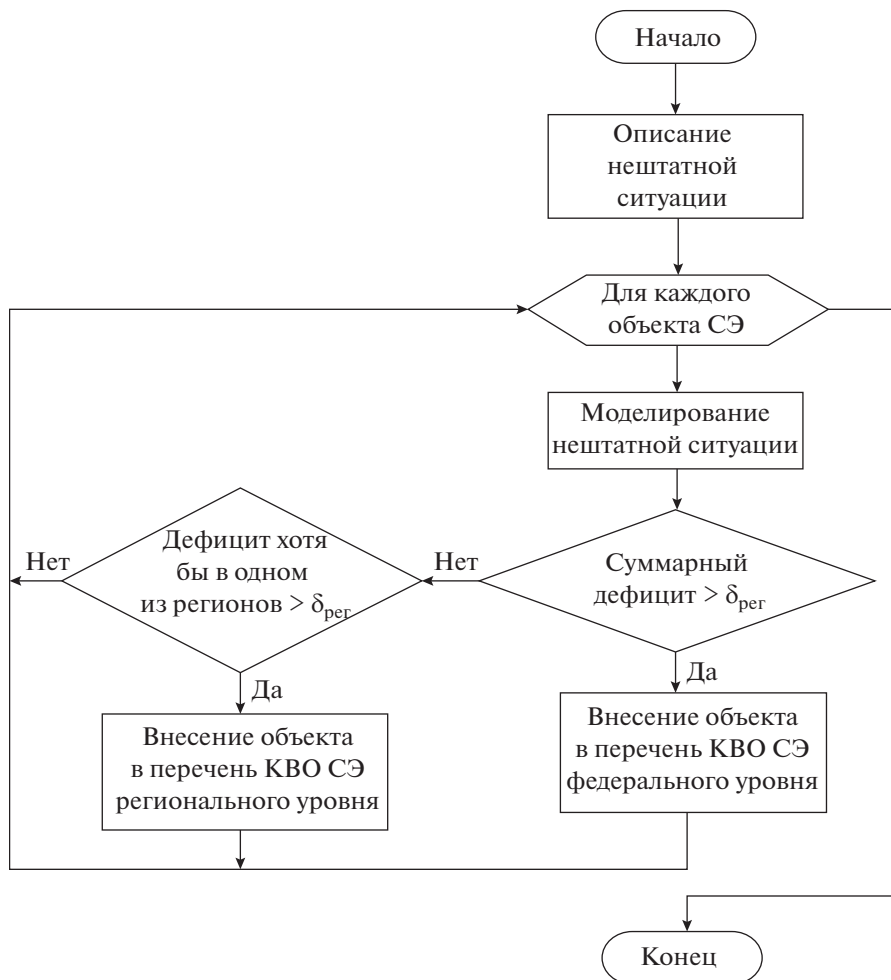


Рис. 1. Алгоритм формирования перечней КВО регионального и федерального уровней конкретной СЭ.

Так, в настоящее время, в газотранспортной сети России функционируют 22 ПХГ, за пределами РФ – еще 5 ПХГ (3 – в Белоруссии, по одному в Армении и Германии) группы “Газпром”, еще 7 ПХГ (в которых группа “Газпром” участвует в качестве соинвестора) функционируют в газопроводной сети на территории Европейских государств [5]. Все эти ПХГ учтены в специально разработанной потоковой модели газовой отрасли (в рамках ПВК “Нефть и газ России”) [1, 2, 6], которая с достаточным уровнем агрегирования позволяет анализировать все аспекты функционирования не только ЕСГ России, но и технологически связанных с ней ГТС европейских стран. Расчетная схема модели содержит 382 узла, включая указанные выше ПХГ, 28 источников газа (в модели это головные компрессорные станции (КС), 64 потребителя газа, 268 узловых КС, а также 628 дуг, представляющих коридоры МГ и отдельные МГ, а также отводы на распределительные сети.

В дополнение, к сказанному выше, в данной статье предлагается рассмотреть критически важные сочетания объектов газовой отрасли. То есть нужно определить такие

объекты, выход из строя которых в паре с одним из КВО приведет к возникновению значимо большего дефицита газа у потребителей, чем при выходе из строя этих объектов по отдельности. После определения возможных критически важных сочетаний объектов в каждом конкретном случае необходимо проанализировать возможности обхода узких мест (в условиях выхода из строя данных объектов) путем кратковременного увеличения пропускных способностей отдельных участков газотранспортной сети. Такой обход позволит минимизировать дефицит газа у потребителей в сложившихся условиях. В результате проведения таких мер значимость ряда потенциальных критически важных объектов газовой отрасли и их сочетаний может быть снижена. На этой основе наряду с формированием ранжированного по степени значимости перечня КВО газовой отрасли можно будет сформировать такой же перечень критически важных сочетаний ее объектов.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В проводимом исследовании как для определения самих КВО, так и для поиска критически важных сочетаний объектов была использована потоковая модель, являющаяся ядром программно-вычислительного комплекса (ПВК) “Нефть и газ России” [7, 8]. Применение этого ПВК позволяет определить степень удовлетворения потребностей в газе внутри страны и обеспечения экспортных поставок в различных условиях работы ЕСГ. Кроме того, ПВК “Нефть и газ России” позволяет определить “узкие” места – участки ГТС, в ряде случаев ограничивающие производственные возможности системы.

Модель потокораспределения в ЕСГ, используемая в ПВК “Нефть и газ России”, предназначена для оценки производственных возможностей ЕСГ в условиях различного рода возмущений. Цель таких исследований – минимизация дефицитов газа по узлам потребления. ЕСГ в модели представлена, как совокупность трех подсистем: источники газа, сеть магистрального транспорта газа и его потребители.

Математически рассматриваемая связанная ГТС представлена 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. в данном случае модель формализуется как задача о максимальном потоке [9, 10]. Расчетный граф дополняется двумя фиктивными узлами:  $O$  – суммарный источник,  $S$  – суммарный сток, при этом вводятся дополнительные участки, соединяющие узел  $O$  со всеми источниками и всех потребителей с узлом  $S$ . Математическая запись поставленной задачи имеет следующий вид:

$$\max f \tag{1}$$

при условиях, что

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

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

Здесь  $N_j^+$  – 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  $(i, j)$ .

Задача (1)–(3) о максимальном потоке в общем случае имеет не единственное решение, то есть может быть найдено несколько возможных максимальных потоков. Тогда целесообразно говорить о минимизации затрат на доставку газа потребителям и использовать алгоритм Басакера–Гуэна [10], решая задачу о максимальном потоке минимальной стоимости:

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

где  $C_{ij}$  – цена или удельные затраты на транспорт энергоресурса.

Комплексный подход к решению поставленных задач по всей технологической цепочке ЕСГ позволяет получить общую оценку производственных возможностей всей системы в экстремальных условиях. Результат решения задачи – определение возможностей удовлетворения потребителей сетевым газом с выявлением объемов возможных недопоставок газа в узлы потребления при той или иной нештатной ситуации. На основании данных результатов можно получить список объектов, а также список сочетаний объектов газовой отрасли, прекращение работы которых приведет к потенциальному дефициту газа в сети. Ранжируем этот список по относительной величине дефицита газа в сети. Путем отсекаемых объектов, вывод которых приведет к потенциальному дефициту газа в сети меньшему, чем ранее назначенное значение, к примеру, в 5%, можно получить перечень КВО газовой отрасли. Такой перечень также должен быть ранжирован по степени влияния на работоспособность сети. Тот же механизм относится и к процедуре определения критически важных сочетаний объектов газовой отрасли.

При возникновении дефицита газа у потребителей, вызванного нехваткой пропускных возможностей соответствующих газотранспортных дуг, другие такие дуги, не затронутые рассматриваемым нарушением, могут принять для транспортировки увеличенные объемы газа. В такой ситуации изменяется структура загрузки сети и возможно проявление недостатка пропускных способностей на определенных участках ГТС. Последующая расшивка узких мест в ГТС позволит минимизировать дефициты газа у потребителей в условиях отключения каких-либо объектов газовой отрасли и их сочетаний.

ПВК “Нефть и газ России” позволяет исследователю при анализе результатов расчета выделить потенциальные узкие места или участки сети, ограничивающие работоспособность системы. Чаще всего именно такие объекты могут стать причиной недопоставки необходимого количества газа потребителям. В то же время без дополнительного моделирования невозможно найти реальные узкие места ограничивающие возможности ГТС по поставке газа потребителям в каждом анализируемом случае.

Результатом решения задачи (1)–(4) являются величина максимального потока по системе и значения дефицита газа у потребителей. Понятно, что для компенсации дефицита газа у потребителей величина потока должна стать больше полученной при решении данной задачи. Ниже представлен путь поиска участков сети, на которых стоит добиваться увеличения пропускных способностей, чтобы получить поток необходимой величины. Такая задача о соответствующем преобразовании сети может быть записана в следующем виде:

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

при условиях

$$\sum_{i \in N_j^+} (x_{ij} + y_{ij}) - \sum_{i \in N_j^-} (x_{ij} + y_{ij}) = \begin{cases} -f, & j = O \\ 0, & j \neq O, S, \\ f, & j = S \end{cases} \quad (6)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij}, \text{ для всех } (i, j) \quad (7)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq b_{ij}, \text{ для всех } (i, j), \quad (8)$$

где  $N_j^+$  – 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  $(i, j)$ ;  $y_{ij}$  – приращение потока по дуге  $(i, j)$ ;  $b_{ij}$  – ограничение на приращение потока по дуге  $(i, j)$ .

В данной ситуации также может быть несколько вариантов решения, то есть несколько возможных максимальных потоков. Тогда целесообразно говорить о поиске минимального из них по стоимости доставки ресурса потребителю:

$$\sum_{(i,j)} C_{ij}x_{ij} + \sum_{(i,j)} A_{ij}y_{ij} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $C_{ij}$  – цена или удельные затраты на поток по дуге  $(i, j)$ ;  $A_{ij}$  – цена или удельные затраты на поток по приращению  $y_{ij}$ .

При этом, удельные затраты на транспорт газа по приращению  $y_{ij}$  могут значительно превосходить удельные затраты на транспорт газа в рамках начальной пропускной способности дуги  $d_{ij}$ .

Понятно, что приращения потока  $y_{ij}$  большие нуля будут наблюдаться на тех дугах, которые являются искомыми узкими местами. Определяются величины этих приращений в результате решения задачи будут те объекты, для которых после решения задачи (5)–(9).

Для решения задачи обхода найденных узких мест в модель потокораспределения заложена возможность приращения потока газа по дугам в пределах 10% от величины их пропускной способности. Такое кратковременное увеличение пропускной способности участка МГ возможно при увеличении рабочей мощности компрессоров на крупных магистральных КС [11]. В итоге повышения рабочего давления в газопроводе достигается увеличение пропускной способности участка магистрального газопровода в пределах до 10%. В результате (посредством использования технических возможностей ГТС) решается задача минимизации дефицитов газа у потребителей.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ КВО ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

На представленной выше модели газовой отрасли России были проведены соответствующие исследования. Исходные условия для расчетов следующие: средние сутки максимального потребления газа в сети, на основании статистики о потреблении газа по регионам в январе 2017 г. В такие сутки работу сети можно считать предельно напряженной относительно средней годовой загрузки. Суммарный поток газа по сети в такие сутки, учитывая экспортные поставки, составил округленно 2250 млн м<sup>3</sup>. Результаты этих исследований показали, что потенциальный дефицит газа у потребителей будет наблюдаться при прекращении работы 441 объектов газовой отрасли России (242 узла и 199 дуг сетевого расчетного графа). Порог попадания в перечень КВО при потенциальном дефиците газа ( $\delta_{\text{сум}}$  в 5% от суммарной потребности в газе) в условиях отключения одного из таких объектов преодолел 61 объект. Эти объекты и были отнесены к перечню КВО федерального уровня по газовой отрасли. Среди этих объектов

**Таблица 1.** Расчетные относительные дефициты газа в сети в максимально напряженные сутки января 2017 г. при отключении объектов отнесенных к федеральным КВО ЕСГ

Порядковый номер КВО в ранжированном перечне	Тип объекта	Дефицит газа в системе при отключении КВО, %
1, 2, 3, 4	Узел	21
5, 6, 7	Дуга	21
8	Узел	19
9, 13, 14	Дуга	16
10*, 11, 12, 15	Узел	16
16	Дуга	12
17, 18, 19, 22, 23	Узел	10
20, 21	Дуга	10
24	Узел	9
25, 26, 28*	Узел	8
27	Дуга	8
29, 31, 33, 35, 37, 39, 41	Дуга	7
30*, 32, 34, 36, 38, 40	Узел	7
42, 48, 50	Дуга	6
43*, 44*, 45, 46**, 47, 49, 51	Узел	6
52, 55, 56, 59, 60	Дуга	5
53, 54, 57, 58, 61	Узел	5

\* Узел относится к объектам добычи, т.е. к ГКС на выходах с месторождений.

\*\* Узел относится к объектам подземного хранения газа (ПХГ).

25 дуг между узловыми КС и 36 узлов, в числе которых 30 узловых КС, 5 головных КС на выходах с крупных газовых месторождений и одно ПХГ. Информация о расчетных величинах относительных дефицитов газа в сети при отключении конкретных узлов и дуг в ранжированном по степени уменьшения дефицита газа виде представлена в табл. 1 (реальные наименования объектов ЕСГ в данной статье заменены на условные номера).

Из данных табл. 1 видно, что при отключении каждого из первых восьми объектов ранжированного списка КВО газовой отрасли федерального уровня относительный дефицит газа в системе может составить порядка 20% от необходимой суммарной поставки. Отключение каждого из следующих 15 объектов может привести к ограничению потока по системе в пределах 10–16%. Отключение всех остальных объектов из перечня КВО может спровоцировать относительный дефицит газа в системе в пределах 5–9%.

### ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ СОЧЕТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Для поиска критически важных сочетаний объектов газовой отрасли использована та же модель потокораспределения газа в сети, являющаяся основой ПВК “Нефть и газ России”.

После того, как выше был сформирован перечень КВО газовой отрасли с позиций обеспечения ее работоспособности, на данной расчетной схеме были проведены расчеты по определению критически важных сочетаний объектов ЕСГ с каждым отдельно взятым КВО. Кроме того, следующим шагом был смоделирован процесс “расширки” узких мест направленный на минимизацию дефицита газа у потребителей путем увеличения его потока по отдельным участкам сети.

Критерием включения каждого сочетания объектов газовой отрасли с конкретным КВО в перечень критически важных сочетаний будем считать разницу в относительном



суммарном дефиците газа у потребителей  $\Delta Q_{ij}$  при прекращении работы  $i$ -го КВО и одновременном прекращении работы сочетания  $i$ -го КВО с  $j$ -м объектом расчетной сети:

$$\Delta Q_{ij} = Q_{ij} - Q_i, \quad i = 1, \dots, K; \quad j = 1, \dots, N; \quad i \neq j, \quad (10)$$

$$\Delta Q_{ij} \geq \delta, \quad (11)$$

где  $Q_{ij}$  – суммарный относительный дефицит газа у потребителей, вызванный прекращением работы сочетания  $i$ -го КВО и  $j$ -го объекта расчетной сети,  $Q_i$  – суммарный относительный дефицит газа у потребителей, вызванный прекращением работы  $i$ -го КВО,  $\delta$  – ограничение относительного приращения суммарного дефицита газа у потребителей для попадания в перечень критически важных сочетаний объектов газовой отрасли.

Расчеты показывают, что более 15 тысяч сочетаний других объектов с выделенными КВО приводят к увеличению дефицита газа у потребителей. Исходя из соображений приемлемости экспертного анализа ограничили величину  $\delta$  в пределах 5%. В итоге расчета попарно всех 61 КВО ЕСГ с остальными объектами системы (всего было проанализировано на предмет их одновременного отключения более 61 тыс. пар) были получены 630 пар, состоящих из одного КВО и еще одного объекта газовой отрасли, выход из строя которых может привести к возникновению  $\Delta Q$  более 5%.

В таблице 2 представлено количество сочетаний по два по всем КВО и суммарные относительные дефициты газа у потребителей при прекращении работы конкретного КВО. Так же представлены средние суммарные относительные дефициты газа у потребителей при прекращении работы критически важных сочетаний других объектов ЕСГ с данным КВО. При этом реальные наименования объектов ЕСГ здесь заменены на условные номера.

Из данных табл. 2 видно, что кроме отдельных КВО ЕСГ (28, 43, 46) имеющих только по одному критически важному сочетанию объектов (по одной паре), для остальных КВО получено от 5 до 24 критически важных сочетаний объектов. Кроме того, видно, что суммарный относительный дефицит газа у потребителей может быть значительно больше в случае выхода из строя критически важных сочетаний отдельных объектов ЕСГ с некоторыми КВО. Так первые семь КВО имеют от 8 до 11 критически важных сочетаний с другими объектами ЕСГ. Прекращение работы указанных сочетаний даже после решения задачи по обходу “узких мест” способно привести к суммарному относительно суточному дефициту газа у потребителей в пределах 25–30%. Суммарный относительный дефицит газа у потребителей при отключении таких пар превысит аналогичный дефицит при выходе из строя только соответствующих КВО ЕСГ на 7–11%.

В целом, на основании анализа результатов исследования можно отметить, что прекращение работы критически важных сочетаний объектов ЕСГ способно привести к увеличению недопоставок газа потребителям в среднем на 8–10% от требуемых объемов газа по сравнению с дефицитом вызванным прекращением работы соответствующих КВО ЕСГ. В отдельных случаях это увеличение может достигать 20%.

Что касается мероприятий по обходу “узких мест”, то при ситуациях с прекращением работы рассматриваемых критически важных сочетаний объектов, такие мероприятия приводят к относительно незначительному снижению суммарного дефицита газа у потребителей (в среднем на 2–3%). Этот факт дополнительно подтверждает высокую важность выявления указанных сочетаний. К примеру, в случае критически важных сочетаний объектов с КВО 9, 10, 11 мероприятия по обходу “узких мест” не окажут даже малейшего положительного эффекта.

Кроме прочего, из анализа данных таблицы явно видно, что с позиций выбора очередности принятия мер по снижению значимости критически важных объектов ЕСГ и их сочетаний следует особо выделить 4 объекта – 2 узловых КС и 2 дуги между узловыми КС – которые присутствуют в 60% выявленных критически важных сочетаний объектов газовой отрасли.

**Таблица 2.** Расчетные относительные дефициты газа в сети в максимально напряженные сутки января 2017 г. при прекращении работы критически важных сочетаний объектов ЕСГ

КВО	Количество критически важных сочетаний объектов (пар)	Дефицит газа при прекращении работы, %		$\Delta Q$ , %	Эффект от решения задачи обхода узких мест при прекращении работы пары, %	
		КВО	Пары		Дефицит	Снижение дефицита
1, 6	10	21	28–32	7–11	25–30	2–3
2, 5, 7	11	21	28–32	7–11	25–30	2–3
3, 4	8	21	28–29	7–8	25–26	2–3
8	7	19	25–30	6–11	24–29	2–3
9–11	5	16	22–25	6–9	22–25	0
12–15	7	16	22–27	6–11	21–25	2–3
16	5	12	18–21	6–9	18–19	0–2
17	14	10	17–20	7–10	13–18	1–4
18–22	5	10	16–19	6–9	13–15	3–4
23	11	10	15–17	5–7	11–16	0–4
24	11	9	15–17	6–8	11–16	0–4
25	16	8	14–20	6–12	12–18	1–4
26, 27	11	8	13–16	5–8	9–14	0–4
28	1	8	14	6	10	4
29	11	7	13–15	6–8	9–13	0–4
32, 33	11	7	12–15	5–8	9–13	0–4
34, 35	16	7	12–19	5–12	10–16	1–4
36–39	10	7	13–18	6–11	10–14	3–4
40	14	7	13–22	6–11	9–18	3–4
41	14	7	13–21	6–14	9–18	3–4
42	16	6	12–18	6–12	10–15	1–4
43	1	6	12	6	11	1
45	11	6	11–13	5–7	10–12	1
46	1	6	11	5	7	4
47	11	6	11–12	5–6	7–12	0–4
48	11	6	11–14	5–8	7–12	0–4
49, 50	16	6	11–17	5–11	9–15	1–4
51	24	6	11–18	5–12	9–15	1–4
52	9	5	12–14	7–9	9–10	3–4
53	19	5	10–25	5–20	8–22	4–5
54	17	5	11–25	6–20	6–22	3–5
55	13	5	10–25	5–20	6–22	3–5
56	15	5	10–22	5–17	6–18	3–5
57	21	5	10–19	5–14	6–16	3–5
58, 59	17	5	10–19	5–14	6–16	3–5
60, 61	20	5	10–19	5–14	6–16	3–5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На выделенные в результате представленных исследований объекты из перечня федеральных КВО газовой отрасли и перечня критически важных сочетаний объектов ЕСГ должно быть в первую очередь обращено внимание с позиций обеспечения живучести газовой отрасли и в целом с позиций обеспечения энергетической безопасности страны и ее регионов. Должны быть приняты соответствующие организационные меры по предупреждению ЧС в первую очередь на указанных объектах. Исследования и учет таких объектов и их сочетаний необходим для повышения надежности ЕСГ при ее развитии и работах по реконструкции. Стратегической задачей при развитии отрасли может стать задача формирования направлений и конкретных путей снижения критической значимости таких КВО и критически важных для потенциальной рабо-

тоспособности ЕСГ сочетаний объектов отрасли. С наработкой опыта выявления КВО и критических сочетаний объектов в газовой отрасли для разных временных срезов, работа может быть продолжена и в части выявления КВО в других системах энергетики и в ТЭК, в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделева А.В.* Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных ситуаций на таких объектах // Известия РАН. Энергетика, 2016. № 1. С. 70–78.
2. *Senderov S., Edelev A.* Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security. Energy, 2017. 10.1016/j.energy.2017.11.063
3. *Vorobev S., Edelev A.* Analysis of the importance of critical objects of the gas industry with the method of determining critical elements in networks of technical infrastructures // Management of Large-Scale System Development (MLSD), 2017 Tenth International Conference. IEEE, 2017. 10.1109/MLSD.2017.8109707
4. *Vorobev S., Edelev A., Smirnova E.* Search of critically important objects of the gas industry with the method of determining critical elements in networks of technical infrastructures // Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2017). E3S Web Conf. Volume 25, 2017. 10.1051/e3sconf/20172501004
5. ПАО “Газпром”: подземные хранилища газа [Электронный ресурс] URL: <http://www.gazprom.ru/about/production/underground-storage/> (дата обращения 19.04.2018).
6. *Voropai N.I., Senderov S.M., Edelev A.V.* Detection of “bottlenecks” and ways to overcome emergency situations in gas transportation networks on the example of the European gas pipeline network. Energy, 2012. 10.1016/j.energy.2011.07.038
7. *Еделева А.В., Еникеева С.М., Сендеров С.М.* Информационное обеспечение при исследовании вопросов функционирования больших трубопроводных систем // Вычислительные технологии. 1999. Том 4. № 5. С. 30–35.
8. *Воробьев С.В., Еделева А.В.* Методика определения узких мест в работе больших трубопроводных систем // Программные продукты и системы. 2014. № 3. С. 174–177.
9. *Храмов А.В., Еникеева С.М., Хрусталева Н.М. и др.* Программное и информационное обеспечение решения задач живучести Единой системы газоснабжения СССР // в Методы и модели исследования живучести систем энергетики, Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1990. С. 86–91.
10. *Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р.* Потоки в сетях / пер. с англ., М.: Мир, 1966. 276 с.
11. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата. Справочное руководство в 2-х томах. Том II / Под ред. Ю.П. Коротаяева, Р.Д. Маргулова. М.: Недра, 1984. 288 с.

### Formation of Lists of Critical Objects of the Gas Industry and Their Combinations from the Standpoint of the Country’s Energy Security

S. M. Senderov<sup>a</sup> and S. V. Vorobev<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Irkutsk

<sup>#</sup>e-mail: [seregavorobev@isem.irk.ru](mailto:seregavorobev@isem.irk.ru)

The article is devoted to the search for critical objects of the gas industry in Russia and their most important combinations with other objects of the gas industry from the standpoint of the state’s energy security and gas-consuming regions. Indicators characterizing the criticality of these objects and their combinations from the standpoint of system performance presents. An algorithm for the distribution of such objects according to the lists of the federal and regional levels is presented. A list of critical objects of the gas industry at the federal level has been formed, which includes, along with the objects of the gas transmission network, the head compression stations of the fields and compression station from underground gas storage. A list of critical combinations of gas industry objects from the standpoint of ensuring the energy security of the country and regions is presented.

*Keywords:* gas industry, critical objects, system performance, energy security