

УДК 338.24:621.3

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УРОВНЯ ЗНАЧИМОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИ ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ РАБОТЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОТРАСЛЕЙ

© 2023 г. С. М. Сендеров^{1, 2, *}, Д. С. Крупенёв^{1, 2}, С. В. Воробьев¹,
Н. М. Береснева¹, Д. А. Бояркин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, Иркутск, Россия

*e-mail: ssm@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 03.11.2022 г.

После доработки 16.01.2023 г.

Принята к публикации 20.01.2023 г.

В статье представлены основные составляющие методического подхода к оценке уровня значимости критически важных объектов энергетики на примере отдельных отключений важнейших объектов газотранспортной сети России. Представлены подходы к моделированию топливно-энергетического комплекса страны и входящих в него энергетических систем: газо-, электро- и теплоснабжения. Приведены алгоритмы выявления критически важных объектов энергетики отраслевого, регионального и федерального уровня, а также примеры их ранжирования в зависимости от уровня ожидаемых последствий для потребителей электрической и тепловой энергии при потере работоспособности указанных критически важных объектов.

Ключевые слова: критически важные объекты, недоотпуск электрической и тепловой энергии, надежность топливно- и энергоснабжения

DOI: 10.31857/S0002331023020061, **EDN:** KBSZMJ

ВВЕДЕНИЕ

В условиях возможной реализации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций (ЧС) в энергетике, сопровождающихся снижением работоспособности отдельных энергетических объектов и соответствующих систем энергетики (СЭ), не всегда возможно обеспечить бездефицитное энергоснабжение потребителей. В этих случаях нужно говорить о минимизации объемов возможных дефицитов конечных видов энергии у потребителей. Причины возникновения крупномасштабных ЧС в энергетике могут быть различными. Среди них можно выделить причины, вызванные преднамеренными воздействиями. Логично предположить, что преднамеренные воздействия могут быть нацелены в первую очередь на те объекты, снижение работоспособности которых может существенным образом снизить производственные возможности отдельных СЭ и ТЭК в целом и привести к значительным дефицитам в поставках соответствующих видов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

В первую очередь логично выявлять именно такие критически важные объекты (КВО) СЭ и ТЭК в целом. Не все КВО СЭ являются КВО на уровне ТЭК, т.е. потеря работоспособности не каждого из них способна спровоцировать дефициты конечных

видов энергии у потребителей. Объем таких дефицитов может быть уменьшен за счет компенсационных возможностей самого ТЭК (диверсификация энергоисточников, взаимозаменяемость энергоресурсов и проч.). Если эти возможности ТЭК не позволяют существенно уменьшить дефицит ТЭР при потере работоспособности энергетического объекта, то такой объект можно считать КВО ТЭК. Анализ взаимосвязанной работы отраслевых СЭ в рамках единого ТЭК позволяет понять – какие из КВО уровня отдельных СЭ могут быть отнесены к КВО уровня ТЭК.

Задача исследования состоит в формировании алгоритма выявления КВО СЭ, а затем в формировании методического подхода к определению уровня этих КВО, т.е. какие из выявленных КВО одной СЭ могут существенным образом влиять на надежность энергоснабжения потребителей со стороны другой СЭ, непосредственно взаимосвязанной с первой.

В данной статье анализируется взаимосвязанная работа двух больших систем энергетики: единой системы газоснабжения (ЕСГ) и единой электроэнергетической системы (ЕЭС) России. Данные системы объединяет прежде всего тот факт, что порядка 54% всей электроэнергии, вырабатываемой в стране, производится на газопотребляющих электрогенерирующих источниках. В свою очередь дефициты ТЭР у потребителей, не компенсированные за счет системных свойств ТЭК, способны негативно повлиять на процесс производства тепловой энергии. Поэтому далее анализируются возможности производства тепловой энергии в сложившихся условиях. При этом учитывается региональная структура производства тепловой энергии и при потреблении топлива – структура его потребления. Очевидно, что в случае проявления значимых дефицитов тепловой энергии в каком-либо регионе при прекращении работы одного из КВО СЭ (в данном случае КВО ЕСГ), такой КВО должен быть признан в качестве КВО ТЭК.

АЛГОРИТМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ КВО СЭ И КВО ТЭК

КВО систем энергетики

С позиций энергетической безопасности в качестве КВО СЭ федерального уровня могут быть признаны объекты, прекращение работы которых может вызвать существенные недопоставки соответствующих ТЭР в целом по стране. При этом дефицит поставок может составлять в относительной величине $\delta_{\text{сум}}$ и более от суммарной потребности страны в данном виде ТЭР. В качестве такой $\delta_{\text{сум}}$ по газовой отрасли ранее в [1, 2] была принята величина в 5%. В качестве КВО СЭ регионального уровня могут рассматриваться объекты, которые не вошли в перечень федеральных КВО данной СЭ, но прекращение их работы может вызвать недопоставки соответствующих ТЭР хотя бы в один из регионов в относительной величине $\delta_{\text{рег}}$ и более. В качестве такой $\delta_{\text{рег}}$ по газовой отрасли там же в [1, 2] была принята величина в 40%.

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

Данный алгоритм представляет собой цепочку последовательных шагов от моделирования нештатной ситуации с поочередным отключением объектов СЭ до формирования соответствующих перечней КВО этой СЭ. Исследования проводятся методом перебора указанных нештатных ситуаций. Результатом модельных исследований являются величины дефицитов соответствующего ТЭР у его потребителей. Сравнение относительной величины суммарного дефицита данного вида ТЭР с оговоренной величиной условно допустимого относительного дефицита $\delta_{\text{сум}}$ позволяет выделить отдельные КВО СЭ в их федеральный перечень. КВО СЭ, не попавшие в данный перечень, проверяются на предмет формирования (при их отключении) дефицита данного вида ТЭР в регионах. Если относительный дефицит данного вида ТЭР в каком-либо из регионов превысит условно допустимую величину $\delta_{\text{рег}}$, данный КВО попадает в ре-

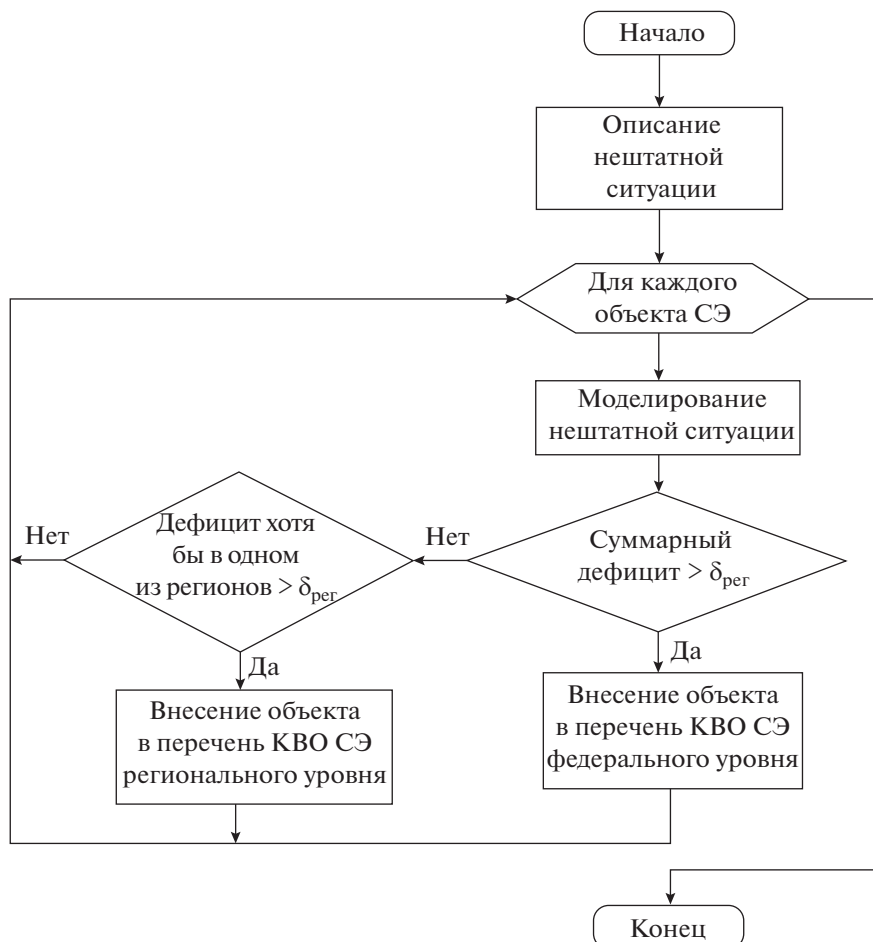


Рис. 1. Алгоритм формирования перечней КВО регионального и федерального уровней конкретной СЭ.

гиональный перечень КВО данной СЭ. В противном случае, объект СЭ за КВО не считается, и исследование переходит к следующему объекту.

КВО ТЭК

Алгоритм формирования перечня КВО уровня ТЭК представлен на рис. 2. Данный алгоритм начинается с анализа множества КВО СЭ федерального уровня, формируемого при работе алгоритма, представленного выше, на рис. 1.

Исследования проводятся с использованием экономико-математической модели ТЭК [3, 4] для ситуаций с отключением уже только КВО СЭ федерального уровня. Результатом модельных исследований являются величины дефицитов конечных видов ТЭР у потребителей. В данных исследованиях учитываются упомянутые выше возможности ТЭК по минимизации последствий негативных воздействий. Сравнение относительной величины суммарного дефицита конечных видов энергии у потребителей с величиной условно приемлемого относительного дефицита $D_{пр}$ позволяет из отдельных КВО СЭ федерального уровня формировать федеральный перечень КВО ТЭК. Потеря работоспособности некоторых КВО СЭ, не попавших согласно указанному

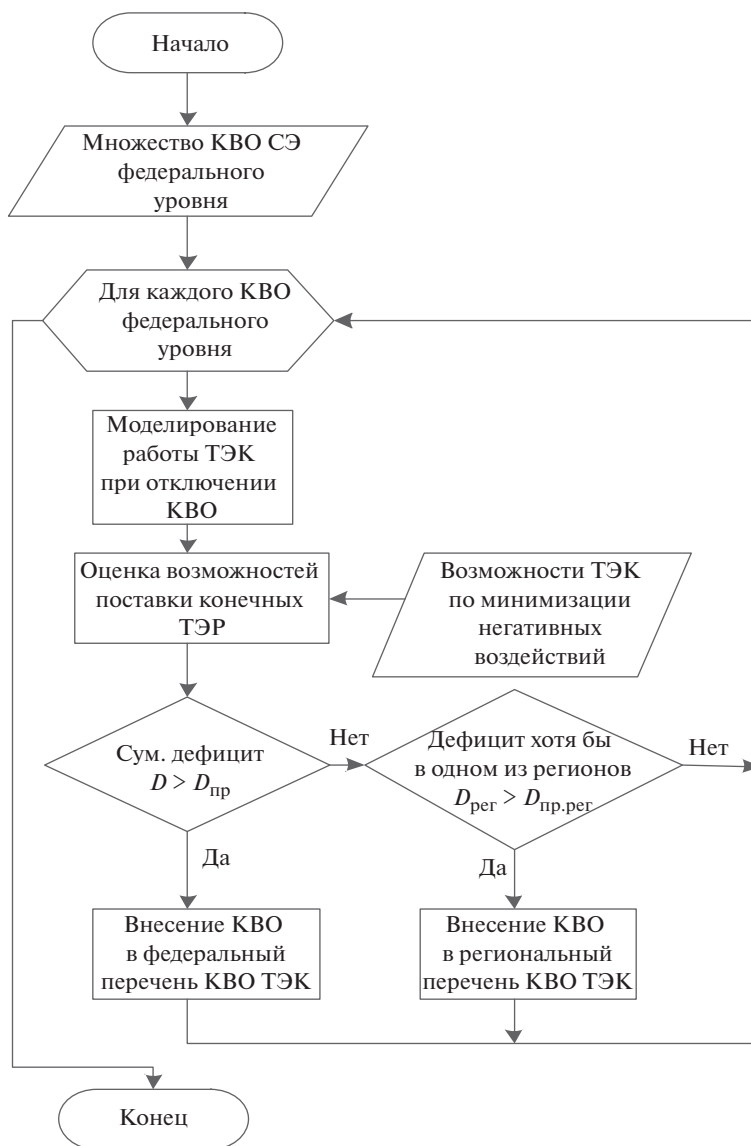


Рис. 2. Алгоритм формирования перечня КВО уровня ТЭК.

правилу в федеральный перечень КВО ТЭК, может привести к значительным дефицитам конечных ТЭР у потребителей одного или нескольких регионов. Незамеченными серьезными проблемами с энергоснабжением даже одного—двух регионов оставаться не должны. Следовательно, КВО СЭ, не попавшие в федеральный перечень КВО ТЭК, но способные при прекращении их работы вызвать дефицит конечных видов ТЭР больший, чем условно приемлемый $D_{пр,рег}$, должны формировать региональный перечень КВО ТЭК.

Переходя к конкретным исследованиям на моделях реальных СЭ, подробнее остановимся на наиболее близких к задаче исследования аспектах функционирования ЕЭС и ЕСГ России.

СИТУАЦИЯ В ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

Газовая отрасль России, в технологической части, представлена ЕСГ и локальными газоснабжающими системами на востоке страны. ЕСГ посредством многониточной газотранспортной сети (ГТС) объединяет газовые месторождения европейской части страны с потребителями природного газа в этой же европейской части и в регионах западной Сибири. Данная ГТС включает в себя: головные компрессорные станции (КС) на месторождениях, узловые и промежуточные КС на магистральных газопроводах (МГ), подземные хранилища газа (ПХГ) и линейную часть МГ, осуществляющих доставку газа до распределительных пунктов газораспределительных сетей или до пунктов экспортной сдачи российского газа.

В 2021 г. в России было добыто порядка 763 млрд м³ газа (обычный сетевой природный газ и попутный газ нефтяных месторождений), импортировано в страну 8 млрд м³ природного газа (из средней Азии). В этом же 2021 г. внутреннее потребление (вместе с собственными нуждами газовой отрасли) составило 529 млрд м³, а экспортные поставки составили 242 млрд м³ (в т.ч. 38 млрд м³ СПГ), в т.ч. в дальнее зарубежье было поставлено 223 млрд м³.

Сложившаяся территориальная структура ЕСГ России обладает рядом существенных недостатков. Сегодня более 85% всего российского газа добывается в северных районах Тюменской области. Основные потребители газа внутри страны — ее европейские регионы и пункты экспортной сдачи газа — расположены в 2–2.5 тыс. км от мест его добычи. Весь этот газ транспортируется на дальние расстояния с помощью газотранспортных многониточных коридоров со значительной 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 ГТС России имеется несколько потенциально опасных для функционирования ЕСГ пересечений МГ. Нарушение работы некоторых из них может привести к значительным ограничениям поставок газа потребителям. Значительная часть таких пересечений представляет собой КВО ЕСГ с позиций обеспечения требуемой работоспособности ГТС. К таким КВО относится ряд пересечений МГ на узловых КС, на головных КС, размещающихся на выходах с месторождений и ПХГ, а также отдельные пересечения коридоров магистральных газопроводов между КС.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМАХ И В ТЭК В ЦЕЛОМ

Газотранспортная система

В ИСЭМ СО РАН разработан и постоянно актуализируется программно-вычислительный комплекс (ПВК) “Нефть и газ России” [1, 2]. Данный комплекс в качестве своего основного блока включает специально разработанную потоковую имитационную модель ЕСГ России. Указанная модель учитывает все необходимые для исследований технологические характеристики основных объектов газовой отрасли и на достаточном уровне агрегирования позволяет анализировать режимы функционирования не только ЕСГ России, но и технологически связанных с ней ГТС европейских стран. Расчетная схема модели содержит 382 узла, включая 22 ПХГ, 28 источников газа (в модели это головные КС, 64 потребителя газа (на уровне регионов и пунктов экспортной сдачи газа), 268 узловых КС, а также 628 дуг, представляющих коридоры МГ и отдельные МГ, включая отводы на распределительные сети.

Математически рассматриваемая ГТС представлена как сеть, изменяющаяся во времени, в узлах которой находятся предприятия по добыче, преобразованию и по-

треблению 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 [5, 6]. 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:

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

при условиях, что

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

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

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. Следующим шагом решается задача о максимальном потоке минимальной стоимости, т.е. минимизируется стоимостной функционал:

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

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

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 формируется список объектов, прекращение работы которых приведет к потенциальному дефициту газа в сети. Такой список ранжируется по относительной величине дефицита газа в сети при прекращении работы соответствующего объекта. Путем отсеечения объектов, вывод которых приведет к потенциальному дефициту газа в сети меньшему, чем пороговое значение в 5%, формируется перечень КВО ЕСГ.

Для примера выберем наиболее показательные ситуации с потерей работоспособности отдельных КВО ЕСГ. Используя специализированные модели для минимизации дефицита электрической мощности и информацию по ожидаемым недопоставкам газа на газопотребляющие электрогенерирующие объекты по соответствующим ОЭС, рассчитаем возможные объемы недоотпуска электроэнергии потребителям. Случаи, которые будут характеризоваться значимыми объемами дефицита электроэнергии у потребителей, будут учтены при отнесении соответствующих КВО ЕСГ к КВО ТЭК.

Электроэнергетическая система

Цель моделирования ЭЭС в данном случае – определение недоотпуска электроэнергии потребителям в результате аварий на объектах ТЭК. Решаемую задачу можно сформулировать следующим образом: для известной структуры, параметров элементов и графика потребления мощности ЭЭС необходимо определить недоотпуск элек-

троэнергии за период с начала аварийной ситуации и сокращения подачи газа на газопотребляющие электрогенерирующие объекты до полного ее устранения. Расчетная модель ЭЭС представляет из себя граф, узлами которого являются энергозоны, а дугами – межзональные связи. Энергозона включает в себя часть энергосистемы, как правило, это региональная энергосистема, которая содержит набор генерирующих агрегатов и характеризуется потреблением мощности в каждый час расчетного периода. Межзональная связь включает в себя линии электропередачи, которые соединяют энергозоны. Таким образом, для каждого часа расчетного периода необходимо решить следующую задачу [7]: необходимо найти:

$$\sum_{i=1}^I (\bar{N}_{\text{потр},i} - N_{\text{потр},i}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

учитывая балансовые ограничения

$$N_{\text{ген},i} - N_{\text{потр},i} + \sum_{j=1}^J (1 - z_{ji} a_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^J z_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, I, \quad i \neq j, \quad (6)$$

и линейные ограничения-неравенства на переменные

$$0 \leq N_{\text{потр},i} \leq \bar{N}_{\text{потр},i}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (7)$$

$$0 \leq N_{\text{ген},i} \leq \bar{N}_{\text{ген},i}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (8)$$

$$0 \leq z_{ji} \leq \bar{z}_{ji}, 0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}, \quad j = 1, \dots, J, \quad i = 1, \dots, I, \quad i \neq j, \quad (9)$$

где $\bar{N}_{\text{потр},i}$ – величина потребления мощности в энергозоне i , МВт; $N_{\text{потр},i}$ – обеспеченное потребление мощности в энергозоне i , МВт; $\bar{N}_{\text{ген},i}$ – располагаемая генерирующая мощность в энергозоне i , МВт; $N_{\text{ген},i}$ – используемая генерирующая мощность в зоне надежности i , МВт; $\bar{z}_{ji}$, $\bar{z}_{ij}$ – пропускная способность связи межзональной связи, МВт; z_{ji} , z_{ij} – фактическая загрузка межзональной связи, МВт; $I = J$ – количество энергозон.

ТЭК в целом

Указанная задача подробно описана в [8] и математически представляет собой классическую задачу линейного программирования. Постановка и ограничения этой задачи записываются следующим образом:

$$AX - \sum_{t=1}^T Y^t = 0, \quad (10)$$

$$0 \leq X \leq D, \quad (11)$$

$$0 \leq Y^t \leq R^t, \quad (12)$$

где t – категории потребителей; A – матрица технологических коэффициентов производства (добычи, переработки, преобразования) и транспорта отдельных видов топлива и энергии; X – искомый вектор, компоненты которого характеризуют интенсивность использования технологических способов функционирования энергетических объектов (добычи, переработки, преобразования и транспорта энергоресурсов, запасов топлива); Y^t – искомый вектор, компоненты которого характеризуют объемы потребления отдельных видов топлива и энергии отдельными категориями потребителей (t); D – вектор, определяющий технически возможные интенсивности использования отдельных технологических и производственных способов; R^t – вектор с

компонентами, равными объемам заданного потребления отдельных видов топлива и энергии отдельными категориями потребителей.

Целевая функция при этом имеет следующий вид:

$$(C, X) + \sum_{i=1}^T (r^i, g^i) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где первая составляющая отражает издержки, связанные с функционированием отраслей ТЭК. Здесь C – вектор удельных затрат по отдельным технологическим способам функционирования энергетических объектов; вторая составляющая – ущербы от дефицита по каждому виду топлива и энергии у каждой из выделенных категорий потребителей. Величины дефицита энергоресурсов g^i у потребителей определяются выражением $(R^i - Y^i)$. Вектор r^i условно обозначает “удельный ущерб” у потребителя.

В данном исследовании используется лишь часть возможностей представленной модели, реализованной в рамках ПВК “Корректива +” [9], отражающая одну категорию потребителя – производство тепловой энергии. В результате расчетов определяются: возможные объемы недоотпуска тепловой энергии в регионах страны при отключении соответствующих КВО ЕСГ с учетом взаимосвязанной работы всех отраслей ТЭК, запасов ТЭР, возможностей взаимозаменяемости различных видов ТЭР и диверсификации энергоисточников.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСТАВКИ ГАЗА В РЕГИОНЫ В СЛУЧАЯХ ПРЕКРАЩЕНИЯ РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ КВО ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Исследования проводились на описанной выше модели газовой отрасли России. Исходные условия для расчетов: средние сутки максимального потребления газа в сети (январь 2021 г.). В такие сутки работу сети можно считать наиболее напряженной. Суммарный поток газа по сети в эти сутки, учитывая экспорт, составил округленно 2180 млн м³, при величине потребления газа внутри страны порядка 1550 млн м³/сут. Исследования показали, что потенциальный дефицит газа у потребителей может наблюдаться при прекращении работы 449 объектов ЕСГ (242 узла, 199 дуг и 8 пересечений МГ расчетного графа). Из этого количества объектов ранее [1, 2, 10, 11] был выделен 61 объект, единичные прекращения работы которых способны привести к относительному дефициту газа в 5% и более от суммарной потребности в газе по ЕСГ. Среди этих объектов 22 дуги МГ между узловыми КС, 36 узлов (30 узловых КС, 5 головных КС на выходах с месторождений, 1 КС на выходе с ПХГ) и 3 пересечения МГ между КС. Эти объекты составляют современный перечень КВО ЕСГ.

Рассмотрим иллюстративный пример для оценки возможностей надежного снабжения электрической и тепловой энергией конечных потребителей и, тем самым, отнесения к КВО ТЭК отдельных КВО ЕСГ. Для этого выделим несколько КВО ЕСГ, расположенных в разных точках газотранспортной сети. Выбранные КВО ЕСГ включают три пересечения коридоров МГ между КС и пять узловых КС на пересечениях МГ.

Средствами ПВК “Нефть и газ России” на основе решения математической задачи (1)–(4) были оценены возможности поставок газа потребителям в условиях потери работоспособности выбранных КВО ЕСГ. Каждое исследование касалось выхода из строя одного КВО. Ниже в табл. 1–8 приведена информация о расчетных возможностях поставки газа в конкретные регионы РФ при потере работоспособности КВО ЕСГ. Указанные КВО ЕСГ ранжированы по степени уменьшения расчетного дефицита газа, при этом их реальные наименования заменены на условные.

Полученные величины недопоставок газа в регионы, отмеченные в табл. 1–8, могут повлиять на процесс топливоснабжения газопотребляющих электрогенерирующих источников, расположенных в данных регионах. При этом, если при сохранении

Таблица 1. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “Пересечение № 1”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
Пермский край	66	0.7	99
Кировская область	13.3	0	100
Республика Удмуртия	13.2	5.6	58
Республика Башкортостан	62.4	10	84
Республика Татарстан	69	50	28
Республика Марий Эл	5	0	100
Республика Чувашия	7.7	0	100
Республика Мордовия	10	0	100
Нижегородская область	29.3	5.5	81
Костромская область	18.2	0	100
Архангельская область	14	0	100
Вологодская область	33.8	0	100
Республика Карелия	3.7	0	100
Ленинградская область	77.5	67.7	13
Новгородская область	15.4	12.7	18
Смоленская область	9.6	0	100
Калужская область	6.9	4.1	41
Московская область	140.7	98.4	30
Тульская область	29.4	0	100
Брянская область	8	0	100
Орловская область	5.5	0	100
Липецкая область	17.5	0	100
Воронежская область	21.1	0	100
Курская область	8	0	100
Белгородская область	28.6	0	100
Всего по ЕСГ	1550	1091	30

определенной доли поставки газа можно говорить о приоритетах распределения недостаточных объемов газа в структуре газопотребления в регионе, то полное отсутствие поставки газа в регион будет обозначать полное прекращение его подачи и на газопотребляющие электрогенерирующие источники. При этом в ЕЭС России работают разные виды электрогенерирующих источников. Адекватное моделирование позволяет ответить на вопрос: насколько проблемы с отключением КВО газовой отрасли могут повлиять на снабжение электроэнергией конечных потребителей.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ ПРИ ПРЕКРАЩЕНИИ РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ КВО ЕСГ

Оценка недоотпуска электроэнергии проводилась для условий функционирования ЕЭС России на уровне 2022 г., [12]. Недоотпуск электроэнергии оценивался за период первых двух недель января (этот период принят как период с максимальным потреблением электроэнергии в ЕЭС России). При оценке недоотпуска электроэнергии был проведен учет плановых ремонтов генерирующего оборудования, [7]. В табл. 9 представлены величины отношения недоотпусков электроэнергии в условиях отключения КВО ЕСГ к величинам требуемого уровня электропотребления в ЕЭС России и Объединенных энергосистемах (ОЭС) ЕЭС России за рассматриваемый период.

Из анализа результатов видно, что, к примеру, отключение КВО ЕСГ КС 4 способно вызвать относительный недоотпуск 1.6% от уровня потребления всей ЕЭС России (без учета ОЭС Востока) и недоотпуск более 6% в ОЭС Урала. Видно, что ОЭС Урала

Таблица 2. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “Пересечение № 2”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
Свердловская область	64.8	54.8	15
Пермский край	66	0.7	99
Кировская область	13.3	0	100
Республика Удмуртия	13.2	5.6	58
Республика Башкортостан	62.4	10	84
Республика Татарстан	69	45.2	34
Республика Марий Эл	5	0	100
Республика Чувашия	7.7	0	100
Республика Мордовия	10	0	100
Нижегородская область	29.3	21.1	28
Вологодская область	33.8	0	100
Ленинградская область	77.5	67.7	13
Новгородская область	15.4	15	3
Тульская область	29.4	0	100
Брянская область	8	5.6	30
Орловская область	5.5	0	100
Липецкая область	17.5	0	100
Воронежская область	21.1	0	100
Курская область	8	0	100
Белгородская область	28.6	27	6
Всего по ЕСГ	1550	1217	21

более других страдает практически во всех случаях отключений, кроме отключений “Пересечение № 1” и “КС 5”. В этом случае существенные недоотпуски электроэнергии могут иметь место в ОЭС Северо-Запада.

Учитывая величины возможных недоотпусков электроэнергии по отдельным ОЭС, видно, что отключение “Пересечения № 2”, “Пересечение № 3” и “КС 2” может быть в значительной степени компенсировано возможностями самой ЕЭС России. Нарушение их работы по одному способно вызвать относительные недоотпуски электроэнергии менее 1% по всем анализируемым ОЭС. Таким образом, с позиций возможных недоотпусков электроэнергии эти КВО ЕСГ нельзя отнести к КВО ТЭК. Все остальные из выбранных КВО ЕСГ, т.е. “Пересечение № 1”, “КС 1”, “КС 3”, “КС 4”, “КС 5” могут быть отнесены к КВО ТЭК регионального уровня.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ ПРИ ПРЕКРАЩЕНИИ РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ КВО ЕСГ

Безусловно недопоставки газа в отдельные регионы отразятся и на выработке в них тепловой энергии. В целом по России доля тепловой энергии, выработанной на природном газе в 2021 г., составила почти 76%, в европейской части страны эта величина превысила 89% (расчеты на основании [13]). Наибольшие негативные последствия здесь проявятся в регионах с высокой долей доминирования природного газа в балансах КПП (характерно для большинства регионов европейской части страны).

Расчетные величины возможного суточного недоотпуска тепловой энергии по регионам в зоне действия ЕСГ при отключении КВО ЕСГ представлены в табл. 10. Величины недоотпуска тепла в некоторых случаях отключения различных КВО ЕСГ не меняются. Это соответствует результатам таблиц, характеризующих объемы недопоставки газа в регионы. К примеру, поставки газа в Воронежскую область полностью

Таблица 3. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “КС 1”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
ЯНАО	153.6	82.5	46
Кировская область	13.3	0	100
Республика Удмуртия	13.2	5.6	58
Республика Башкортостан	62.4	11.8	81
Оренбургская область	75.4	60	20
Республика Татарстан	69	37	46
Республика Марий Эл	5	0	100
Республика Чувашия	7.7	0	100
Республика Мордовия	10	0	100
Вологодская область	33.8	0	100
Новгородская область	15.4	15	3
Тульская область	29.4	0	100
Орловская область	5.5	0	100
Курская область	8	0	100
Белгородская область	28.6	27.4	4
Липецкая область	17.5	0	100
Воронежская область	21.1	0	100
Всего по ЕСГ	1550	1220	21

Таблица 4. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “КС 2”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
ЯНАО	153.6	150	2
Кировская область	13.3	3.9	71
Республика Башкортостан	62.4	55.6	11
Оренбургская область	75.4	60	20
Республика Татарстан	69	37	46
Республика Марий Эл	5	0	100
Республика Мордовия	10	0	100
Вологодская область	33.8	0	100
Новгородская область	15.4	15	3
Тульская область	29.4	0	100
Орловская область	5.5	0	100
Курская область	8	0	100
Белгородская область	28.6	27.4	4
Липецкая область	17.5	0	100
Воронежская область	21.1	0	100
Всего по ЕСГ	1550	1351	13

прекращаются при отключении по одному 4-х первых КВО ЕСГ. При этом в обычной ситуации доля тепловой энергии, вырабатываемой на газе, составляет 96%. Непоступившие объемы газа в определенной мере могут быть заменены доступными объемами топочного мазута. Эти также ограниченные возможности и учтены во всех случаях полного отсутствия поставок газа. В табл. 11 результаты анализа по отнесению КВО ЕСГ к различным перечням КВО ТЭК сведены вместе.

Из данных табл. 10 видно, что наибольшим образом в большинстве случаев будут страдать потребители Центрального, Северо-Западного и Приволжского федераль-

Таблица 5. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “КС 3”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
ЯНАО	153.6	74.3	52
Оренбургская область	75.4	58	23
Республика Татарстан	69	64.4	7
Республика Мордовия	10	3.2	68
Вологодская область	33.8	12.2	64
Новгородская область	15.4	14.2	8
Тульская область	29.4	0	100
Орловская область	5.5	0	100
Курская область	8	0	100
Белгородская область	28.6	25.2	12
Воронежская область	21.1	5	76
Всего по ЕСГ	1550	1357	12

Таблица 6. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “КС 4”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
ХМАО	100	42.2	58
Алтайский край	2.4	0	100
Омская область	12.4	1.3	90
Тюменская область	24.6	6.9	72
Курганская область	6.9	0	100
Челябинская область	58.3	6	90
Республика Удмуртия	13.2	7	47
Всего по ЕСГ	1550	1389	10

Таблица 7. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “КС 5”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
Ленинградская область	77.5	11.4	85
Республика Карелия	3.7	0	100
Вологодская область	33.8	0	100
Калининградская область	8.90	4.80	46
Всего по ЕСГ	1550	1442	7

Таблица 8. Потеря работоспособности КВО ЕСГ “Пересечение № 3”

Субъект	Потребление	Поставка	Дефицит
	млн м ³ /сут		%
Свердловская область	64.8	54.8	15
Пермский край	66	0.7	99
Кировская область	13.3	0	100
Республика Удмуртия	13.2	5.6	58
Всего по ЕСГ	1550	1454	6

Таблица 9. Относительные недоотпуски электроэнергии в ЕЭС России (без ОЭС Востока) при отключении КВО ЕСГ

Энергосистема	Требуемый уровень потребления э/э, млрд кВт ч/сут	Сценарий отключения КВО ЕСГ, недоотпуск* (%)							
		Пер. № 1	Пер. № 2	КС 1	КС 2	КС 3	КС 4	КС 5	Пер. № 3
ЕЭС России (без ОЭС Востока)	45260	0.3	—	0.6	—	0.7	1.6	0.3	0.2
ОЭС Северо-запада	4599	2.4	—	—	—	—	—	2.8	—
ОЭС Центра	9549	—	—	—	—	—	—	—	—
ОЭС Средней Волги	4668	—	—	—	—	—	—	—	—
ОЭС Юга	4722	—	—	—	—	—	—	—	—
ОЭС Урала	11 821	—	0.1	2.1	—	2.6	6.2	—	0.8
ОЭС Сибири	9901	—	—	—	—	—	—	—	—

* “—” означает величину менее 0.1

Таблица 10. Ожидаемый недоотпуск тепловой энергии по «пострадавшим» регионам зоны действия ЕСГ при отключении КВО газовой отрасли

Федеральный округ, регион	Потребление т/э	Доля т/э произведенной на газе	Сценарий отключения КВО ЕСГ							
			Пер. № 1	Пер. № 2	КС 1	КС 2	КС 3	КС 4	КС 5	Пер. № 3
	тыс. Гкал/сут		%							
Россия (без ДВФО)	5780	76	10	7	5	4	1	3	2	2
Центральный ФО	1686		14	10	7	10	5	—	—	—
Белгородская обл.	51	98	62	—	—	—	—	—	—	—
Брянская обл.	27	99	63	—	—	—	—	—	—	—
Воронежская обл.	80	96	61	61	61	61	11	—	—	—
Костромская обл.	25	79	50	—	—	—	—	—	—	—
Курская обл.	32	95	60	60	60	60	60	—	—	—
Липецкая обл.	76	80	51	51	51	51	—	—	—	—
Орловская обл.	21	99	63	63	63	63	63	—	—	—
Смоленская обл.	33	93	59	—	—	—	—	—	—	—
Тульская обл.	65	87	56	56	56	56	56	—	—	—
Северо-Западный ФО	715		11	5	5	5	—	—	16	—
Респ. Карелия	36	60	38	—	—	—	—	—	38	—
Архангельская обл.	89	52	33	—	—	—	—	—	—	—
Вологодская обл.	72	77	49	49	49	49	—	—	49	—
Ленинградская обл.	289	52	—	—	—	—	—	—	23	—
Приволжский ФО	1463		18	15	8	2	—	—	—	8
Респ. Башкортостан	223	98	25	25	18	—	—	—	—	—
Респ. Марий Эл	26	91	58	58	58	58	—	—	—	—
Респ. Мордовия	29	99	63	63	63	63	—	—	—	—
Чувашская респ.	35	99	63	63	63	—	—	—	—	—
Пермский край	162	90	54	54	—	—	—	—	—	54
Кировская обл.	51	78	50	50	50	—	—	—	—	50
Нижегородская обл.	136	96	29	—	—	—	—	—	—	—
Уральский ФО	639		—	—	—	—	—	21	—	—
Тюменская обл.	209	71	—	—	—	—	—	45	—	—
Челябинская обл.	174	84	—	—	—	—	—	23	—	—
Сибирский ФО	957		—	—	—	—	—	3	—	—
Алтайский край	71	13	—	—	—	—	—	8	—	—
Омская обл.	96	58	—	—	—	—	—	24	—	—

Таблица 11. Результаты анализа по отнесению КВО ЕСГ к различным перечням КВО ТЭК

Отключаемый КВО ЕСГ	Перечень КВО СЭ				Перечень КВО ТЭК	
	электроэнергетика		теплоэнергетика		Фед.	Рег.
	Фед.	Рег.	Фед.	Рег.		
Пересечение № 1		+	+		+	
Пересечение № 2			+		+	
КС 1		+	+		+	
КС 2				+		+
КС 3		+		+		+
КС 4		+		+		+
КС 5		+		+		+
Пересечение № 3				+		+

ных округов. Прежде всего это объясняется высокой долей газа в производстве тепловой энергии в этих регионах. По относительным величинам возможного недоотпуска тепловой энергии видно, что отключение первых 3-х КВО ЕСГ по одному способно привести к ограничениям в производстве тепловой энергии по России в зоне действия ЕСГ равному и более 5%. Эти КВО должны войти в федеральный перечень КВО ТЭК. Отключение оставшихся 5-ти КВО ЕСГ не превысит условную отметку в 5%, но способно привести к серьезным проблемам с производством тепловой энергии в значительном количестве регионов. Таким образом, эти КВО ЕСГ могут быть отнесены к региональному уровню КВО ТЭК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены основные положения методического подхода к определению уровня КВО энергетики. На примере анализа взаимосвязанной работы ЕСГ, ЕЭС России и систем теплоснабжения отдельных регионов показано, что не все КВО одной энергетической системы могут существенным образом влиять на надежность энергоснабжения потребителей со стороны другой энергетической системы, непосредственно связанной с первой. Анализ результатов модельных исследований показал, что все выбранные для примера КВО ЕСГ являются КВО ТЭК, но одни из них должны быть включены в федеральный перечень, а другие – в региональный.

Разработанный подход позволяет сформулировать порядок выявления энергетических объектов, представляющих собой КВО федерального и регионального уровней ТЭК. На такие объекты должно быть в первую очередь обращено внимание с позиций обеспечения надежного топливо- и энергоснабжения потребителей и в целом с позиций обеспечения требований энергетической безопасности страны на федеральном и региональном уровнях. Соответствующей стратегической задачей при развитии ТЭК должна стать задача формирования направлений и конкретных путей снижения критической значимости таких КВО для потенциальной работоспособности соответствующих СЭ и ТЭК в целом.

Статья подготовлена в рамках проектов государственного задания № FWEU-2021-0003 (рег. номер: AAAA-A21-121012090014-5) и № FWEU-2021-0001 Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП “Высокотемпературный контур” (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделев А.В. Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической без-

- опасности 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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063>
 3. Senderov S., Krupenev D., Pyatkova N. Hierarchy of Models for the Study of National and Regional Energy Security // *Energy Systems Research*. V. 2. № 4. 2019. PP. 32–42.
 4. Пяткова Н.И., Сендеров С.М. Методические и модельные аспекты исследования функционирования и развития электроэнергетических систем с позиций энергетической безопасности // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2020. № 4 (61). с. 50–53.
 5. Храмов А.В., Еникеева С.М., Хрусталева Н.М. и др. Программное и информационное обеспечение решения задач живучести Единой системы газоснабжения СССР // *Методы и модели исследования живучести систем энергетики*, Новосибирск: Наука, Сиб. отд. 1990. С. 86–91.
 6. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Поток в сетях / пер. с англ., М.: Мир. 1966. 276 с.
 7. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Reliability of Power Systems. Springer-Verlag GmbH, (2019).
 8. Надежность топливо- и энергоснабжения потребителей с позиций обеспечения энергетической безопасности / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Д.С. Крупнев и др. Новосибирск: СО РАН, 2022. 132 с.
 9. Еделев А.В., Сендеров С.М., Сидоров И.А., Феоктистов А.Г., Береснева Н.М. Распределенная вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур энергетики. Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 197–231.
 10. Сендеров С.М., Воробьев С.В. Формирование перечней критически важных объектов газовой отрасли и их сочетаний с позиций энергетической безопасности страны / *Известия РАН. Энергетика*. 2019. № 1. с. 59–69.
 11. Senderov S.M., Vorobev S.V. Approaches to the identification of critical facilities and critical combinations of facilities in the gas industry in terms of its operability / *Reliability Engineering and System Safety*, V. 203. November 2020. 107046. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107046>
 12. Приказ Минэнерго России от 26.02.2021 N 88 “Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2021–2027 годы”. <https://minenergo.gov.ru/node/20706>
 13. Росстат. Остатки, поступление и расход топлива и тепловой энергии, отработанных нефтепродуктов, вторичных горючих и тепловых ресурсов в 2021 году. Российская Федерация. https://rosstat.gov.ru/mediabank/pok_76_2022

Methodological Approach to Assessing the Level of Significance of Critically Important Energy Facilities in the Interconnected Operation of Energy Systems

S. M. Senderov^{a, b, *}, D. S. Krupenev^{a, b}, S. V. Vorobev^a,
N. M. Beresneva^a, and D. A. Boyarkin^a

^aMelentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^bFederal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”, Irkutsk, Russia

*e-mail: ssm@isem.irk.ru

The paper presents the main components of a methodical approach to assessing the level of significance of critical energy facilities on the example of individual outages of the most important facilities of the Russian gas transmission network. Approaches to modeling the fuel and energy complex of the country and its constituent energy systems: gas, electricity and heat supply are presented. Algorithms for identifying critical energy facilities of the industry, regional and federal levels, as well as examples of their ranking depending on the level of expected consequences for consumers of electrical and heat energy in case of loss of performance of these critical facilities are given.

Keywords: critical facilities, undersupply of electricity and heat, reliability of fuel and energy supply