Оригинальная статья / Original article
УДК 620.9.002.5
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1209-1222

Особенности определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса в исследованиях надежности топливо- и энергоснабжения

© Н.М. Береснева, Н.М. Пяткова
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – определение критически важных для топливно-энергетического комплекса отраслевых объектов в условиях совместного функционирования отраслей, с учетом влияния системного эффекта и существующих механизмов структурной избыточности. Для определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса на базе моделей его функционирования в рамках поэтапных отраслевых и общеэнергетических исследований была предложена методика, построенная на методологии определения критически важных отраслевых объектов, на принципах оценки уязвимости элементов критических инфраструктур. Представленная методика отличается комплексностью и гибкостью оценки критичности отраслевых объектов, проводимой на базе сценарных вариантов функционирования топливно-энергетического комплекса. Методика дополнена формализованным представлением типовой оптимизационной общеэнергетической модели, унифицирующим взаимосвязь моделируемой в ней территориально-производственной структуры отраслевых систем, ее информационной базы с соответствующими технико-экономическими показателями и решаемых с ее помощью исследовательских задач. Оценка критичности объектов газовой отрасли приведена для 80 субъектов Российской Федерации. Приведены результаты апробации предложенной методики на примере определения критически важных объектов газовой отрасли с помощью модели функционирования топливно-энергетического комплекса с детализированной схемой Единой системы газоснабжения России. Данная апробация выявила различия в приоритетности критических объектов газовой отрасли и объектов топливно-энергетического комплекса, показала значительное влияние системного эффекта взаимосогласованного функционирования отраслей на топливо- и энергообеспечение потребителей. Полученные результаты подтверждают работоспособность методики, доказывают возможность ее использования для оценки критичности отраслевых объектов энергетики. Реализованная в методике схема исследований позволяет адекватно отразить ситуацию с топливо- и энергоснабжением потребителей при отключениях критически важных отраслевых элементов.

Ключевые слова: критически важные объекты, топливно-энергетический комплекс, отраслевые системы, двухэтапная схема определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса, модель функционирования топливно-энергетического комплекса, критерий значимости элементов

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00367.

Для цитирования: Береснева Н.М., Пяткова Н.И. Особенности определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса в исследованиях надежности топливо- и энергоснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 6. С. 1209–1222. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1209-1222

Determination features of fuel and energy complex critically important facilities in fuel and energy supply reliability studies

Natalia M. Beresneva, Natalia M. Pyatkova
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to identify industrial facilities that are critically important for the fuel and energy complex in the conditions of joint functioning of industries, taking into account the system effect and existing mechanisms of structural redundancy. To identify critically important facilities of the fuel and energy complex based on its operation models derived as a result of stage-by-stage sectoral and general energy studies, a methodology is proposed. It is based on the identification methods of critically important industry facilities on the principles of assessing vulnerability of critically important infrastructure elements. The presented methodology is characterized by the complex and flexible assessment of the critical importance of sectoral facilities, which is carried out on the basis of scenario options of fuel and ener-

gy complex operation. The methodology is supplemented with a formalized representation of a typical general energy optimization model, which unifies the relationship between the territorial-production structure of the sectoral systems modeled in it, its information base with the corresponding technical and economic indicators, and the research problems solved with its help. The assessment of the critical importance of gas industry facilities is given for 80 constituent entities of the Russian Federation. The approbation results of the proposed methodology are given on the example of the identification of the critically important gas industry facilities using a model of fuel and energy complex operation with a detailed scheme of the Unified Gas Supply System of Russia. The approbation has revealed the differences in the priority of critically important facilities of the gas industry and the fuel and energy complex. It has also shown a significant influence of the system effect of the mutually coordinated functioning of industries on the fuel and energy supply of consumers. The results obtained confirm the efficiency of the methodology, prove the possibility of its use for assessing the critical importance of power industry branch facilities. The research scheme implemented in the methodology allows to obtain an adequate state of matters with the fuel and energy supply to consumers under cut-out critically important sectoral facilities.

Keywords: critically important facilities, fuel and energy complex, sectoral systems, two-stage scheme for the identification of critically important facilities of the fuel and energy complex, fuel and energy complex operation model, criterion of element significance

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 20-08-00367.

For citation: Beresneva NM, Pyatkova NM. Determination features of fuel and energy complex critically important facilities in fuel and energy supply reliability studies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2020;24(6):1209–1222. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1209-1222

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения критически важных объектов (КВО) топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является развитием задачи определения отраслевых критических элементов, обосновывается необходимостью оценки степени критичности этих элементов в условиях совместного функционирования систем энергетики (СЭ) с учетом существующих в данном случае механизмов структурной избыточности. Решение этой задачи базируется на совместном применении модельного и инструментального аппарата исследований, отражающего технологическую и территориальную структуру объектов исследования (отраслевых систем и ТЭК). Важнейшим результатом этих исследований является разработка модификаций моделей исследований, в том числе моделей функционирования ТЭК с детализированным представлением анализируемых отраслевых систем. В основу методологических решений по реализации задачи легли:

– идеи оценки уязвимости элементов критических инфраструктур [1–10], к которым, безусловно, относятся ТЭК и его отраслевые системы [11];

– методика выявления критических элементов газовой отрасли [12–15];

– формализованная ранее схема поэтапных двухуровневых модельных исследований (рис. 1), учитывающая согласованность отраслевых элементов в разноуровневых моделях [16–19].

Подобная согласованность элементов

– позволила утверждать, что значимость одного и того же критического элемента для отрасли и для ТЭК в целом может быть различной, так как при определении КВО ТЭК учитывается системный эффект от взаимодействия СЭ;

– дала возможность использовать перечень отраслевых критических элементов в качестве потенциальных КВО ТЭК при задании расчетных условий в модельных исследованиях ТЭК;

– привела к получению перечня КВО ТЭК, не соответствующего перечню отраслевых критических элементов, включающего действительно критичные в условиях взаимосогласованной работы отраслей объекты.

Главным отличием разработанной методики по определению КВО ТЭК стал учет его системно-функциональной сложности, практически выраженной в наличии: множества энергоресурсов, процессов их переработки и преобразования, возможности их взаимозаменяемости на объектах электро- и тепло-

энергетики. Сравнительный анализ методик определения критических элементов на отраслевом и на общеэнергетическом уровне показал следующие результаты:

1. Обе методики ориентированы на анализ расчетных состояний, сформированных для сценариев отключений анализируемых элементов расчетных схем. Таким образом, оцениваются последствия неработоспособности данных элементов. При определении отраслевых критических элементов также предусмотрена возможность оценки последствий неработоспособности этих элементов в случае введения компенсирующих мероприятий. Этот механизм [12, 13] используется для корректировки перечня отраслевых критических элементов, позволяет исключить элементы, чья неработоспособность в значительной степени может быть компенсирована подключением резервных возможностей отрасли.

2. Обе методики предполагают модельные расчеты с различным числом одновременно отключаемых элементов (в теории множеств размер множества называется его мощностью). При определении отраслевых критических элементов расчеты анализируются отдельно по единичным или множественным отключениям элементов [12, 13]. В методике определения КВО ТЭК заложена возможность совместного анализа расчетов с отключениями групп элементов различной мощности.

3. В обеих методиках заложена идея оценки критичности элементов с позиций изменения степени обеспеченности потребителей энергоресурсами. Поэтому анализу в обоих случаях подвергаются относительные дефициты энергоресурсов по территориям либо по каждой отраслевой системе в целом. В модели ТЭК, включающей более одной отрасли, эта оценка носит комплексный характер, учитывает суммарные относительные дефициты различных энергоресурсов у различных категорий пользователей. Здесь также предусмотрена оценка важности анализируемых модельных показателей.

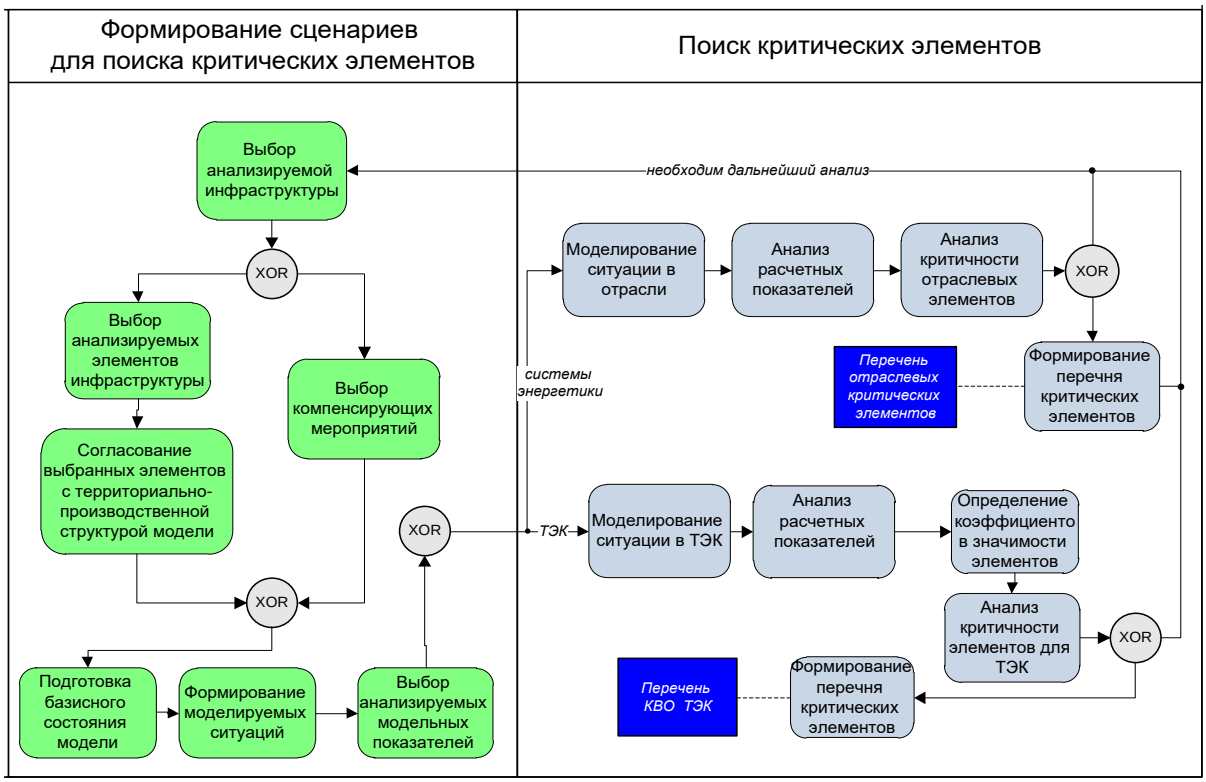

Рис. 1. Схема выбора критически важных объектов топливно-энергетического комплекса на базе отраслевых критических элементов
Fig. 1. Selection diagram of critically important facilities of the fuel and energy complex on the basis of sectoral critical elements

4. Характерное для обеих задач большое количество анализируемых расчетных состояний потребовало исключения состояний с допустимым уровнем дефицитов энергоресурсов по системе в целом. Допустимый уровень в обоих случаях устанавливается экспертным путем.

МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВО- И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Комплексные сценарные расчеты ТЭК при определении КВО ТЭК проводятся на базе территориально-производственных моделей функционирования ТЭК. Эти модели включают основные отраслевые блоки, имитирующие взаимосвязанную работу отраслевых объектов в различной степени территориальной и технологической детализации. Во временном аспекте они ориентированы на суточный разрез, так как при более значительных временных промежутках последствия сбоя работы отраслевых объектов для ТЭК в целом могут быть нивелированы.

Модели исследования представлены триплетом $M(Z,S,I)$, где $Z=\{z_t\}$, $t=\overline{1,T}$ – сценарии исследования, соответствующие гипотетическим состояниям ТЭК; S – территориально-производственная структура ТЭК и его отраслевых систем; I – информационная база модели.

Структура модели исследования представлена множеством $S(RES,REG,OBJ)$, где $RES=\{res_i\}$, $i=\overline{1,I}$ – принятые в модели энергетические ресурсы; $REG=\{reg_w\}$, $w=\overline{1,W}$ – территориальные единицы модели; $OBJ\left(OBJ^{tech},OBJ^{ec}\right)$ – объекты модели, соответствующие энергетическим OBJ^{tech} (объекты генерации электроэнергии и тепла, подземные хранилища газа и т.п.) или экономико-организационным OBJ^{ec} (компании, отраслевые организации, группы потребителей) структурам энергетики. В каждом таком объекте реализуется множество процессов $\{p_n\}$:

$$Obj_v=\{p_n\};\ \ v=\overline{1,V};\ \ n=\overline{1,N},$$

где v – индекс объекта; N – число реализуемых в объекте процессов.

Сами процессы представлены множеством $P=\{p_q\}$, $q=\overline{1,Q}$, содержательно включающим такие технологии, как:

- добыча (или производство) ресурсов;
- переработка и преобразование ресурсов;
- диверсификация ресурсов;
- хранение ресурсов;
- транспортировка ресурсов;
- потребление ресурсов.

Объекты модели привязаны к ее территориальным единицам и представляют собой часть отраслевых систем, входящих в ТЭК:

$$FEC=\{ES_f\},\ \ f=\overline{1,F};$$

$$ES_f=\{Obj_g\},\ \ g=\overline{1,G},$$

где FEC – ТЭК страны; ES_f – отраслевая система (*F* – число отраслей); Obj_g – множество объектов отраслевой системы f.

Информационная база модели $I(DI,DR)$ представлена исходной DI и расчетной DR информацией. Исходная информация $DI\left(I^{inp},I^{rat}\right)$ включает предметные I^{inp} (статистические, нормативно-справочные) и подготовленные для расчета (преобразованные предметные) модельные I^{rat} данные, где $I^{inp}=\{i_j^{inp}\}$, $j=\overline{1,J}$ – элементы исходной информации; $I^{rat}=\{i_k^{rat}\}$, $k=\overline{1,K}$ – элементы модели (ее переменные, коэффициенты); $F=\{F_k^j:i_j^{inp}\to i_k^{rat}\}$ – алгоритмы подготовки модельных данных на базе предметной информации.

Расчетная информация $DR=\{i_l^{opt}\}$, $l=\overline{1,L}$ (L – число переменных модели) – результат преобразования мо-

дельной информации $\left\{i_l^{rat}\right\}$ внешним решателем. Расчетная информация в процессе анализа может быть агрегирована по группам территориальных единиц.

Технически работа с моделями ТЭК представлена процессами подготовки и верификации данных, процедурами формирования, расчета и анализа различных вариантов функционирования ТЭК. При этом отправной точкой исследований является годовой сбалансированный вариант модели, на базе которого впоследствии формируются суточные варианты (вариант максимально нагруженных суток, варианты отключений объектов ТЭК). Такая цепочка работы обосновывается составом и уровнем представления статистической и аналитической отраслевой информации, относительной легкостью балансировки годовых показателей. Используемые для получения суточных вариантов корректирующие коэффициенты формируются экспертно, исходя из специфики анализируемых ситуаций, либо рассчитываются при наличии ежемесячной отраслевой отчетности.

Таким образом, реализуется схема работы с моделью ТЭК, концептуально представленная тремя этапами:

– этапом отладки сбалансированного годового варианта;

– этапом отладки варианта функционирования ТЭК в максимально нагруженные сутки;

– этапом расчета и анализа вариантов неработоспособности объектов модели в максимально нагруженные сутки.

На этапе отладки годового варианта модели выполняются массовые преобразования предметной информации с целью получения целевых характеристик функционирования объектов. Здесь производятся:

1. Отладка блока электро- и теплоэнергетики, включающая подготовку данных по станциям (или их группам) и котельным (или их группам), в том числе:

– преобразование и верификация данных по топливопотреблению на объектах отрасли (приведение к единой шкале измерения по единым для каждого из ресурсов коэффициентам);

– определение технологических характеристик функционирования тепло- и электрогенерирующих источников (объемов отпуска ими тепла и электроэнергии по отдельным видам топлива, удельных расходов топлива);

– контроль соответствия отпуска преобразованных ресурсов и расхода топлива внутри станций и котельных;

– корректировка перетоков электроэнергии;

– балансовый контроль тепла по субъектам, электроэнергии по стране в целом.

2. Отладка блока топливообеспечения, включающая:

– определение обязательных потребностей в топливе по территориям, при необходимости с разбивкой обязательной потребности по отдельным категориям (например, для нужд населения и промышленности);

– корректировку данных в случае отсутствия баланса по потреблению топлива на территориях;

– анализ пропускных способностей транспортной инфраструктуры топливных отраслей.

3. Балансовая оценка по всем энергоресурсам без учета их запасов.

4. Проведение оптимизационных расчетов, определяющих:

– «запертость» энергоресурсов, определение причин их возникновения;

– дефициты топлива на территориях, связанные с технологической недостаточностью энерготранспортной инфраструктуры, либо с дисбалансом собственных производственных возможностей и потребностей в случае изолированности территории;

– дефициты конечных видов энергоресурсов, причины их возникновения (недопоставки первичных ТЭР, технологическая недостаточность объектов транспортировки);

– уровень использования мощностей производственных объектов в отраслях ТЭК.

На этапе отладки варианта максимально нагруженных суток определяются коэффициенты сезонной неравномерности, характеризующие изменения в потреблении и в производстве энергоресурсов в текущих условиях,

резервные возможности отраслей для покрытия дополнительных потребностей в энергоресурсах. На этом этапе осуществляются:

1. В блоке электро- и теплоэнергетики:

– корректировка производственных возможностей станций и котельных в базовом режиме их функционирования;

– определение резервных возможностей оборудования на тепловых станциях и котельных;

– корректировка потребностей в электроэнергии и тепле;

– верификация стоимостных коэффициентов в части использования резервных возможностей станций, диверсификации топлива на них.

2. В блоке топливообеспечения:

– определение и подключение резервов топливных отраслей;

– корректировка обязательных потребностей в топливе.

3. Отладка варианта, в ходе которой анализируются и устраняются нестыковки в части поставок топлива потребителям, его извлечение из хранилищ, приоритетность использования топлива в электро- и теплоэнергетике.

На этапе анализа последствий от отключений критических объектов определяются относительные изменения анализируемых показателей по отдельным территориям или их группам. Эта информация используется для определения КВО ТЭК.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Методика определения критичности отраслевых энергетических объектов для территорий в условиях взаимосвязанной работы отраслевых систем отвечает следующим основным положениям:

1. Поставленная задача решается в рамках многовариантных многоуровневых вычислительных экспериментов на базе моделей функционирования ТЭК и его отраслей. Ключевая особенность данных экспериментов – многократное использование одних и тех же данных для моделей различного уровня. Допускается использование одной и той же информации на разных уровнях в преобразованном виде.

2. Поставленная задача предполагает задание отраслевых элементов, из числа которых выбираются КВО ТЭК. Сценарии неработоспособности отраслевых элементов имитируются в проводимых вычислительных экспериментах.

3. Решение задачи предполагает трехэтапную схему преобразования результатов вычислительных экспериментов, включающую получение количественных, качественных и экспертных оценок критичности элементов. Качественные и экспертные оценки формируются на базе количественных показателей. Качественные оценки (категории критичности элементов) позволяют выделять группы отраслевых элементов, являющиеся в разной степени проблематичными для ТЭК в целом. Основополагающим является интегральный критерий значимости элементов, комплексно характеризующий изменения анализируемых модельных показателей в случае неработоспособности отраслевых элементов.

4. Анализируемые модельные показатели применительно к поставленной задаче систематизируются в две категории. Категорию важнейших показателей составляют складывающиеся на территориях дефициты энергоресурсов, являющиеся системной характеристикой функционирования отраслей. Категория сопутствующих показателей представлена технологиями обеспечения потребностей территорий (запасы и резервы, возможности взаимозаменяемости энергоресурсов в технологических процессах). Корректный анализ критичности отраслевых элементов требует учета обоих типов показателей.

Заявленный критерий значимости каждого элемента определяется по всему множеству расчетных состояний с различными комбинациями его отключений:

$$ZO_i = \sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{k=1}^{K} ZO_i^{j,k} \times ZC^j\right],$$

$$ZO_i^{j,k} = \sum_{r=1}^{R} ZS_r^{j,k} \Big/ R,$$

где ZO_i – значимость *i*-го элемента ТЭК; $ZO_i^{j,k}$ – значимость *i*-го элемента по *j*-му показателю в расчетах с группами отключений мощности k; $ZS_r^{j,k}$ – оценки состояний по *j*-му показателю в расчетах с включением *i*-го элемента в группы отключений мощности k; R – число оцененных по *j*-му показателю состояний с включением *i*-го элемента в группы отключений мощности k; ZC^j – значимость (удельный вес) *j*-го показателя; K – максимальная мощность групп отключений в оптимизационных расчетах; J – количество анализируемых показателей; I – множество отключаемых элементов ТЭК, $i \in I$.

Формализация идентификации категории критичности элементов (наиболее критичной считается первая категория) может быть представлена следующим образом:

$$CAT_i^w = f\left(ZO_i^w, N\right);$$

$$N = \{n_l\},\ l = \overline{1, L};$$

$$n_l = \left\{n_l^{low}, n_l^{up}\right\},\ l = \overline{1, L};$$

$$CAT_l^w = \begin{cases} l, если\ (ZO_i^{\max} \times n_l^{low}) \le ZO_i^w < (ZO_i^{\max} \times n_l^{up}), l = \overline{2, L} \\ 1,\ если\ ZO_i^w \ge (ZO_i^{\max} \times n_l^{low}),\ l = 1 \end{cases};$$

$$ZO_i^{\max} = \max\left(ZO_i^w\right),\ w = \overline{1, W},$$

где CAT_i^w – категория критичности *i*-го элемента для территории w; ZO_i^w – коэффициент значимости *i*-го элемента для территории w; $ZO_i^{\max}$ – максимальное значение значимости *i*-го элемента по всем рассматриваемым территориям; N – множество заданных категорий критичности n_l (L – число заданных категорий критичности элементов); n_l^{low}, n_l^{up} – экспертно заданные в процентном выражении нижняя и верхняя границы категории критичности l; I – множество отключаемых элементов ТЭК; W – число рассматриваемых территориальных единиц.

Технически задача определения КВО ТЭК (рис. 2) представлена процессами преобразования и контроля данных в ходе вычислительных экспериментов, в ходе анализа рассчитанных модельных показателей, анализа критичности отраслевых элементов. Исходная информация задачи представлена целевыми установками (максимальная мощность групп отключений, перечень анализируемых отраслевых элементов и анализируемых модельных показателей, установки качественной оценки) и базисным суточным вариантом модели, возмущенные варианты которого рассчитываются в рамках проводимых экспериментов. Результирующая информация задачи – количественная, качественная и экспертная оценки, на базе которых и формируется перечень КВО ТЭК.

Формально методика определения КВО ТЭК представлена тремя этапами:

1) формирования стратегии выбора КВО ТЭК;

2) проведения оптимизационных расчетов;

3) формирования перечня КВО ТЭК.

На первом этапе:

– определяются объекты смоделированной территориально-производственной структуры ТЭК;

– выделяются группы отключаемых отраслевых элементов для их последующего включения в моделируемые ситуации;

– формируется набор критериев оценки состояний (важнейших и сопутствующих модельных показателей), устанавливается значимость этих критериев;

– определяются категории критичности элементов и их пороговые значения.

На втором этапе проводятся оптимизационные расчеты модели ТЭК, в рамках которых рассчитываются нештатные ситуации с отключениями групп отраслевых элементов.

На третьем этапе формируются оценки критичности отключаемых отраслевых элементов с последующим формированием перечня КВО ТЭК:

– корректируется состав анализируемых расчетных состояний путем исключения состояний с допустимым для страны в целом

относительным дефицитом хотя бы по одному ресурсу (на данном этапе принят 5% барьер оценки дефицита по стране в целом);

– определяются критерии значимости элементов по рассматриваемым территориям или их группам;

– определяются категории критичности для анализируемых элементов;

– формируется перечень КВО ТЭК.

Алгоритм этапа формирования перечня КВО ТЭК представлен на рис. 3. В нем все получаемые оценки привязаны к группам территорий, к которым могут быть отнесены и группы из одного региона.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Представленная методика была дважды апробирована на моделях ТЭК на примере отключений критических объектов газовой отрасли. По результатам первой тестовой апробации была доказана работоспособность и эффективность разрабатываемой методики, а также адаптированы некоторые ее ключевые моменты [20]. Текущая апробация методики была направлена на выявление разногласий в приоритетности критических объектов газовой отрасли и объектов

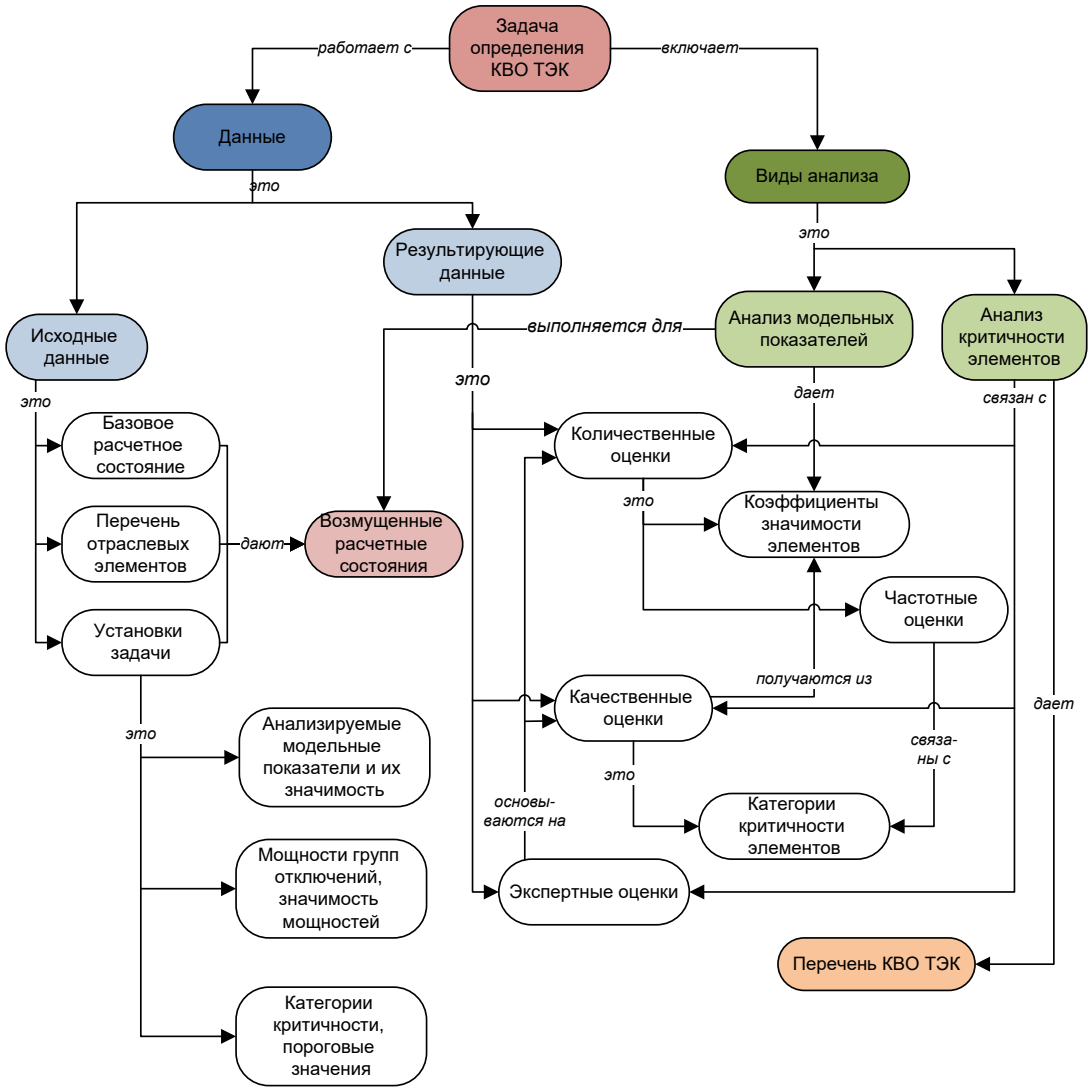

Рис. 2. Концептуальная схема решения задачи определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса
Fig. 2. Conceptual diagram for solving the identification problem of critically important facilities of the fuel and energy complex

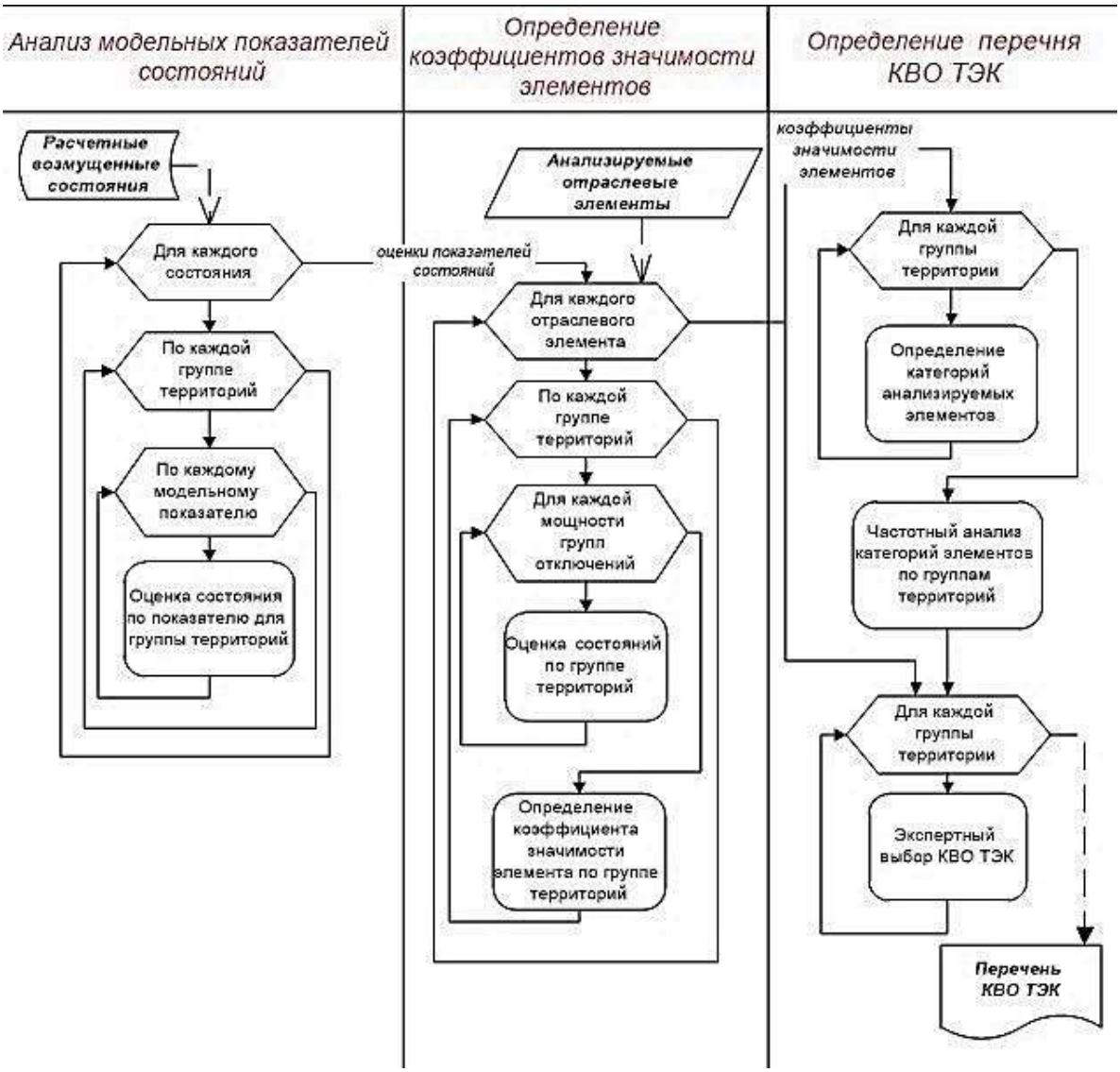

Рис. 3. Алгоритм формирования перечня критически важных объектов топливно-энергетического комплекса
Fig. 3. Formation algorithm of the list of critically important facilities of the fuel and energy complex

ТЭК на оценку правдоподобности получаемых с ее помощью результатов. Данное исследование было проведено на модели функционирования ТЭК (рис. 4) с детализированной 378 узловой расчетной схемой ЕСГ России, представленной 80 субъектами Российской Федерации. Анализировалось в исследовании влияние отключений критических объектов газовой отрасли (61 элемент) на функционирование ТЭК в целом. Результатом поочередного отключения этих объектов стало снижение производства рассматриваемых в модели энергоресурсов, появление их дефицита у потребителей. Анализ результатов исследований показал следующую картину.

Системный эффект взаимосогласованного функционирования отраслей значительно снизил потенциальный дефицит энергоресурсов от недопоставки газа, изменил приоритетность критических элементов газовой отрасли для ТЭК в целом. По стране для случаев отключений данных объектов были получены дефициты, представленные на рис. 5. Дальнейший анализ критичности отключений проводился для объектов, чья неработоспособность привела к значительным дефицитам по системе в целом (суммарный дефицит более 5%). В результате в первоначальном списке из 61 объекта газовой отрасли осталось 25 элементов (рис. 6–7). Определяемый при этом показатель значимости учитывал сработку запасов, величину дивер-

сификации топлива на электростанциях, имеющих двойную топливоподачу. Эти технологические возможности позволили снизить последствия недопоставки топлива из-за отключения анализируемых объектов газовой отрасли.

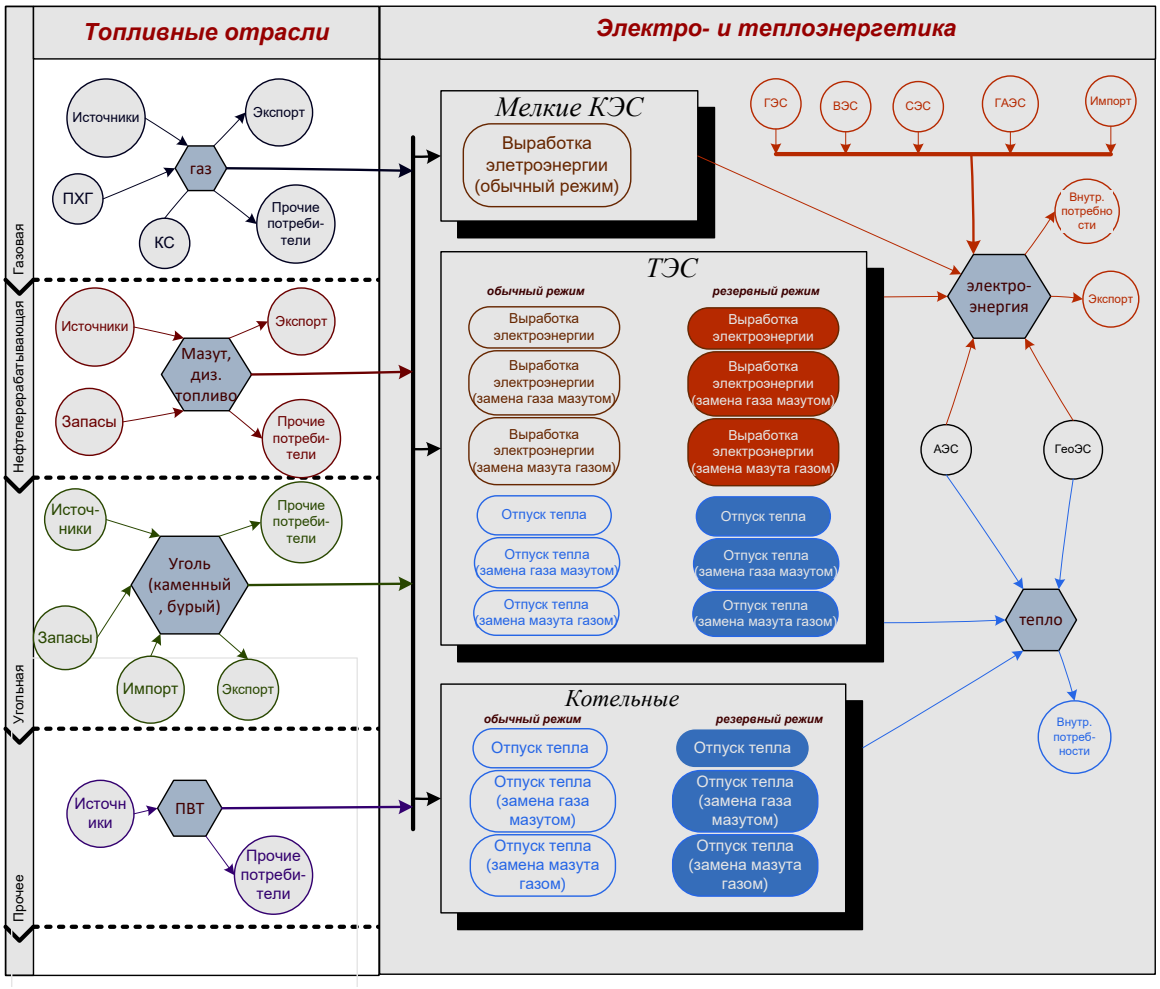

Рис. 4. Технологическая структура модели функционирования топливно-энергетического комплекса для определения критически важных для него объектов газовой отрасли
Fig. 4. Technological structure of the model of fuel and energy complex operation to identify critically important gas industry facilities

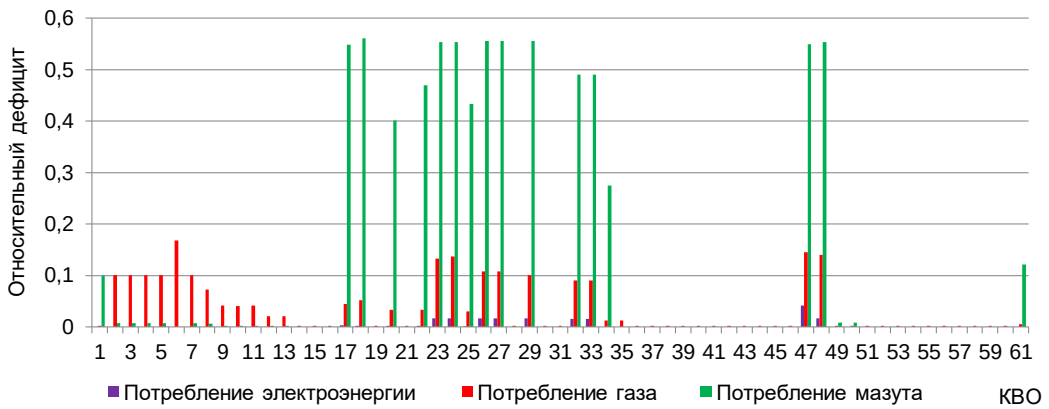

Рис. 5. Относительный дефицит энергоресурсов при отключении критических элементов газовой системы, доля ед.
Fig. 5. Relative shortage of energy resources when critically important facilities of the gas system are cut off, proportion in units

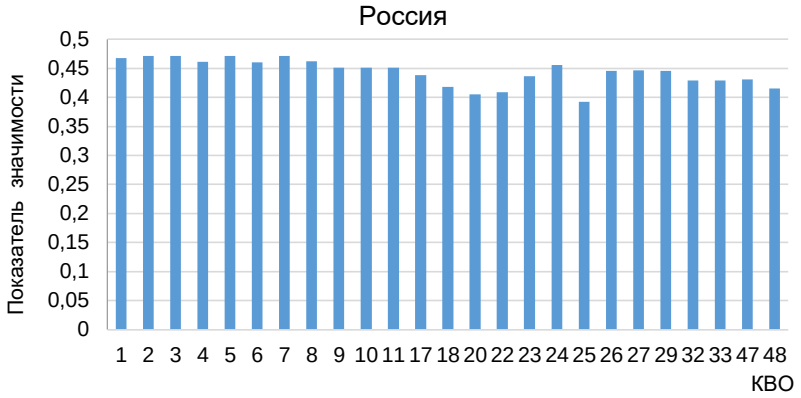

Рис. 6. Показатели значимости критических элементов газовой системы
Fig. 6. Indicators of gas system critical element importance

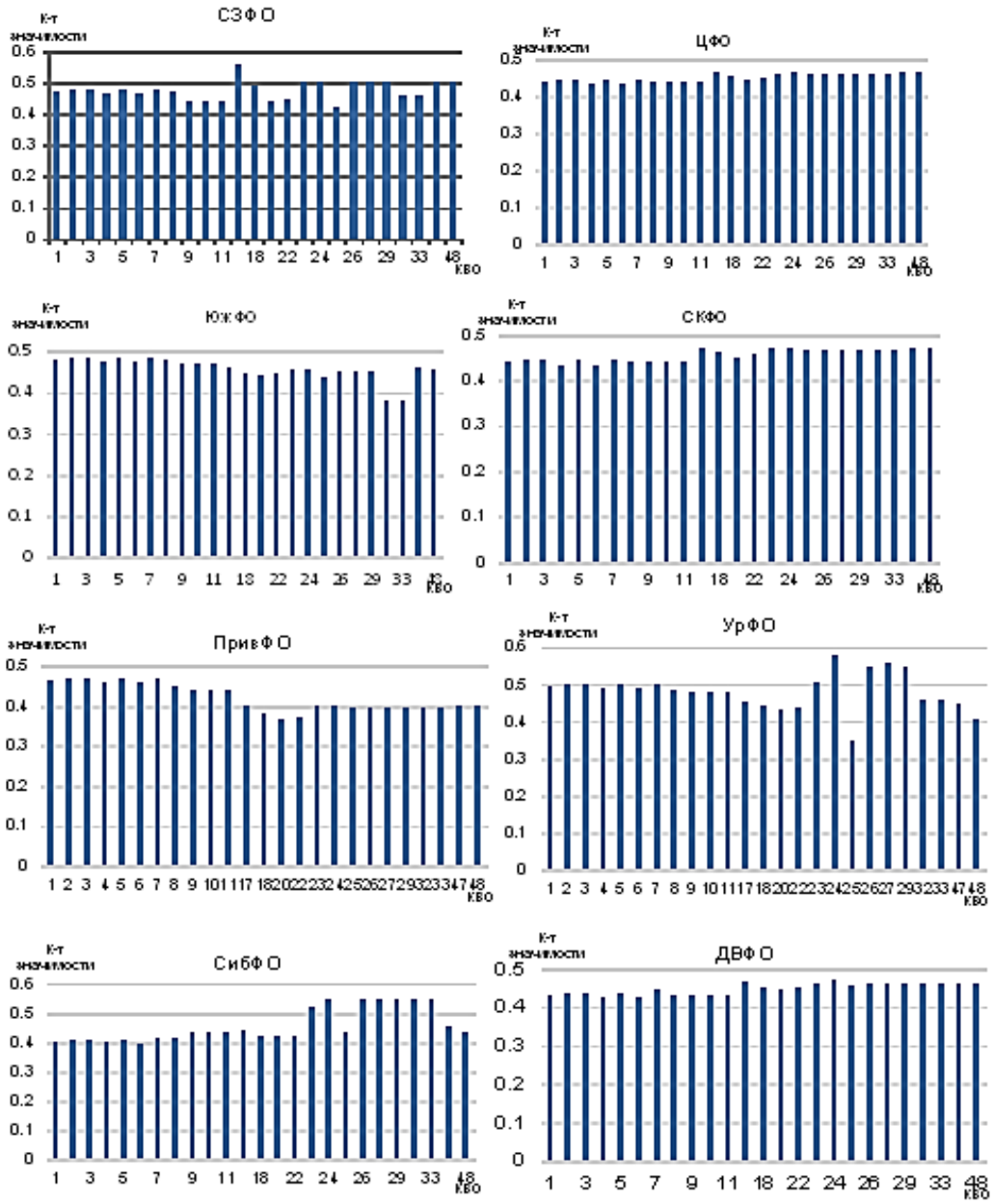

Рис. 7. Показатели значимости критических элементов газовой системы по федеральным округам
Fig. 7. Indicators of gas system critical element importance by federal districts

Классификация критических элементов газовой отрасли по влиянию на энергоснабжение потребителей
Classification of critically important elements of gas industry by their impact on energy supply of consumers

Федеральный округ	1 кат. (100–70%)	2 кат. (69–30%)	3 кат. (29–0%)
Центральный (ЦФО)	14	–	11
Северо-Западный (СЗФО)	10	3	12
Южный (ЮжФО)	12	11	2
Северо-Кавказский (СФКО)	14	–	11
Приволжский (ПривФО)	14	–	11
Уральский (УрФО)	6	14	5
Сибирский (СибФО)	7	7	11
Дальневосточный (ДВФО)	13	–	12

Ранжирование объектов по показателю значимости выявило разность приоритетности объектов в федеральных округах и по стране в целом (рис. 7). Качественный анализ был выполнен по трем категориям критичности. К первой категории были отнесены объекты, вызывающие суммарный относительный дефицит свыше 70%. Раскладка дефицитов по оставшимся категориям: от 30 до 70% для второй категории, ниже 30% для третьей. Количество критических элементов по этим группам по территории страны (по федеральным округам) распределилось следующим образом: значительный дефицит был получен на территориях, топливно-энергетический баланс которых ориентирован на использование природного газа, это Северо-Кавказский, Приволжский, Центральный и Южный округа, где количество критических элементов первой категории составило 12–14 объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена преемственность методики выбора КВО ТЭК. Разработана и формализована общая схема выбора КВО ТЭК на базе отраслевых критических элементов. Дана сравнительная характеристика отраслевой (на примере газовой отрасли) методики выбора критических элементов и методики формирования перечня КВО ТЭК с учетом системного эффекта.

В статье формализована используемая для определения КВО ТЭК территориально-производственная модель функционирования ТЭК, описана реализованная трехэтапная схема работы с ней. Представлена разработанная методика определения КВО ТЭК в условиях взаимосвязанной работы отраслевых систем. Для выбора КВО ТЭК выделены важнейшие и сопутствующие модельные показатели, предложен интегральный показатель критичности отраслевых элементов.

Список литературы

1. Su Huai, Zio Enrico, Zhang Jinjun, Li Xueyi. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 175. P. 79–91. http://doi.org/10.1016/j.ress.2018.03.006
2. Carvalho R., Buzna L., Bono F., Masera M., Arrowsmith D.K., Helbing D. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions // PloS ONE. 2014. Vol. 9. No. 3. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090265
3. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures // Reliability Engineering and System Safety. 2016. Vol. 152. P. 137–150. http://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.009
4. Johansson J., Hassel H., Zio E. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems // Reliability Engineering & System Safety. 2013. Vol. 120. P. 27–38. https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.027
5. Popescu C.-A., Simion C.P. A method for defining critical infrastructures // Energy. 2012. Vol. 42. Issue 1. P. 32–34. http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.025
6. Augutis J., Jokšas B., Krikštolaitis R., Urbonas R. The assessment technology of energy critical infrastructure // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 1494–1504. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.079
7. Zio E., Golea L.R. Analyzing the topological, electrical and reliability characteristics of a power transmission system for identifying its critical elements // Reliabiity Engineering & System Safety. 2012. Vol. 101. P. 67–74. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.009
8. Lu Weiwei, Su Meirong, Fath B.D., Zhang Mingqi, Hao Yan. A systematic method of evaluation of Chinese natural gas supply security // Applied Energy. 2016. Vol. 165. P. 858–867. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.120
9. Han F., Zio E., Kopustinskas V., Praks P. Quantifying the importance of elements of a gas transmission network from topological, reliability and controllability perspectives, considering capacity constraints // Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice. 2016.

P. 2565–2571. https://doi.org/10.1201/9781315374987-389
10. Senderov S.M., Smirnova E.M., Vorobev S.V. Analysis of vulnerability of fuel supply systems in gas-consuming regions due to failure of critical gas industry facilities // Energy. 2020. Vol. 212. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118785
11. Pyatkova N., Beresneva N., Edelev A. Research of critical energy infrastructures taking into account energy security // Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web Conferences. 2017. Vol. 25. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172501006
12. 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 & System Safety. 2020. Vol. 203. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107046
13. Воробьев С.В., Еделев А.В. Поиск критически важных объектов газовой отрасли с помощью метода определения критических элементов в сетях технических инфраструктур // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 68. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2017. С. 76–84.
14. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделев 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 Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 1. С. 70–78.
15. Senderov S.M., Edelev A.V. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security // Energy. 2019. Vol. 184. P. 105–112. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063
16. Воропай Н.И., Стенников В.А. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. 314 с.
17. Воропай Н.И. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных исследований СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
18. Воропай Н.И., Гуринович В.Д., Дзюбина Т.В., Добровольская Т.В., Домышев А.В., Дьяков А.Ф. [и др.]. Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2014. 284 с.
19. Пяткова Н.И., Сендеров С.М., Пяткова Е.В. Методические особенности исследования проблем энергетической безопасности на современном этапе // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 2. С. 81–87.
20. Beresneva N.M., Pyatkova N.I. The approach to determining vulnerable elements in critical energy infrastructures // Methodological problems in reliability study of large energy systems: E3S Web Conferences. 2019. Vol. 139. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901017

References

1. Su Huai, Zio Enrico, Zhang Jinjun, Li Xueyi. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018;175:79–91. http://doi.org/10.1016/j.ress.2018.03.006
2. Carvalho R, Buzna L, Bono F, Masera M, Arrowsmith DK, Helbing D. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions. *PloS ONE*. 2014;9(3). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090265
3. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016;152:137–150. http://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.009
4. Johansson J, Hassel H, Zio E. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013;120:27–38. https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.027
5. Popescu C.-A., Simion C.P. A method for defining critical infrastructures. *Energy*. 2012;42(1):32–34. http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.025
6. Augutis J, Jokšas B, Krikštolaitis R, Urbonas R. The assessment technology of energy critical infrastructure. *Applied Energy*. 2016;162:1494–1504. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.079
7. Zio E, Golea LR. Analyzing the topological, electrical and reliability characteristics of a power transmission system for identifying its critical elements. *Reliabiity Engineering & System Safety*. 2012;101:67–74. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.009
8. Lu Weiwei, Su Meirong, Fath BD, Zhang Mingqi, Hao Yan. A systematic method of evaluation of Chinese natural gas supply security. *Applied Energy*. 2016;165:858–867. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.120
9. Han F, Zio E, Kopustinskas V, Praks P. Quantifying the importance of elements of a gas transmission network from topological, reliability and controllability perspectives, considering capacity constraints. *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*. 2016;2565–2571. https://doi.org/10.1201/9781315374987-389
10. Senderov SM, Smirnova EM, Vorobev SV. Analysis of vulnerability of fuel supply systems in gas-consuming regions due to failure of critical gas industry facilities. *Energy.* 2020;212. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118785
11. Pyatkova N, Beresneva N, Edelev A. Research of critical energy infrastructures taking into account energy security. In: *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web Conferences*. 2017;25. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172501006
12. Senderov SM, Vorobev SV. Approaches to the identification of critical facilities and critical combinations of facilities in the gas industry in terms of its operability. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;203. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107046
13. Vorobiev SV, Edelev AV. Search for critically important gas industry facilities using the method of critical

element determination in the networks of engineering infrastructures. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki. Vypusk 68. Issledovanie i obespechenie nadezhnosti sistem energetiki = Methodological Issues of Large Energy System Reliability Research. Issue 68. Research and Provision of Energy System Reliability*. / ed. NI Voropaj. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 76–84. (In Russ.)
14. Senderov SM, Rabchuk VI, Edelev AV. Features of formation of the list of critical objects of the Russian gas pipeline network from the viewpoint of energy security and ways to minimize negative consequences of emergency situations at such objects. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2016;1:70–78. (In Russ.)
15. Senderov SM, Edelev AV. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security. *Energy.* 2019;184:105–112. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063
16. Voropaj NI, Stennikov VA. *Hierarchical modeling of power systems* / ed. NI Voropaj, VA Stennikov. Novosibirsk: Geo; 2020, 314 p. (In Russ.)
17. Voropaj NI. *Systems research in power engineering: a retrospective of scientific research of the Siberian Energy Institute – Melentiev Energy Systems Institute (SEI-ESI)*/ ed. NI Voropaj. Novosibirsk: Nauka; 2010, 686 p. (In Russ.)
18. Voropaj NI, Gurinovich VD, Dzyubina TV, Dobrovol'skaya TV, Domyshev AV, D'yakov AF, et al. *Reliability of energy systems: problems, models and their solution methods* / ed. NI Voropaj. Novosibirsk: Nauka; 2014, 284 p. (In Russ.)
19. Pyatkova NI, Senderov SM, Pyatkova EV. Methodological aspects of energy security investigation researches on the contemporary stage. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2014;2:81–87. (In Russ.)
20. Beresneva NM, Pyatkova NI. The approach to determining vulnerable elements in critical energy infrastructures. In: *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web Conferences*. 2019;139. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Береснева Наталья Михайловна,
кандидат технических наук,
научный сотрудник Отдела энергетической безопасности,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Пяткова Наталья Михайловна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Отдела энергетической безопасности,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: nata@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia M. Beresneva,
Cand. Sci. (Eng.),
Researcher of the Department of Energy Security,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia;
✉ e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Natalia M. Pyatkova,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Department of Energy Security,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia;
e-mail: nata@isem.irk.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.09.20; одобрена после рецензирования 02.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 21.09.20; approved after reviewing 02.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.