
УДК 620.9.002.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЭК
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОТРАСЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ
ДЛЯ НАДЕЖНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

© 2021 г. Н. М. Береснева¹, *, Н. И. Пяткова¹, **

¹*Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия*

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

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

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Для решения задачи выявления критически важных для ТЭК отраслевых объектов (КВО ТЭК) предложен вариант разработки необходимых для этого моделей функционирования ТЭК с детализированными расчетными отраслевыми схемами. Актуальность выявления таких объектов обосновывается требованием обеспечения надежного топливо- и энергоснабжения потребителей в нормальных и нештатных ситуациях в энергетике. Использование территориально-производственных моделей ТЭК для проведения подобных исследований обосновывается необходимостью учета взаимосогласованной работы систем энергетики, имеющихся механизмов структурной избыточности. Рассмотрен вариант разработки модели для выбора КВО ТЭК на базе разноразрядных исследовательских моделей. Уникальность данной разработки состоит в интеграции в модель ТЭК схемы Единой системы газоснабжения России. Данная особенность объясняется целью проводимых исследований – необходимостью определения критически важных объектов газовой отрасли в условиях совместного функционирования отраслей. Результаты апробации созданной модели функционирования ТЭК приведены по федеральным округам России на уровне количественных и качественных оценок критичности анализируемых объектов газовой отрасли. Апробация показала значительное влияние эффекта взаимосогласованного функционирования отраслей на топливо- и энергообеспечение потребителей, выявила различия в приоритетности критических объектов газовой отрасли и объектов ТЭК.

Ключевые слова: критически важные объекты, модель функционирования ТЭК, системы энергетики, показатель значимости элементов

DOI: 10.31857/S0002331021020059

ВВЕДЕНИЕ

Задача поиска КВО ТЭК [1, 2] актуализировалась в последние несколько лет, стала логическим продолжением задачи выбора критически важных отраслевых объектов [3–6]. Основная идея этой задачи – подтверждение критичности отраслевых объектов в условиях совместной работы всех отраслей и существующих механизмов обеспечения потребителей необходимыми энергоресурсами. В основу реализации этой задачи была положена двухэтапная схема исследований, на первом этапе которой на уровне отдельных отраслей определялись критические отраслевые объекты, а на втором этапе в рамках общеэнергетических исследований подтверждалась их значимость для ТЭК в целом. Такая схема исследований опиралась на двухуровневую систему моделей,

включающую отраслевые модели исследования и территориально-производственные модели ТЭК [7–9].

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КВО ТЭК

Методологически задача определения КВО ТЭК была формализована на уровне общеэнергетических исследований и имела следующую краткую постановку.

Необходимо в рамках сценарных исследований функционирования ТЭК на базе складывающихся у различных категорий потребителей дефицитов ТЭР дать оценку критичности отраслевых объектов для отдельных территорий или их групп при условии, что:

- перечень отраслевых объектов представлен найденными на отраслевой модели критически важными отраслевыми объектами;
- расчетные сценарии – ситуации неработоспособности заданных отраслевых объектов (задаются отключения отдельных объектов, либо их групп);
- оценка критичности каждого отраслевого объекта для ТЭК в целом – обобщенная оценка относительных дефицитов по всем ресурсам у всех категорий потребителей;
- выбор КВО ТЭК осуществляется с учетом степени сработки возможностей структурной избыточности в отраслях.

Данная постановка задачи предполагала получение количественных, качественных и экспертных оценок критичности анализируемых отраслевых объектов, требовала предварительной проработки установок проводимых исследований. В основу анализа был положен показатель значимости объекта, комплексно характеризующий изменения анализируемых модельных показателей в случае неработоспособности элемента. Данный показатель определялся по всему множеству расчетных состояний с различными комбинациями его отключений:

$$ZO_i = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K ZO_i^{j,k} ZC^j \right], \quad ZO_i^{j,k} = \sum_{r=1}^R ZS_r^{j,k} / R,$$

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

Важнейшей качественной оценкой важности объекта стала его категория критичности, идентифицирующая группы объектов с близкими оценками их проблематичности для ТЭК в целом. Формализация идентификации категории критичности элементов (наиболее критичной считается первая категория) была представлена следующими соотношениями:

$$CAT_i^w = f(ZO_i^w, N), \quad N = \{n_l\}, \quad l = \overline{1, L}, \quad n_l = \{n_l^{low}, n_l^{up}\}, \quad l = \overline{1, L},$$

$$CAT_i^w = \begin{cases} l, & \text{если } (ZO_i^{\max} \times n_l^{low}) \leq ZO_i^w < (ZO_i^{\max} \times n_l^{up}), \quad l = \overline{2, L} \\ 1, & \text{если } ZO_i^w \geq (ZO_i^{\max} \times n_l^{low}), \quad l = 1 \end{cases},$$

$$ZO_i^{\max} = \max(ZO_i^w), \quad w = \overline{1, W}, \quad \text{где}$$

Применение такой технологии модификации моделей для решения задачи поиска КВО ТЭК:

- не противоречит двухэтапной схеме определения критически важных для ТЭК отраслевых объектов, на первом этапе которой определяются критические отраслевые объекты, на втором доказываются их критичность для ТЭК в целом;
- позволяет получить модель исследования ТЭК для второго этапа определения КВО с необходимой степенью детализации отраслевых объектов;
- поддерживает возможность моделирования механизмов резервирования и взаимозаменяемости ресурсов в модели функционирования ТЭК;
- позволяет учитывать особенности существующей информационной составляющей, ее состав и степень ее согласованности.

В случае определения критически важных для ТЭК объектов газовой отрасли применение данной технологии позволило добиться идентичности расчетной схемы ЕСГ страны в моделях обоих уровней, позволило напрямую формировать сценарии неработоспособности анализируемых отраслевых объектов. Совместное использование отраслевой и общеэнергетической информации с разной степенью ее детализации было достигнуто без дополнительной подготовки данных по объектам газовой отрасли. Важнейшим результатом модификации модели ТЭК стала корректировка режимов функционирования объектов электро- и теплоэнергетики.

Соотношение базовых и результирующей моделей исследования по ключевым аспектам функционирования отраслей представлено в табл. 1.

Особенностями новой версии модели функционирования ТЭК для определения критически важных для ТЭК объектов газовой отрасли стали:

- интеграция расчетной схемы ЕСГ России из отраслевой модели в общеэнергетическую;
- моделирование режима резервной работы объектов генерации электроэнергии и тепла;
- формирование блока коэффициентов сезонной неравномерности, блока удельных стоимостных и штрафных коэффициентов.

Интеграция расчетной схемы ЕСГ России в модель функционирования ТЭК была выполнена со следующими допущениями:

1. В схеме ЕСГ для территорий из зоны влияния ЕСГ допускалась замена потребителей газа на объекты из модели ТЭК. Таким образом сохранилась принятая в модели ТЭК категорированность потребителей, было соблюдено взаимодействие газовой отрасли, электро- и теплоэнергетики.

2. Для территорий, находящихся в зоне влияния ЕСГ, неизменными остались заданный в отраслевой модели состав источников, компрессорных станций, ПХГ, газопроводов. При этом было соблюдено соответствие объемов добычи газа в обеих моделях по данным территориям.

3. Для территорий, не входящих в зону влияния ЕСГ, были актуализированы данные модели ТЭК по добыче и потреблению газа. При наличии транспортной инфраструктуры вне ЕСГ (например, на Дальнем Востоке) в модель ТЭК были дополнительно включены соответствующие укрупненные транспортные схемы.

Расчеты на модели ТЭК с такой детализированной схемой газовой отрасли России показали наличие запертых источников газа в случае привязки последних к потребителям, схематично не связанными с территориями их размещения. Другим следствием различного представления потребителей в разноуровневых моделях стала необходимость верификации характеристик газопроводов. В целом, полученные на преобразованной отраслевой схеме ЕСГ результаты функционирования ТЭК были признаны адекватными с позиций взаимосвязанной работы отраслей.

Моделирование резервного режима функционирования ТЭС и котельных было выполнено с учетом дополнительного отпуска электроэнергии и тепла в случае возрос-

Таблица 1. Ключевые характеристики используемых моделей

	Базовые модели		Модель ТЭК для определения КВО ТЭК
	модель ТЭК	модель ЕСГ	
Временной аспект технологических процессов	Год, сутки	Сутки	Сутки
Состав ресурсов	Газ, мазут топочный, уголь (каменный, бурый), ПВТ, тепло, электроэнергия	Газ	Газ, мазут топочный, дизельное топливо, уголь (каменный, бурый), ПВТ, тепло, электроэнергия
Особенности представления технологических процессов топливных отраслей	Агрегировано по различным типам отраслевых объектов, по субъектам РФ	Технологические узлы ЕСГ России: источники, ПХГ, компрессорные станции, потребители (районы, города, крупнейшие ГРЭС), нитки газопроводов	Газовая отрасль: 1. В зоне влияния ЕСГ: – источники, ПХГ, компрессорные станции, нитки газопроводов; – закрепленные за субъектами группы ТЭС, группы котельных, прочие потребители; – страны-импортеры. 2. Вне зоны влияния ЕСГ субъекты-источники, субъекты-потребители По другим отраслям: источники, объекты хранения, агрегированная железнодорожная сеть, обязательные потребности регионов, страны-импортеры, страны-экспортеры
Особенности представления технологических процессов в электро- и теплоэнергетике	АЭС, ГЭС, ТЭС; ВЭС, СЭС, ГеоЭС, ГАЭС, котельные, закрепленные за субъектами РФ. Транспортная инфраструктура – агрегированная сеть ЛЭП. Страны-экспортеры, страны-импортеры электроэнергии		Агрегировано по станциям (АЭС, ГЭС, ТЭС, мелкие КЭС, ВЭС, СЭС, ГеоЭС, ГАЭС) и котельным, закрепленным за субъектами РФ. Транспортная инфраструктура – агрегированная сеть ЛЭП. Страны-экспортеры, страны-импортеры электроэнергии
Структурная избыточность	Запасы топлива в субъектах на начало расчетного периода, взаимозаменяемость газа и мазута на ТЭС и в котельных в обычном режиме их эксплуатации	Максимальный суточный отбор газа из ПХГ	В топливных отраслях (кроме газовой) запасы ресурсов в субъектах на начало расчетного периода. В газовой отрасли максимальный суточный отбор газа из ПХГ. В электро- и теплоэнергетике задание дополнительных генерирующих возможностей ТЭС и котельных, поддержка взаимозаменяемости газа и мазута при эксплуатации данных объектов

ших потребностей в этих ресурсах в отопительный период. Для этого использовалась и согласовывалась информация из двух источников:

– из статистической отчетности по производственным характеристикам ТЭС и котельных в отчетном году;

– из информационно-аналитического доклада ФКБУ «РЭА» Минэнерго России «Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России», ежемесячной отчетности системного оператора Единой энергетической системы.

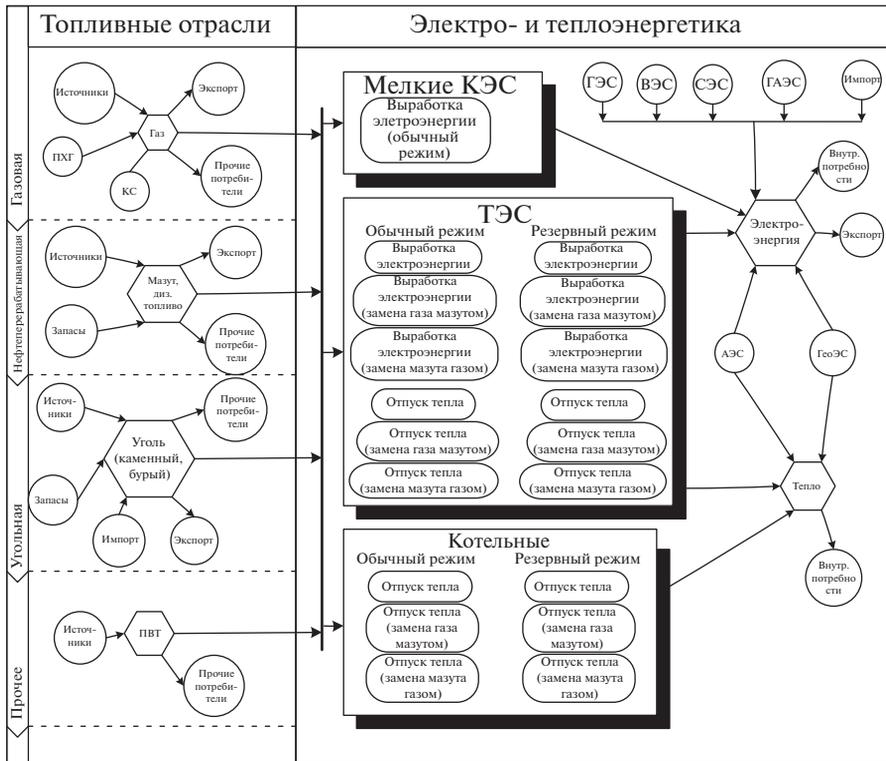


Рис. 3. Технологическая структура модели функционирования ТЭК для определения критически важных для ТЭК объектов газовой отрасли.

Необходимость согласования этих источников обосновывалась:

- встречающейся в статотчетности некорректностью данных по производственным возможностям ТЭС и котельных;

- узкой специализацией используемой информационно-аналитической отчетности.

Определялись резервные возможности отпуска тепла и электроэнергии ТЭС и котельными по следующей схеме:

- определение пиковых суточных потребностей в электроэнергии и тепле из используемой информационно-аналитической отчетности;

- определение резервных возможностей отпуска электроэнергии и тепла ТЭС и котельными для заданных производственных возможностей этих объектов;

- проверка покрытия пиковых суточных потребностей в электроэнергии и тепле с учетом резервных возможностей ТЭС и котельных;

- дополнительная корректировка заданных резервных возможностей ТЭС и котельных с учетом структуры отпуска электроэнергии и тепла, структуры расхода топлива, особенностей обеспечения территорий котельно-печным топливом. Также дополнительно учитывалось снижение выработки электроэнергии ГЭС в зимний период.

Результатом модификации исследовательских моделей стала новая версия модели функционирования ТЭК с отраслевой структурой, концептуально представленной на рис. 3. В расчетах при определении КВО ТЭК в качестве базового использовался суточный вариант максимума нагрузки объектов энергетики, учитывающий резервные

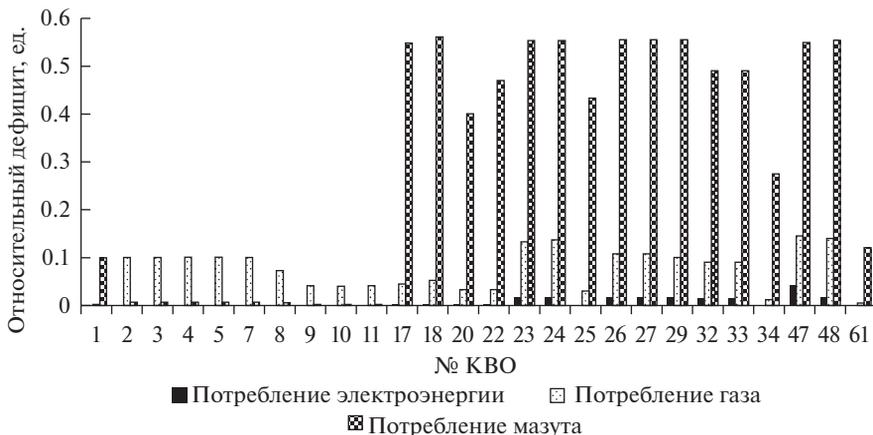


Рис. 4. Относительный дефицит энергоресурсов при отключении критических элементов газовой системы, доля ед.

возможности генерирующих возможностей станций. Выбор КВО осуществлялся из множества возмущенных вариантов отключения отраслевых критических элементов при максимальной загрузке объектов.

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЭК

Новая версия модели функционирования ТЭК представлена 80 субъектами федерации, агрегированными по 8 федеральным округам. Технологически она включает ключевые топливные отрасли (газовую, угольную, нефтеперерабатывающую), электро- и теплоэнергетику (рис. 3). Газовая отрасль в модели представлена расчетной схемой ЕСГ России, дополненной изолированными газодобывающими районами. Расчетная схема ЕСГ состоит из 378 узлов (источников и потребителей газа, подземных хранилищ газа, узловых компрессорных станций), 486 дуг (магистральных газопроводов и отводов на распределительные газовые сети). Электро- и теплоэнергетика включает тепловые станции и котельные, для которых смоделирован резервный режим работы оборудования, предусмотрена взаимозаменяемость газа и мазута.

С использованием разработанной модели было проведено исследование влияния 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 дефицитов у различных категорий потребителей. Анализ результатов расчетов показал следующую картину.

В целом по стране при отключении критических объектов газовой отрасли сложились дефициты энергоресурсов, вынесенные на рис. 4. Согласно экспертным установкам, анализ критичности объектов проводился только для случаев значительных суммарных дефицитов (свыше 5%) хотя бы по одному энергоресурсу. При этом список отраслевых критических объектов сократился до 25 элементов. Такое резкое сокращение списка было вызвано влиянием эффекта системного взаимодействия отраслей. Расчет и анализ показателя критичности оставшихся объектов газовой отрасли показал изменение их исходной приоритетности (рис. 5), полученной в рамках отдельных модельных исследований ЕСГ страны. Связано это было с учетом в данном показателе

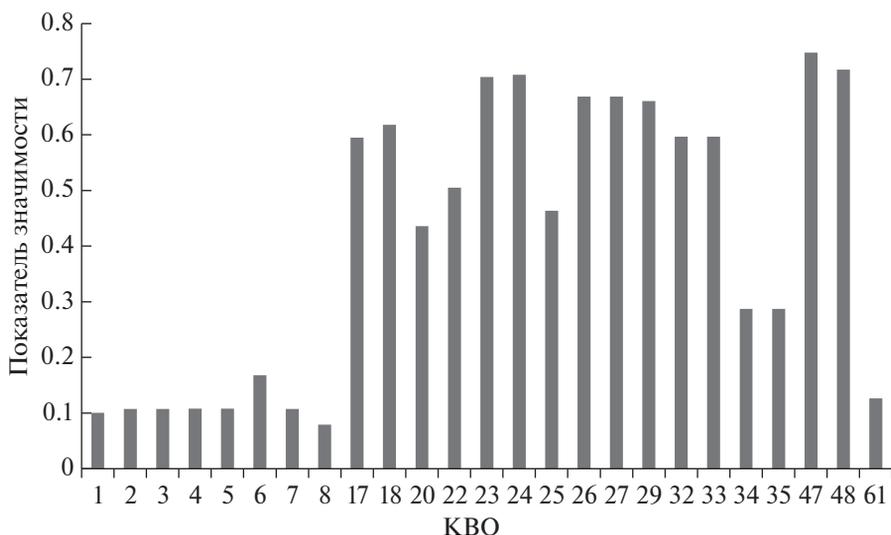


Рис. 5. Показатели значимости критических элементов газовой системы.

сработки запасов топлива, величины диверсификации топлива на электростанциях, имеющих двойную топливоподачу.

Анализ влияния отключений этих объектов на энергоснабжение федеральных округов показал различия в ранжировании этих объектов по отдельным округам и по России в целом.

Качественный анализ критичности объектов газовой отрасли был проведен по трем категориям критичности с порогами 30% и 70%. Наиболее критичной считалась первая категория с суммарными относительными дефицитами свыше 70%. Количество критических элементов по этим группам по федеральным округам распределилось следующим образом (табл. 2). Значительный дефицит был получен на территориях, чей топливно-энергетический баланс ориентирован на использование природного газа. Это Северо-Кавказский, Приволжский, Центральный и Южный округа, где количество критических элементов первой категории составило 12–14 объектов.

Таблица 2. Классификация критических элементов газовой отрасли по влиянию на энергоснабжение потребителей

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены основные особенности построения моделей ТЭК для проведения исследований по определению критически важных отраслевых объектов. Эти особенности связаны:

- с учетом временного аспекта технологических процессов в отраслях ТЭК;
- с представлением технологических процессов в топливных отраслях и особенно в электро- и теплоэнергетике;
- с выделением средств структурной избыточности для снижения воздействия аварийных ситуаций при отключении критически важных элементов отраслевых систем.

Рассмотрена модель функционирования ТЭК с детализированным представлением ЕСГ России. Приведены результаты экспериментальных расчетов по определению КВО ТЭК с использованием новой версии модели. Представлены результаты анализа по величине относительных дефицитов, по показателям значимости критических элементов газовой отрасли по стране и федеральным округам.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beresneva N.M., Pyatkova N.I.* Choosing of the FEC critical objects in model researches of energy security problems and its features // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2018). 2018. V. 58. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803004>
2. *Пяткова Н.И., Береснева Н.М.* Определение критических элементов топливно-энергетического комплекса с позиций надежного энергоснабжения // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 1.
3. *Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделева А.В.* Особенности формирования перечня критических объектов газотранспортной сети России, подлежащих энергетической безопасности, и возможные меры по минимизации негативных последствий чрезвычайных ситуаций на таких объектах // Труды Российской академии наук. Энергия. 2016. № 3.
4. *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. V. 203.
5. *Воробьев С.В., Еделева А.В.* Применение метода определения критических элементов в сетях технических инфраструктур для поиска критически важных объектов газотранспортной сети России // Энергетическая политика. 2018. № 1.
6. *Senderov S., Edelev A.* Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security // Energy. 2019. V. 184. P. 105–112.
7. Иерархическое моделирование систем энергетики / под ред. Воропая Н.И., Стенникова В.А. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”. 2020.
8. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / Отв. ред. Воропай. Н.И. Новосибирск: Наука, 2010.
9. *Дьяков А.Ф., Стенников В.А., Сендеров С.М. и др.* Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука, 2014.
10. *Береснева Н.М.* Методические вопросы модификации экономико-математических моделей в исследованиях энергетической безопасности России // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2.

Modeling the FEC Functioning in Determining Critical Important Facilities for Reliable Energy Supply

N. M. Beresneva^{a,*} and N. I. Pyatkova^{a,**}

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

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

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

In order to solve the problem of identifying critical for the fuel and energy complex facilities (CF FEC), a variant of developing the functioning of the fuel and energy complex models with detailed calculate industry schemes is proposed. The relevance of identifying such ob-

jects is justified by the requirement to ensure reliable fuel and energy supply to consumers in normal and emergency situations in the energy sector. The use of the fuel and energy complex territorial production models for conducting such studies is justified by the need to take into account the mutually consistent operation of energy systems, the existing mechanisms of structural redundancy. The article considers the option of developing a model for the selection of the critical facilities fuel and energy complex on the basis of multilevel research models. The uniqueness of this development lies in the integration of the scheme of the Russia Unified Gas Supply System into the fuel and energy complex model. This feature is explained by the purpose of the research being carried out – the need to identify the critical facilities of the gas industry in the context of the joint functioning of the industries. The results of the created model approbation are given for the federal districts of Russia at the level of quantitative and qualitative assessments for the criticality of the analyzed the gas industry objects. The approbation showed a significant effect of the industries mutually coordinated functioning on the fuel and energy supply of consumers, revealed differences in the priority of critical facilities in the gas industry and fuel and energy complex facilities.

Keywords: critical facilities, a model of functioning of the fuel and energy complex, energy systems, an indicator of the importance of elements