



УДК 621.311.1+622.69.019.3+620.9.338.9

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СНАБЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ГАЗОМ И НАДЕЖНЫМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ© Г.Ф. Ковалёв¹, Д.С. Крупенёв², Т.В. Дзюбина³^{1,2,3}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН),
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.^{2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье кратко изложены методические подходы к взаимоувязанному моделированию надежности электроэнергетической и газоснабжающей систем, а именно к оценке балансовой надежности электроэнергетических систем с учетом надежного снабжения газом электрических станций. Предлагаются «поузловой» и «системный» подходы. В рамках «системного» подхода осуществлен анализ надежности газоснабжающей системы Северо-Западного ФО и балансовой надежности электроэнергетической системы данного ФО как без учета надежности снабжения электростанций газом, так и с учетом газоснабжения электростанций на январь 2015 г.

Ключевые слова: электроэнергетическая система; газоснабжающая система; оценка надежности; агрегированные расчетные схемы; аварийность оборудования; снабжение потребителей газом или электроэнергией; показатели надежности.

INTERRELATION BETWEEN POWER PLANT GAS SUPPLY AND RELIABLE ELECTRIC POWER SYSTEM OPERATION**G.F. Kovalev, D.S. Krupenev, T.V. Dzyubina**

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The paper briefly describes the methodological approaches to the interdependent modeling of electric power system and gas supply system reliability, namely the approaches to assess electric power system adequacy in terms of reliable gas supply of power plants. Unit and system approaches are proposed. Using the system approach, the authors analyze the reliability of the gas supply system and the adequacy of the electric power system of the Northwestern Federal District both including and excluding the reliability of power plant gas supply in January 2015.

Keywords: electric power system; gas supply system; reliability assessment; aggregated design schemes; equipment failure rate; gas or power supply to consumers; reliability indexes.

Введение

В энергетическом балансе некоторых регионов России доля генерации электроэнергии на газе превышает 70%. Согласно прогнозам развития российской электроэнергетики тенденция ввода тепловых электрических станций (ТЭС) на газе будет усиливаться. В итоге комплексная характеристика надежности электроэнергетической системы (ЭЭС) должна отражать влияние всех технологических звеньев ЭЭС на конечные показатели электроснабжения потреби-

телей. В работе [1] показана необходимость совместного рассмотрения надежного функционирования газоснабжающей системы (ГСС) и электроэнергетической системы по причине того, что обеспеченность другими ресурсами и, особенно, другими видами первичных энергоресурсов, как минимум, на порядок выше. Там же приведены методические подходы для совместного анализа случайных событий и процессов в системах поставки газа и генерации электроэнергии.

¹Ковалёв Геннадий Федорович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с позиций энергетической безопасности, тел.: 89149193551, e-mail: kovalev@isem.irk.ru

Kovalev Gennadiy, Doctor of technical sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Energy Sector Development in terms of Energy Security, Energy Systems Institute SB RAS, tel.: 89149193551, e-mail: kovalev@isem.sei.irk.ru

²Крупенёв Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, старший научный сотрудник лаборатории развития ТЭК с позиций энергетической безопасности, тел.: 89246087827, e-mail: krupenev@isem.irk.ru

Krupenev Dmitriy, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Senior Researcher at the Laboratory of Energy Sector Development in terms of Energy Security, Energy Systems Institute SB RAS, tel.: 89246087827, e-mail: krupenev@isem.irk.ru

³Дзюбина Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства, старший научный сотрудник лаборатории развития систем газоснабжения, тел.: 89041506053, e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Dzyubina Tatiana, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Economy, Senior Researcher at the Laboratory for Gas Supply Systems Development, Energy Systems Institute SB RAS, tel.: 89041506053, e-mail: tvleo@isem.irk.ru

**Краткое описание методологии**

Предлагается для комплексного анализа надежности совместной работы ГСС и ЭЭС использовать на начальном этапе способ, при котором учитывается влияние последствий отказов газовой системы на надежность ЭЭС, но сеть природного газа не моделируется совместно с ЭЭС, т.е. сначала моделируется работа ГСС и оценивается ее надежность. Затем моделируется функционирование ЭЭС с учетом последствий отказов ГСС.

Предлагается два методических подхода к учету надежности работы ГСС при анализе балансовой надежности ЭЭС: «*поузловой*» и «*системный*». В качестве первого приближения к решению задачи можно рассмотреть «*поузловой*» подход. Суть его заключается в учете надежности функционирования магистрального газопровода (МГ) в зависимости от аварийности оборудования при исследовании балансовой надежности и безотказности ЭЭС. Для этой цели используется модель анализа надежности действующего МГ [2].

При «*системном*» подходе комплексный анализ надежности интегрированной системы (ГСС и ЭЭС) предлагается осуществлять в виде передачи результирующих данных из модели по оценке надежности сложной ГСС [3] в модель для оценки надежности сложной ЭЭС в качестве исходных данных [4]. Таким образом, при задании данных по аварийности ТЭС, работающих на газе, учитывается дополнительная

вероятность отказа этих станций вследствие ненадежной работы ГСС.

Пример оценки балансовой надежности ЭЭС с учетом надежности снабжения электростанций газом

Экспериментальные исследования предложенного «системного» подхода к оценке надежности электроэнергетической системы проводились на схеме энергосистемы Северо-Западного федерального округа (СЗФО). Доля генерирующей мощности энергосистемы СЗФО, использующей газ в качестве первичного энергоресурса, составляет более 70% [4] от суммарной генерирующей мощности. На рис. 1 представлены расчетные схемы системы газоснабжения и энергосистемы СЗФО, пунктирной линией отмечены функциональные связи взаимодействия данных систем.

Оценка надежности газоснабжения электрических станций и других потребителей проводилась для одного месяца (января как наиболее напряженного в плане энергопотребления). Все данные по ГСС и ЭЭС приведены на уровне 2015 г. Исходная информация по спросу на газ для потребителей СЗФО, его экспорту в ближнее и дальнее зарубежье, по оценке верхних ограничений и других технико-экономических показателей добычи и транспорта для расчетов на математических моделях готовилась с учетом информации по усредненному сценарию развития экономики.

Основные технические характеристики агрегированных связей ГСС СЗФО указаны в табл. 1.

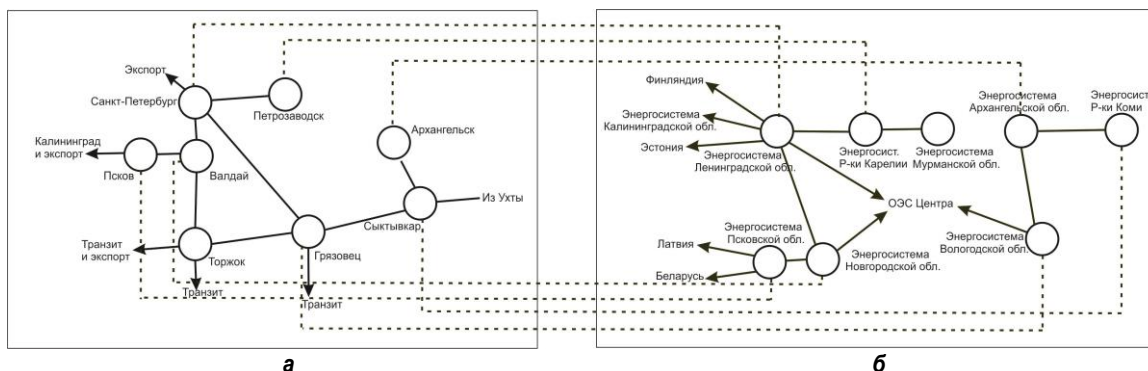


Рис. 1. Расчетные схемы ГСС (а) и ЭЭС (б) СЗФО с функциональными связями

Таблица 1

Технические показатели агрегированных связей ГСС СЗФО, 2015 г.

Наименование связи	Нитки: кол-во/диаметр, мм ²	Пропускная способность, млрд м ³ /год	Длина связи, км
Сыктывкар – Грязовец	4/1420 2/1220	210	550
Сыктывкар – Архангельск	1/1420	30	508
Грязовец – Торжок	4/1420 2/1220	210	539
Грязовец – Санкт-Петербург (+ Грязовец – Выборг)	1/1420 2/1220 1/1020	55+49=104	639
Торжок – Валдай	2/1220 1/1020	22	180
Валдай – Псков	1/1020	9	259
Валдай – Санкт-Петербург	1/1020 1/720	13	304
Санкт-Петербург – Петрозаводск	1/720	4	523



Объемы потребления природного газа субъектами СЗФО и его экспортных поставок в 2015 году приведены в табл. 2.

Таблица 2
Годичное потребление газа в узлах ГСС СЗФО, 2015 г.

Название узла	Экспорт и транзит, млрд м ³ /год	Спрос, млрд м ³ /год	Всего, млрд м ³ /год
Петрозаводск	0	0,6	0,6
Сыктывкар	0	7	7
Архангельск	0	1,7	1,7
Грязовец	0	7,3	7,3
Санкт-Петербург	50	19,5	69,5
Валдай	0	3,5	3,5
Псков	2,5	1,4	3,9
Торжок	45	4,6	49,6
Всего по СЗФО	97,5	45,9	143,4

Поступление природного газа в ГСС СЗФО осуществляется из источников, представленных в табл. 3, здесь же приведен поставляемый объем газа в год.

Таблица 3
Источники газа

Наименование источника	Поток, млрд м ³ /год
Из Ухты	132
Из Гаврилов-Яма (Ярославль)	12

При оценке надежности ГСС СЗФО была учтена работа подземных хранилищ газа (ПХГ), технические данные которых приведены в табл. 4.

Таблица 4
Показатели ПХГ

Наименование узла	Верхнее ограничение, млрд м ³ /год
Колпинское ПХГ	0,25
Невское ПХГ	1,1

Показатели аварийности магистральных газопроводов, представленные в табл. 5, были взяты из [5] и усреднены по годам.

Таблица 5
Показатели аварийности газопроводов

Диаметр, мм ²	1420	1220	1020	720
Интенсивность отказов λ , 1/(1000 км·год)	0,15	0,25	0,39	0,54

В результате оценки надежности ГСС СЗФО были получены показатели надежности газоснабжения потребителей по узлам, а именно вероятности удовлетворения спроса потребителей, указанные в табл. 6.

Таблица 6
Показатели надежности ГСС СЗФО

Название узла	Вероятность бездефицитного газоснабжения потребителей
Петрозаводск	0,935208
Сыктывкар	0,997083
Архангельск	0,997083
Грязовец	0,994958
Санкт-Петербург	0,969208
Валдай	0,994958
Псков	0,977292
Торжок	0,994958

Из полученных результатов оценки надежности ГСС видно, что вероятность бездефицитного газоснабжения находится на достаточно высоком уровне, показатель принимает значение, большее 0,99, в пяти узлах из восьми. Наиболее низкие показатели надежности выявлены в узлах: Псков, Санкт-Петербург, Петрозаводск. Данные узлы наиболее сильно удалены от источника газа, хотя в Санкт-Петербурге имеются подземные газохранилища, но они оказывают незначительное влияние на показатели.

Основные характеристики расчетной схемы энергосистемы СЗФО представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7
Характеристика связей энергосистемы СЗФО

Связываемые узлы	Пропускная способность линии в прямом и обратном направлениях, МВт	Аварийность q , 1/100 км	Длина, км
ЭЭС Псковской обл. – ЭЭС Новгородской обл.	360	0,00195	242
ЭЭС Ленинградской обл. – ЭЭС Новгородской обл.	360	0,00195	75,5
		0,00195	92
ЭЭС Ленинградской обл. – ЭЭС Респ. Карелии	360	0,00195	300
	135	0,00272	134
ЭЭС Респ. Карелии – ЭЭС Мурманской обл.	360	0,00195	81
ЭЭС Архангельской обл. – ЭЭС Респ. Коми	135	0,00272	210
ЭЭС Архангельской обл. – ЭЭС Вологодской обл.	135	0,00272	152



Таблица 8

Характеристика узлов энергосистемы СЗФО

Название узла	Располагаемая мощность, МВт	Абсолютный максимум нагрузки, МВт
ЭЭС Псковской обл.	434	396
ЭЭС Новгородской обл.	203	726
ЭЭС Ленинградской обл.	10158	7928
ЭЭС Республики Карелии	949	1540
ЭЭС Мурманской обл.	3678	2628
ЭЭС Архангельской обл.	1654	1361
ЭЭС Республики Коми	2249	1600
ЭЭС Вологодской обл.	1339	2552

В ходе исследований была оценена надежность электроэнергетической системы СЗФО как без учета надежности снабжения электростанций газом, так и с учетом газоснабжения электростанций. Результаты расчетов приведены в табл. 9 и на рис. 2–4 (цвета: темный – с учетом надежности ГСС, светлый – без учета).

Из полученных результатов видно, что, хотя доля генерации на газе в СЗФО более 70%, при учете надежности ГСС показатели надежности электроснабжения в целом в узлах ЭЭС СЗФО изменились на малые величины по сравнению с результатами без

учета надежности газоснабжения. Данные результаты показывают, что существующая ЭЭС СЗФО весьма сбалансирована и имеет достаточные маневренные возможности для надежной поставки электроэнергии потребителям. С другой стороны, в некоторых узлах, таких как ЭЭС Республики Карелии и ЭЭС Псковской обл., влияние надежности ГСС на надежность ЭЭС достаточно заметно, что показывает актуальность исследований надежности совместной работы ГСС и ЭЭС при решении задач планирования развития и проектирования рассматриваемых систем.

Таблица 9

Показатели балансовой надежности ЭЭС СЗФО

Название узла	Показатели балансовой надежности ЭЭС без учета надежности ГСС			Показатели балансовой надежности ЭЭС с учетом надежности ГСС		
	P	π	$E_{нед.}$	P	π	$E_{нед.}$
ЭЭС Псковской обл.	0,998555	0,999743	64,055	0,997259	0,999503	123,946
ЭЭС Новгородской обл.	0,999944	0,999997	1,290	0,999944	0,999997	1,290
ЭЭС Ленинградской обл.	0,999944	0,999998	10,154	0,999944	0,999998	10,154
ЭЭС Республики Карелии	0,992859	0,999438	524,274	0,987581	0,999279	672,845
ЭЭС Мурманской обл.	0,997770	0,999947	84,381	0,997763	0,999946	85,348
ЭЭС Архангельской обл.	0,999944	0,999997	2,502	0,999944	0,999997	2,502
ЭЭС Республики Коми	0,998984	0,999943	57,837	0,998982	0,999938	62,540
ЭЭС Вологодской обл.	0,999999	0,999999	0	0,999999	0,999999	0

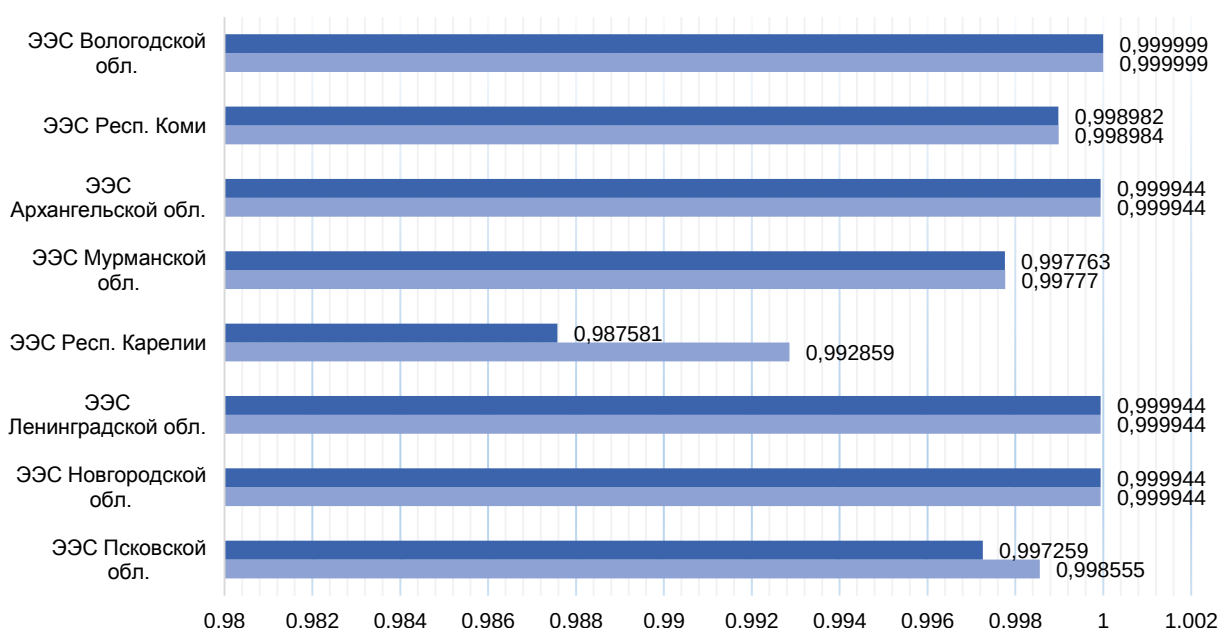


Рис. 2. Вероятность безотказной работы

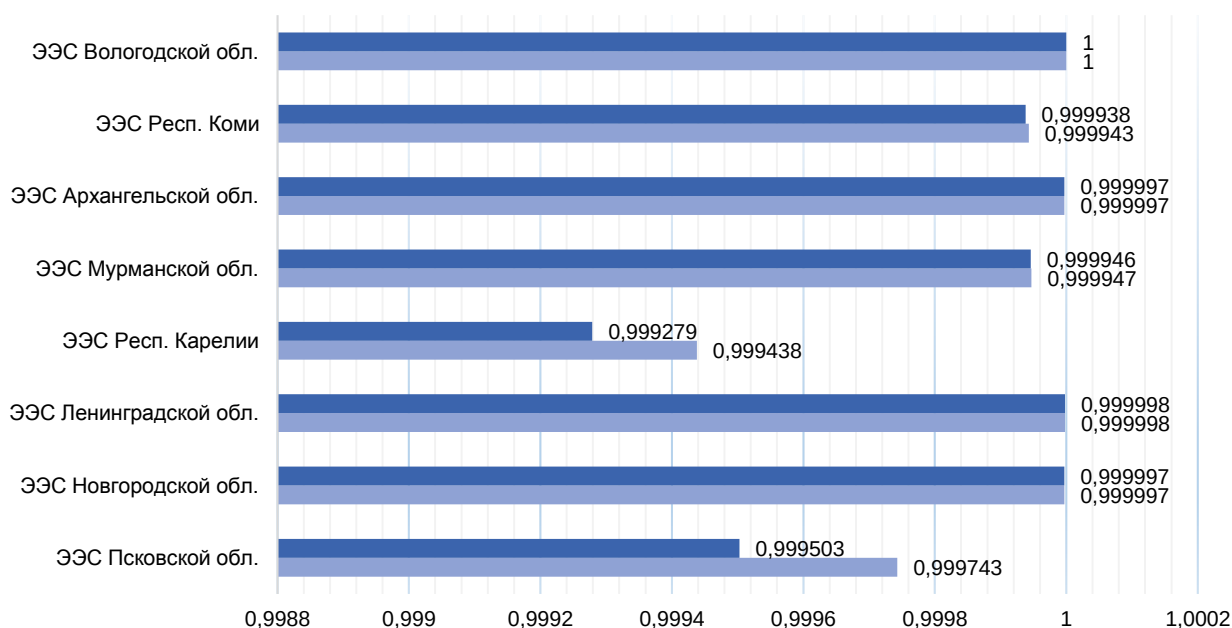


Рис. 3. Коэффициент обеспеченности потребителей электроэнергией

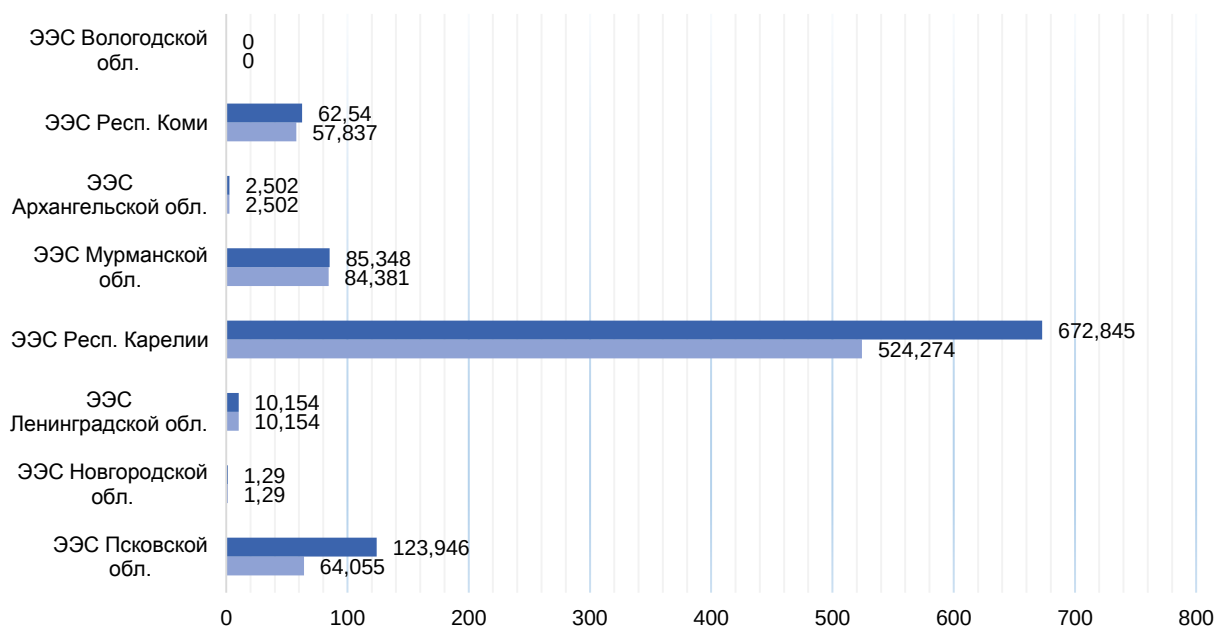


Рис. 4. Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии

Закключение

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

1. Обоснована необходимость разработки взаимосвязанного моделирования надежности электроэнергетической и газоснабжающей систем. Кратко описаны методические подходы к совместному анализу случайных событий и процессов в системах поставки газа и генерации электроэнергии – «поузловой» и «системный» подходы.

2. В рамках «системного» подхода осуществлен

анализ надежности газоснабжающей системы Северо-Западного ФО и балансовой надежности электроэнергетической системы данного округа как без учета надежности снабжения электростанций газом, так и с учетом газоснабжения электростанций на январь 2015 г.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева и Центра энергетических систем Сколковского института науки и технологий.

Статья поступила 24.08.2015 г.



Библиографический список

1. Ковалёв Г.Ф., Крупенёв Д.С., Дзюбина Т.В. Комплексный подход к оценке балансовой надежности ЭЭС с учетом надежного снабжения электростанций газом // Вестник ИргТУ. 2015. № 9. С. 140–145.
2. Дзюбина Т.В., Илькевич Н.И. Методические подходы и математические модели для анализа и синтеза надежности при многоуровневом исследовании газоснабжающих систем // Надежность систем энергетики / под ред. Н.И. Воропая. Новосибирск: Наука, Сибирское предприятие РАН, 1999. С. 325–333.
3. Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск: Наука, 2014. 217 с.
4. Ковалёв Г.Ф., Лебедева Л.М. Модель оценки надежности электроэнергетических систем при долгосрочном планировании их работы // Электричество. 2000. № 11. С. 17–24.
5. Гостинин И.А., Вирысов А.Н., Семенова М.А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1618> (3.08.15).

УДК 621.181: 676.038.4

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ КОРОДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ К СЖИГАНИЮ В КОТЛЕ БКЗ-320-140 ПТ-5 С ЖИДКИМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ СОВМЕСТНО С УГЛЕМ© А.Н. Кудряшов¹, Н.Е. Буйнов², А.Д. Мехряков³

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Дается оценка работы по обследованию тракта топливоподачи для возможности подачи кородревесных отходов котла БКЗ-320-140 ПТ-5 ст. № 7 филиала ПАО «Иркутскэнерго» Иркутской ТЭЦ-6 при сжигании непроектного топлива КДО в смеси с ирбейским углем, а также в чистом виде. Выявлен ряд проблем и особенностей в использовании КДО, связанных с особенностями топлива. Даны рекомендации по реконструкции тракта топливоподачи, обеспечению требований противопожарной безопасности, предотвращению самовозгорания КДО.

Ключевые слова: котел с жидким шлакоудалением; кородревесные отходы; пыль высокой концентрации; мuffleные горелки; топливоподача; система пылеприготовления; износ оборудования; противопожарная безопасность.

PREPARATION FEATURES OF BARK WASTE FOR BURNING IN БКЗ-320-140 ПТ-5 BOILER WITH LIQUID SLAG REMOVAL TOGETHER WITH COAL**A.N. Kudryashov, N.E. Buinov, A.D. Mekhryakov**

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The paper estimates the work on fuel supply haul examination for the possible supply of bark waste of БКЗ-320-140 ПТ-5 boiler of the station #7, a branch of PJSC "Irkutskenergo" of Irkutsk CHP-6 under the burning of non-project bark waste fuel either mixed with Irbeiskiy coal or in its pure form. A number of problems and peculiarities in the use of bark waste related to the specific features of fuel has been revealed. The recommendations are given for the reconstruction of the fuel supply haul, as well as for the provision of fire safety requirements and prevention of spontaneous combustion of bark waste.

Keywords: boiler with liquid slag removal; bark waste; high-density pulverized coal; muffle burner; fuel supply; pulverization system; depreciation of equipment; fire safety.

Сжигание кородревесных отходов (КДО) в топочных камерах котлов с жидким шлакоудалением, оборудованных системами пылеприготовления с промежуточными бункерами пыли и способом транспорта пыли высокой концентрации под разрежением (ПВКр), на сегодняшний день является инновационной задачей. В мировой практике отсутствуют наработки по

сжиганию кородревесных отходов на таком составе оборудования, однако решение данной задачи позволяет решить ряд экологических и экономических вопросов, таких как сокращение залежей кородревесных отходов на территории предприятий г. Братска, сокращение выбросов серы, что также повлечет увеличение надежности работы оборудования ввиду сниже-

¹Кудряшов Александр Николаевич, кандидат технических наук, зав. кафедрой теплоэнергетики, тел.: 89086639363, e-mail: kan@istu.irk.ru

Kudryashov Aleksandr, Candidate of technical sciences, Head of the Department of Thermal Power Engineering, tel.: 89086639363, e-mail: kan@istu.irk.ru

²Буйнов Николай Егорович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, тел.: 89021707173, e-mail: buinov@istu.irk.ru

Buinov Nikolai, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, tel.: 89021707173, e-mail: buinov@istu.irk.ru

³Мехряков Антон Дмитриевич, магистрант, тел.: 89149279627, e-mail: A.meh@mail.ru

Mekhryakov Anton, Master's degree student, tel.: 89149279627, e-mail: A.meh@mail.ru