
УДК 622.691.019 (470)

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ ГАЗОПОТРЕБЛЯЮЩИХ РЕГИОНОВ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПРЕКРАЩЕНИЯ РАБОТЫ ОСОБО ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

© 2020 г. С. М. Сендеров¹, *, Е. М. Смирнова¹, С. В. Воробьев¹

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

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

Поступила в редакцию 26.11.2019 г.

После доработки 27.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Статья посвящена формированию подходов к анализу уязвимости топливоснабжения регионов, потребляющих природный газ в условиях прекращения работы особо значимых объектов газовой отрасли. Приводятся результаты определения особо значимых объектов газовой отрасли для процесса топливоснабжения регионов. На основании результатов исследований и информации о доле газа в структуре топливно-энергетических балансов регионов формируется ранжированный по степени уязвимости систем топливоснабжения (в условиях прекращения работы данных объектов) перечень регионов РФ наиболее подверженных угрозе дефицита в поставках первичных ТЭР в анализируемых условиях.

Ключевые слова: уязвимость, особо значимые объекты, газовая отрасль, топливно- и энергоснабжение

DOI: 10.31857/S0002331019060086

ВВЕДЕНИЕ

При анализе показателей работы энергетических систем в нештатных условиях работы активно используется такое единичное свойство надежности как живучесть [1]. При этом под живучестью системы или объекта понимается свойство противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей, и восстанавливать исходное состояние объекта или близкое к нему. Там же в [1] отмечено и это подтверждается [2–6 и др.], что анализу вопросов живучести в англоязычной литературе сопутствует термин “уязвимость” (vulnerability). Если живучесть предполагает некоторую “активность” объекта или системы при их противостоянии возмущениям, то уязвимость отражает скорее “пассивную” реакцию объекта на возмущения. По сути, уязвимость можно рассматривать как противоположное свойство по отношению к живучести. В [2] уязвимость трактуется как *неспособность (системы или объекта) противостоять воздействию агрессивной среды*. Примерно то же понимание технологической уязвимости, как *вероятности выхода технологической системы из строя по вине внешних воздействий*, представлено в [7 и др.].

В [8–10 и др.] значительное внимание уделено методам поиска критически важных объектов газовой отрасли России, т.е. тех объектов, от надежной работы которых критически зависит процесс удовлетворения спроса на газ со стороны его потребителей. Несмотря на имеющиеся возможности газовой отрасли минимизировать недопоставки газа потребителям в условиях ЧС на ее объектах, такие ситуации возможны и, к со-

жалению, реализуются на практике. Часто отсутствует возможность оперативной замены недопоставленных объемов природного газа другими видами топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Соответственно, в условиях резких перерывов в поставках газа у значительной части потребителей возникают существенные проблемы с топливо- и энергоснабжением. В этом случае, чем меньше доля газа в структуре приходной части топливно-энергетического баланса (ТЭБ) региона, тем объективно меньше ожидаемые негативные последствия от его недопоставки, т.е. тем менее уязвима система топливо- и энергоснабжения региона в случаях аварийных перерывов поставок природного газа. В данном случае, заблаговременно планируя свою политику в области топливо- и энергоснабжения и формулируя обоснованную, с учетом требований энергетической безопасности, долю газа в структуре ТЭБ, регион может активно влиять на уровень своей уязвимости при перерывах поставок природного газа.

Важным является вопрос, каким образом прекращение работы отдельных объектов газовой отрасли будет влиять на процесс поставки требуемых объемов газа конкретному потребителю. Речь может идти об аварийном прекращении работы отдельных объектов ЕСГ, либо о прекращении работы возможных сочетаний таких объектов. Направление исследований здесь можно сформулировать, как анализ показателя уязвимости системы газоснабжения региона при прекращении работы отдельных объектов ЕСГ. Выше уже указывалось на работы по определению критически важных объектов (КВО) газовой отрасли [8–10]. Но кроме КВО в достаточно сложной и разветвленной газотранспортной системе России присутствует значительное количество объектов, прекращение работы которых способно привести к значимым ограничениям поставок газа в тот или иной регион. Эти объекты предлагается определить в ходе специального исследования, сформировать их ранжированный перечень и в дальнейших исследованиях называть их особо значимыми объектами (ОЗО) ЕСГ. Перечень ОЗО ЕСГ по числу объектов будет превышать перечень КВО ЕСГ и теоретически должен полностью включить все их в себя.

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ

При рассмотрении проблемы уязвимости регионов – потребителей природного газа – при перерывах в его поставках необходимо рассматривать две основные составляющие. Одна из них – доля природного газа в структуре потребления КППТ региона, другая – показатель уязвимости системы газоснабжения данного региона при прекращении работы отдельных ОЗО газовой отрасли и их сочетаний.

Формально определение этой величины для отдельного потребляющего газ региона может выглядеть следующим образом:

$$V_i^G = \Delta_i^G V_i^{Gsup}, \quad (1)$$

где V_i^G – показатель уязвимости системы топливоснабжения i -го региона при прекращении работы отдельных ОЗО ЕСГ; Δ_i^G – доля природного газа в приходной части ТЭБ i -го региона; V_i^{Gsup} – показатель уязвимости системы газоснабжения i -го региона при прекращении работы отдельных ОЗО ЕСГ.

С определением значений первой составляющей выражения (1) особых проблем нет, при этом используется статистическая информация о структуре ТЭБ каждого конкретного региона. Как трактовать и как формировать значения второй составляющей?

В [3 и др.] такой показатель называется усредненным уровнем неудовлетворенного спроса (average level of unsatisfied demand (ALUD)). Его значение определяется по следующей формуле:

$$ALUD_i = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{Demand_i - Capacity_i^k}{Demand_i}}{N}, \quad (2)$$

где $ALUD_i$ – средний уровень неудовлетворенного спроса на ресурс у потребителя i ; $Demand_i$ – спрос на ресурс у потребителя i ; $Capacity_i^k$ – поставка ресурса потребителю i по сценарию k ; N – количество рассматриваемых сценариев.

В общем случае данный показатель может характеризовать средневзвешенную уязвимость системы снабжения конкретного потребителя определенным ресурсом при различных сценариях. Данный подход используется его авторами в условиях равной вероятности выхода из строя отдельных элементов системы. При этом конкретные исследования могут базироваться на различных сценариях выхода из строя отдельных элементов, либо определенных их сочетаний.

В нашем случае задача состоит в определении средневзвешенной уязвимости системы снабжения ресурсом конкретного потребителя при принудительном прекращении работы отдельных объектов системы, как вариант – при преднамеренных воздействиях на отдельные объекты. На первых порах в рассматриваемом нами случае каждый сценарий представляет собой ситуацию выхода из строя одного элемента сети, или одного объекта ЕСГ. Общее количество сценариев (N) соответствует рассматриваемому количеству объектов ЕСГ.

Практика исследований показывает, что все рассматриваемые элементы сети имеют разное отношение к процессу поставки соответствующего ресурса каждому конкретному потребителю. Прекращение работы каждого из этих элементов будет соответственно по-разному влиять на поставку этого ресурса конкретному потребителю. Такая ситуация справедлива даже в случае одинаковой производительности всех элементов сети, т. к. и их загрузка, и пути от них до потребителя в транспортном графе различны. В то же время возможная производительность (пропускная способность) всех элементов реальной сети в значительной степени различается. В результате, при применении выражения (2) для решения поставленной задачи, значительное количество не столь значимых в анализируемой ситуации для поставки ресурса потребителям объектов может ощутимо превышать (и существенно превышает на практике) количество весьма значимых объектов. С позиций средневзвешенной оценки уязвимости конкретного потребителя при преднамеренных отключениях значимых объектов будет логичным в дальнейших расчетах освободиться от числа объектов, прекращение работы которых не вызовет значимых дефицитов ресурса ни у одного потребителя и говорить об ОЗО системы. Таким образом, при расчетах уязвимости систем снабжения потребителей определенным ресурсом можно остановиться на ограниченном числе сценариев ($N_{\text{ОЗО}}$), модельная реализация которых приведет к ощутимому снижению поставок данного ресурса хотя бы одному из потребителей. В первом приближении минимальное значение такого ощутимого снижения определим в 10%. Таким образом, все узлы, отключение которых будет формировать дефицит газа в 10%, представляют собой особо значимые объекты сети.

Таким образом, в выражении (2) N можно заменить на $N_{\text{ОЗО}}$. Показатель $ALUD$, характеризующий средний уровень неудовлетворенного спроса на ресурс у конкретного потребителя, по сути, аналогичен показателю уязвимости системы газоснабжения i -го региона при прекращении работы отдельных ОЗО ЕСГ, т.е. $V_i^{G \text{ sup}}$ из выражения (1). Учитывая это, формула (2) может трансформироваться в (3).

$$V_i^{G sup} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{OZO}} \frac{Demand_i - Capacity_i^k}{Demand_i}}{N_{OZO}}. \quad (3)$$

В результате проведения данной операции мы получим значение второго множителя выражения (1) — показателя уязвимости системы газоснабжения i -го региона при прекращении работы отдельных ОЗО ЕСГ в количестве N_{OZO} .

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Перейдем к реализации предлагаемого подхода на математической модели газотранспортной сети России. Задача решается посредством использования специально разработанной имитационной потоковой модели газовой отрасли (в рамках ПВК “Нефть и газ России”) [8–11], которая с достаточным уровнем агрегирования позволяет анализировать все аспекты функционирования не только ЕСГ России, но и технологически связанных с ней ГТС европейских стран, импортирующих российский газ. Математическая постановка задачи представлена там же [8–11 и др.] и представляет собой задачу поиска максимального потока ресурса (природного газа) с целью минимизации его дефицита у потребителей. При потокораспределении учитывается информация по удельным стоимостным характеристикам всех технологических процессов, соответственно при решении задачи, стоимость такого максимального потока минимизируется. Расчетная схема модели содержит 382 узла, включая подземные хранилища газа, 28 источников газа (представлены головными компрессорными станциями (КС), 64 потребителя газа, 268 узловых КС, а также 628 дуг, представляющих коридоры магистральных газопроводов и отдельные магистральные газопроводы, а также отводы на распределительные сети.

Сложившаяся в 2018 г. ситуация с загрузкой сети в газовой отрасли России такова: в стране было добыто порядка 725 млрд м³ газа (обычный сетевой природный газ и попутный газ нефтяных месторождений), импортировано в страну 8 млрд м³ природного газа (из среднеазиатских стран); внутреннее потребление (вместе с собственными нуждами газовой отрасли) составило 490 млрд м³; экспортные поставки — 244 млрд м³, в т.ч. в дальнее зарубежье было поставлено около 194 млрд м³ [12, 13]. Информация, используемая при расчетах, базируется на реальной загрузке сети в наиболее напряженные сутки года. Расчетный поток газа по сети в такие сутки составляет порядка 2,3 млрд м³.

В результате модельных исследований, имитирующих работу газовой отрасли России в условиях поочередного отключения каждого из объектов газовой отрасли России, было выявлено 193 ОЗО ЕСГ. Среди этих объектов 94 узла газотранспортной сети и 99 дуг. При этом всего число объектов ЕСГ участвующих в расчете — 1004. Таким образом, 19% из них попадают в перечень ОЗО ЕСГ. В таблице 1 представлена информация по результатам проведенных исследований. В ранжированном виде приведен список тех субъектов РФ в зоне действия ЕСГ, средняя уязвимость топливоснабжения которых при выходе из строя одного из ОЗО ЕСГ составляет 5% и более. Наряду с этим основным показателем в таблице представлена информация о показателях уязвимости системы газоснабжения региона, доле природного газа в приходной части регионального ТЭБ и количеству ОЗО ЕСГ непосредственно влияющих на существенные недопоставки газа в данный регион.

Из анализа данных табл. 1 видно, что уязвимость систем топливоснабжения 41 региона страны (две трети всех регионов в зоне ЕСГ) при прекращении работы по одному объекту из перечня ОЗО составляет 5% и выше. При этом результаты исследования показали, что для некоторых регионов (как минимум восемь первых из табл. 1, исключая Смоленскую область), прекращение работы каждого объекта из списка ОЗО, вли-

Таблица 1. Усредненная уязвимость системы топливоснабжения регионов при выходе из строя одного из ОЗО ЕСГ (показаны с уязвимостью 5% и более)

Субъект РФ	Уязвимость системы газоснабжения	Доля природного газа в ТЭБ	Уязвимость системы топливоснабжения	Кол-во влияющих ОЗО
	доли ед.			шт.
Кировская область	0.171	0.91	0.16	33
Белгородская область	0.114	0.99	0.11	22
Брянская область	0.104	0.98	0.10	20
Смоленская область	0.101	0.99	0.10	21
Курская область	0.098	0.98	0.10	19
Курганская область	0.098	0.95	0.09	19
Тюменская область	0.088	1	0.09	17
Республика Карелия	0.145	0.56	0.08	28
Ленинградская область	0.081	0.96	0.08	23
Нижегородская область	0.075	0.95	0.07	20
Пермский край	0.072	0.97	0.07	14
Калининградская область	0.07	0.95	0.07	28
Челябинская область	0.103	0.61	0.06	21
Калужская область	0.062	0.98	0.06	16
Чеченская Республика	0.057	1	0.06	11
Республика Северная Осетия-Алания	0.057	1	0.06	11
Ставропольский край	0.057	0.99	0.06	11
Орловская область	0.057	0.99	0.06	11
Ульяновская область	0.057	0.98	0.06	11
Чувашская Республика	0.057	0.98	0.06	11
Астраханская область	0.057	0.98	0.06	11
Новгородская область	0.057	0.97	0.06	12
Тульская область	0.065	0.85	0.06	14
Удмуртская Республика	0.057	0.96	0.05	11
Республика Крым	0.057	0.93	0.05	11
Костромская область	0.056	0.94	0.05	11
Омская область	0.095	0.52	0.05	19
Республика Татарстан	0.049	1	0.05	15
Волгоградская область	0.05	0.98	0.05	11
Республика Башкортостан	0.051	0.94	0.05	11
Кабардино-Балкарская Республика	0.047	1	0.05	9
Республика Ингушетия	0.047	1	0.05	9
Московская область	0.048	0.97	0.05	14
Саратовская область	0.047	0.98	0.05	9
Пензенская область	0.047	0.98	0.05	9
Карачаево-Черкесская Республика	0.047	0.98	0.05	9
Краснодарский край	0.047	0.98	0.05	9
Воронежская область	0.047	0.98	0.05	9
Владимирская область	0.047	0.98	0.05	9
Ивановская область	0.047	0.97	0.05	9
Тамбовская область	0.046	0.98	0.05	10

яющих на поставки газа в данный регион, приводит к 100%-му дефициту газа. Т.е., к примеру, прекращение работы любого из 33-х ОЗО, влияющих на процесс газоснабжения Кировской области, неминуемо приведет к полному прекращению подачи газа в данный регион. К слову, Кировская область – безусловный лидер в ранжированном, по степени уменьшения уязвимости топливоснабжения, перечне регионов. Из таблицы 1 видно, что ее усредненный показатель уязвимости при отключении ОЗО ЕСГ по одному составляет 16%. У следующих четырех регионов этот показатель – на уровне 10–11%, что так же опасно с позиций обеспечения надежности топливо- и энергоснабжения в условиях ЧС в ЕСГ.

АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ С ПОМОЩЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСОБО ЗНАЧИМЫХ СОЧЕТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЕСГ

Выше уже было сказано, что задача состояла в определении средневзвешенной уязвимости системы снабжения ресурсом конкретного потребителя при принудительном прекращении работы отдельных объектов системы. При этом мы остановились на количестве рассматриваемых сценариев равном количеству ОЗО ($N_{\text{ОЗО}}$). В таблице 1 представлен соответствующим образом ранжированный перечень регионов. В то же время, особенно в условиях преднамеренных воздействий, возможна ситуация одновременного прекращения работы нескольких объектов системы. Попробуем просчитать ситуацию одновременного отключения сочетаний таких объектов по 2. Расчеты были проведены с использованием программного комплекса [14] детально отражающего функционирование газотранспортной сети России и позволяющего имитировать различные условия функционирования ее объектов, включая полное отключение. В каждом рассматриваемом сценарии решается задача нахождения максимального потока продукта при минимизации его возможной стоимости, т.е. решается задача о максимальном потоке минимальной стоимости [15]. Расчеты проводились с использованием методологии параллельных вычислений на [16].

Исследования показали, что при поиске наиболее значимых, с позиций удовлетворения газом потребителей, сочетаний объектов ЕСГ было проанализировано 1789 тысяч сочетаний, соответственно было проведено столько же расчетов. В результате было найдено 18 528 сочетаний объектов ЕСГ, выход из строя которых, способен вызвать 10% и более относительный дефицит газа хотя бы в одном из рассматриваемых регионов. Таким образом, $N_{\text{ОЗО}}$ в выражении (3) заменим на $N_{\text{ОЗС2}}$, где $N_{\text{ОЗС2}}$ – число особо значимых сочетаний объектов ЕСГ по 2.

Тогда выражение (3) трансформируется в следующее:

$$V_i^{G \text{ sup}2} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{ОЗС2}}} \frac{\text{Demand}_i - \text{Capacity}_i^k}{\text{Demand}_i}}{N_{\text{ОЗС2}}}, \quad (4)$$

где $V_i^{G \text{ sup}2}$ – показатель уязвимости системы газоснабжения i -го региона при прекращении работы особо значимых сочетаний объектов ЕСГ по 2.

В таблице 2 представлена информация по результатам проведенных исследований. В ней, так же как и в табл. 1, в ранжированном виде приведен список тех субъектов РФ в зоне действия ЕСГ, средняя уязвимость топливоснабжения которых при выходе из строя одного из особо значимых сочетаний объектов ЕСГ по 2 составляет 5% и более. Наряду с этим основным показателем в таблице представлена информация о показателях уязвимости системы газоснабжения региона, доле природного газа в приходной части регионального ТЭБ и количеству ОЗС2 формирующих потенциальный дефицит газа в регионе.

Таблица 2. Усредненная уязвимость систем топливоснабжения регионов при выходе из строя одного из сочетаний объектов ЕСГ по 2 (показаны с уязвимостью 3% и более)

Субъект РФ	Уязвимость системы газоснабжения	Доля природного газа в ТЭБ	Уязвимость системы топливоснабжения	Кол-во влияющих ОЗС2
	доли ед.			шт.
Кировская область	0.25	0.91	0.23	4663
Белгородская область	0.16	0.99	0.16	2992
Удмуртская Республика	0.15	0.96	0.14	4672
Алтайский край	0.11	0.09	0.01	2070
Республика Карелия	0.13	0.56	0.07	2499
Курганская область	0.12	0.95	0.11	2238
Челябинская область	0.12	0.61	0.07	2597
Смоленская область	0.11	0.99	0.11	2404
Омская область	0.11	0.52	0.06	2235
Ленинградская область	0.10	0.96	0.10	5722
Тюменская область (без автономий)	0.10	1	0.10	1875
Кемеровская область	0.09	0.03	0.00	1702
Новосибирская область	0.08	0.25	0.02	1539
Пермский край	0.08	0.97	0.08	1586
Нижегородская область	0.08	0.95	0.08	2212
Брянская область	0.07	0.98	0.07	2471
Калужская область	0.07	0.98	0.07	2511
Новгородская область	0.06	0.97	0.06	2308
Рязанская область	0.05	0.69	0.03	1165
Архангельская область	0.04	0.7	0.03	678
Астраханская область	0.04	0.98	0.04	761
Костромская область	0.04	0.94	0.04	2168
Томская область	0.04	0.78	0.03	761
Тульская область	0.04	0.85	0.03	1517
Ульяновская область	0.04	0.98	0.04	761
Орловская область	0.04	0.99	0.04	779
Р-ка Северная Осетия-Алания	0.04	1	0.04	781
Чеченская Республика	0.04	1	0.04	797
Чувашская Республика	0.03	0.98	0.03	618
Ставропольский край	0.03	0.99	0.03	594
Республика Крым	0.03	0.93	0.03	572
Волгоградская область	0.03	0.98	0.03	761
Курская область	0.03	0.98	0.03	573
Московская область	0.03	0.97	0.03	2384
Ханты-Мансийский АО	0.03	0.03	0.00	572
Свердловская область	0.03	0.66	0.02	1020
Республика Башкортостан	0.03	0.94	0.03	873
Республика Коми	0.03	0.83	0.02	480

Сопоставляя полученное выше $N_{\text{ОЗО}}$ равное 193 и $N_{\text{ОЗС2}}$ равное 18528, видим, что при расчете показателя уязвимости знаменатель выражения (4) практически на два порядка (в 96 раз) больше, чем в выражении (3). При этом понятно, что количество особо значимых сочетаний объектов ЕСГ по 2 для конкретного i -го региона не может на 2 порядка превышать количество ОЗО для этого объекта. Соответственно и значения уязвимостей систем газоснабжения и топливоснабжения при расчетах по ОЗО и по ОЗС2 сравнивать друг с другом не стоит.

Из анализа данных табл. 2 видно, что уязвимость систем топливоснабжения 38 регионов страны при прекращении работы по одному сочетанию из перечня ОЗС2 составляет 3% и выше. При этом результаты исследования показали, что для некоторых регионов (пять первых из табл. 2, исключая республику Удмуртию), прекращение работы каждого сочетания из перечня ОЗС2, влияющих на поставки газа в данный регион, приводит к 100%-му дефициту газа. Как и в табл. 1 Кировская область – лидер в ранжированном, по степени уменьшения уязвимости топливоснабжения, перечне регионов. В таблице 2 видно, что ее усредненный показатель уязвимости топливоснабжения при отключении особо значимых сочетаний объектов ЕСГ по одному составляет 23%. Из анализа табл. 2 видно, что у части регионов показатель уязвимости топливоснабжения в случаях отключения одного из особо значимых сочетаний объектов ЕСГ по 2 так же очень высок и составляет более 10%.

Определение показателя усредненной уязвимости систем топливоснабжения регионов при выходе из строя одного из ОЗО ЕСГ является более целесообразным потому, что вероятность выхода из строя сразу пары элементов сети существенно ниже таковой для выхода из строя одного элемента. Оценка усредненной уязвимости систем топливоснабжения регионов при выходе из строя одного из ОЗС2 явилась в некоторой степени уточняющей. Так при сопоставлении таблиц 1 и 2 видно, что в топы рейтингов регионов по показателям усредненной уязвимости в большинстве своем совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявление особо значимых объектов ЕСГ и особо значимых сочетаний объектов ЕСГ и формирование их перечней является следующим за выявлением КВО газовой отрасли шагом на пути формирования перечня особо уязвимых, с позиций топливоснабжения, регионов в условиях реализации ЧС различного характера в газовой отрасли.

Учет в данных исследованиях понятия уязвимости системы топливоснабжения того или иного региона позволяет делать выводы о необходимости планирования проведения мероприятий по снижению данного показателя в ряде регионов. Данные мероприятия могут быть связаны с проведением следующих шагов:

- придание особого статуса указанным объектам с организацией дополнительных мер их охраны для обеспечения бесперебойного выполнения соответствующих функций;
- проектирование и создание дополнительных ниток магистральных газопроводов с целью снижения значимости отдельных объектов для работоспособности всей ЕСГ;
- научно обоснованное планирование, с учетом требований энергетической безопасности, перспективной доли природного газа в структуре приходной части ТЭБ соответствующих регионов.

Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания III.17.5.1 (рег. № АААА-А17-117030310451-0) фундаментальных исследований СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность систем энергетики (Сборник рекомендуемых терминов) / Под ред. Воропая Н.И., М.: ИАЦ “Энергия”, 2007, 192 с.
2. *Villa-gran, Juan Carlos*. Vulnerability: A conceptual and methodological review. // SOURCE, № 2/2006, Bonn, Germany.

3. *Huai Su, Enrico Zio, Jinjun Zhang, Xueyi Li*. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network. // *Reliability Engineering and System Safety* 175 (2018), pp. 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.03.006>
4. *Enrico Zio, Roberta Piccinelli, Giovanni Sansavini*. An All-Hazard Approach for the Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures // *ESREL 2011*, September 2011, Troyes, France. P. 2451–2458.
5. *Min Ouyang*. Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks // *Reliability Engineering and System Safety*, 2016. V. 154. P. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.05.007>
6. *Amin Abedi, Ludovic Gaudard, Franco Romero*. Review of major approaches to analyze vulnerability in power system // *Reliability Engineering and System Safety*, November 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.019>
7. *Brian Martin*. Technological vulnerability // *Technology in Society*. 1996. V. 12. № 4. P. 511–523.
8. *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>
9. *Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделева А.В.* Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных ситуаций на таких объектах // *Известия РАН. Энергетика*. 2016. № 1. С. 70–78.
10. *Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделева А.В.* Методы поиска критически важных объектов газотранспортной сети России с позиций работоспособности отрасли // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*, 2016. № 2(18). С. 278–289.
11. *Voropai N., Senderov S., Edelev A.* Detection of “bottlenecks” and ways to overcome emergency situations in gas transportation networks on the example of the European gas pipeline network // *Energy*, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.038>
12. “Добыча газа в России в 2018 г. выросла почти на 5%” <https://www.interfax.ru/russia/644896> [Электронный ресурс] (дата обращения: 23.04.2019).
13. “Новак: экспорт газа из России вырос в 2018 г. до 225 млрд кубометров” <https://www.vestifinance.ru/articles/112892> [Электронный ресурс] (дата обращения: 23.04.2019).
14. *Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Kostromin R., Edelev A., Massel L.* *Orlando Tools*. Energy Research Application Development through Convergence of Grid and Cloud Computing // *Communications in Computer and Information Science*. 2019. V. 965. P. 289–300.
15. *Ford L.R., Fulkerson D.R.* *Flows in networks*. Princeton University press, Princeton, New Jersey, 1962. P. 276.
16. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс] URL: <http://hpc.irc.ru> (дата обращения: 03.09.2018).

**Approaches to Assessing the Vulnerability of Fuel Supply Systems
of Gas-Consuming Regions of Russia in Terms of Disruption of the Functioning
of Particularly Significant Gas Industry Objects**

S. M. Senderov^{a,*}, E. M. Smirnova^a, and S. V. Vorobev^a

^a*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

^{*}*e-mail: ssm@sem.irk.ru*

The article is devoted to the formation of approaches to the analysis of the vulnerability of fuel supply to regions consuming natural gas in the context of the termination work of particularly significant gas industry objects. When considering the vulnerability of regions—natural gas consumers—during interruptions in its supply, two main components must be considered. One of them is the share of natural gas in the structure of consumption of boiler and furnace fuel in the region, the other is an indicator of the vulnerability of the gas supply system in the region when some particularly important gas industry objects and their combinations stop working. The tasks posed in the study are solved by using a specially developed simulation flow model of the gas industry, which with a sufficient level of aggregation allows

us to analyze all aspects of the functioning of not only the Unified Gas Supply System of Russia, but also the gas transmission systems of European countries importing Russian gas that are technologically related to it. The results of studies to identify particularly significant, for the process of fuel supply to the regions, objects of the gas industry are presented. Based on the results of studies and information on the share of gas in the structure of the regional fuel and energy balances, a list of the regions of the Russian Federation most vulnerable to a shortage in the supply of primary fuel and energy resources in the analyzed conditions is ranked by the degree of vulnerability of the fuel supply systems (in the case of the shutdown of these objects).

Keywords: vulnerability, especially significant objects, gas industry, fuel and energy supply