
УДК 622.691.019(470)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИКОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

© 2021 г. Е. М. Смирнова^{1, *}, С. М. Сендеров¹, С. В. Воробьев¹

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

*e-mail: smirnova.e.m@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 27.10.2020 г.

После доработки 01.12.2020 г.

Принята к публикации 04.12.2020 г.

Подробно рассмотрено влияние пиковых подземных хранилищ газа (ПХГ) на снижение уязвимости систем газоснабжения регионов России в случае прекращения работы важнейших объектов газовой отрасли. На основе моделирования ситуации с учетом введения пиковых ПХГ в систему газоснабжения России проведены соответствующие расчеты. Рассмотрены результаты анализа ситуации и оценки уязвимости систем газоснабжения регионов, расположенных в зоне действия ЕСГ до и после создания указанных ПХГ. Сформирован перечень пиковых ПХГ, ранжированный по эффективности их создания, для снижения уязвимости систем газоснабжения регионов в случаях возникновения ЧС в газовой отрасли.

Ключевые слова: газовая отрасль, подземные хранилища газа, критически важные объекты, уязвимость, топливо- и энергоснабжение

DOI: 10.31857/S0002331021010155

ВВЕДЕНИЕ

В связи с тем, что основной задачей функционирования Единой системы газоснабжения России (ЕСГ) является надежная бесперебойная поставка газа потребителям, то любая значительная по объемам и времени потеря работоспособности одного из критически важных объектов (КВО) газовой отрасли может быть определена как ЧС с газоснабжением. При этом, как указывалось в [1], критически важными объектами предлагается считать объекты, потеря работоспособности которых способна привести к значительным дефицитам газа в системе (5% и более от суммарной потребности в газе).

В мировой практике ведутся многочисленные исследования, посвященные различным аспектам уязвимости энергетических систем и их компонентов, среди наиболее близких к рассматриваемым авторами данного исследования вопросам можно отнести следующие работы.

В исследовании [2] рассмотрена и проанализирована проблема уязвимости критических энергетических инфраструктур к террористическим актам. Исследование [3] предлагает методологию анализа рисков для систем взаимозависимых критических инфраструктур в условиях различных экстремальных погодных явлений.

Исследование [4] представляет вероятностный подход для выявления и ранжирования важных компонентов газовой сети с точки зрения безопасности поставок. Авторы проводят вероятностный анализ рисков региональной европейской газотранспортной

сети при выбранных сценариях атак. Результаты одного миллиона симуляций Монте-Карло в сценариях атак ясно указывают на различные последствия для подачи газа. Таким образом, авторами получен список наиболее важных компонентов инфраструктуры.

В случае недостаточности знаний об инфраструктуре для оценки ее уязвимости применяются вероятностные методы анализа рисков [5–7]. Если накоплены соответствующие данные, то теория статистики используется для анализа и прогнозирования воздействия стихийных бедствий на производительность инфраструктуры [8]. Для учета топологии инфраструктуры при анализе ее структурной уязвимости применяются сетевые подходы, например, теория сложных сетей [9]. В последнее время в зарубежных исследованиях все большее внимание уделяется рассмотрению взаимосвязанных инфраструктур [10] и влиянию взаимодействия между ними на их уязвимость [11, 12].

Ранее в [13] были представлены результаты работы по выявлению и анализу КВО, влияющих на ЕСГ в целом и непосредственно на системы газоснабжения конкретных регионов. Кроме того, в [14] была проведена оценка уязвимости систем топливоснабжения всех регионов РФ в зоне действия ЕСГ в случае прекращения работы отдельных особо значимых объектов газовой отрасли. Был сформирован перечень регионов, ранжированный по степени уязвимости их системы топливоснабжения в условиях указанных отключений.

Одной из возможных мер по уменьшению уязвимости систем газоснабжения регионов может являться изменение конфигурации газотранспортной сети, в том числе при подключении дополнительного источника газа в случае возникновения ЧС. В качестве такого источника могут быть рассмотрены подземные хранилища газа (ПХГ) пикового типа, которые могут быть созданы в российской газотранспортной системе.

ПИКОВЫЕ ПХГ

В целом запасы газа в ПХГ предназначены для регулирования неравномерностей (сезонной и пиковой) газопотребления, а также для обеспечения газом при возникновении нештатных и форс-мажорных ситуаций [15].

В связи с этим создаваемые в ПХГ запасы газа делятся на оперативный резерв и долгосрочный. Пиковый резерв газа – это объем газа, находящийся в ПХГ, который может быть отобран из подземных хранилищ газа сверх товарного (базового) резерва для обеспечения надежности поставок газа при наступлении аномальных похолоданий или возникновении ЧС в ЕСГ. Здесь речь идет о пиковых ПХГ, отличающихся от ПХГ сезонного регулирования меньшим объемом хранимого газа, но значительным объемом максимального суточного отбора. В настоящее время таких пиковых ПХГ в структуре ЕСГ нет.

Согласно [16, 17] на период до 2030 г. планируется ввод 14 новых ПХГ для выравнивания пиковой неравномерности газопотребления, показатели которых представлены в табл. 1.

Таблица 1 наглядно демонстрирует, что к 2030 г. планируется создание нескольких крупных пиковых ПХГ с возможностями по суточному отбору 30 и более млн м³. Территориально ПХГ будут расположены преимущественно в Центральном, Приволжском и Северо-Западном Федеральных округах.

В данном исследовании авторы поставили себе задачу оценить, как повлияет на уязвимость систем газоснабжения регионов создание пиковых ПХГ. При этом следует провести анализ такого влияния каждого из них по отдельности и всех суммарно.

Для этого будем оценивать эффективность пуска таких ПХГ при прекращении работы КВО газовой отрасли (по одному).

Таблица 1. Характеристика пиковых ПХГ РФ по проектам ввода до 2030 г.

№	Пиковое подземное хранилище газа	Субъект РФ	Активный объем газа	Максимальный объем отбора в сутки
			млн м ³	
1	Удмуртский Резервирующий Комплекс	Республика Удмуртия	640	7.5
2	Калининградское	Калининградская область	174	12
3	Беднодемьяновское	Пензенская область	2000	30
4	Новомосковское	Тульская область	340	30
5	Арбузовское	Республика Татарстан	700	12.8
6	Шатровское	Курганская область	1000	14
7	Волгоградское	Волгоградская область	300	0.25
8	Скалинское	Волгоградская область	2292	30
9	Березняковское	Пермский край	324	17
10	Тульское	Тульская область	300	30
11	Смоленское	Смоленская область	600	50
12	Сереговское	Республика Коми	1000	50
13	Серпуховское	Московская область	300	30
14	Шедокское	Краснодарский край	300	30

МОДЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПИКОВЫХ ПХГ НА УЯЗВИМОСТЬ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ РОССИИ

Для моделирования сценариев нарушения работы КВО при функционирующих пиковых ПХГ использована потоковая модель, являющаяся ядром программно-вычислительного комплекса (ПВК) “Нефть и газ России” [18, 19]. Применение этого ПВК позволяет определить степень удовлетворения потребностей в газе внутри страны и обеспечения экспортных поставок. Кроме того, ПВК “Нефть и газ России” позволяет определить “узкие” места – участки ГТС, ограничивающие в некоторых случаях производственные возможности системы.

Модель потокораспределения в ЕСГ, заложенная в ПВК “Нефть и газ России”, предназначена для оценки производственных возможностей ЕСГ в условиях различного рода возмущений. Цель таких исследований – минимизация дефицитов газа по узлам потребления. ЕСГ в модели представлена как совокупность трех подсистем: источники газа, сеть магистрального транспорта и потребители.

Изменение состояния объектов системы приводит к решению задачи распределения потоков в системе с целью максимальной подачи энергоносителя потребителям, т.е. в данном случае модель формализуется как задача о максимальном потоке [20]. Расчетный граф дополняется двумя фиктивными узлами: O – суммарный источник, S – суммарный сток, при этом вводятся дополнительные участки, соединяющие узел O со всеми источниками и всех потребителей с узлом S . Математическая запись поставленной задачи имеет следующий вид:

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

при условиях, что

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

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

где N_j^+ – подмножество “входящих” в узел j дуг; N_j^- – подмножество “выходящих” дуг из узла j ; f – величина суммарного потока по сети; x_{ij} – поток по дуге (i, j) ; d_{ij} – ограничения на поток по дуге (i, j) .

В связи с тем, что граф достаточно разветвленный и сложный, задача (1)–(3) о максимальном потоке может иметь не единственное решение, то есть может быть найдено несколько возможных максимальных потоков. Тогда целесообразно говорить о минимизации затрат на доставку газа потребителям и использовать алгоритм Басакера–Гоуэна [20], решая задачу о максимальном потоке минимальной стоимости:

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

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

В результате реализации различных нештатных ситуаций возможно возникновение дефицита газа у потребителей, вызванного нехваткой пропускных способностей определенных участков газопроводов. Обход таких узких или ограничивающих производственные возможности мест системы, в допустимых объемах, позволит сократить возникший в рассматриваемой ситуации дефицит газа у потребителей.

При возникновении дефицита газа у потребителей, вызванного нехваткой пропускных возможностей соответствующих газопроводов, другие ветки магистральных газопроводов, не затронутые рассматриваемым нарушением, принимают на себя увеличенные объемы газа [21]. В такой ситуации меняется загруженность сети и возможно проявление недостатка пропускных возможностей на других участках магистральных газопроводов. Последующая расшивка узких мест в ГТС позволит минимизировать дефициты газа у потребителей.

Средства ПВК “Нефть и газ России” позволяют исследователю выделить множество потенциально узких мест, то есть объектов, не имеющих резерва производственных возможностей. Чаще всего именно такие объекты либо являются, либо могут стать в будущем причиной недопоставки необходимого количества газа потребителям.

Для решения задачи обхода найденных узких мест системы в модель потокораспределения заложена возможность приращения потока газа по дугам в пределах 10% от величины их пропускной способности. Такое кратковременное увеличение пропускной способности участка МГ возможно при увеличении рабочей мощности компрессоров на крупных магистральных КС [22]. В итоге повышения рабочего давления в газопроводе достигается увеличение пропускной способности участка магистрального газопровода в пределах до 10%. В результате (посредством использования технических возможностей ГТС) решается задача минимизации дефицитов газа у потребителей.

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ С УЧЕТОМ ВВЕДЕННЫХ ПИКОВЫХ ПХГ

Прекращение работы отдельных объектов газовой отрасли влияет на объем поставки газа, требуемый для конкретного потребителя. Величина возможного дефицита является основой для формирования значений показателя уязвимости системы топли-

воснабжения региона. На основе описанного в [14] подхода определение уязвимости системы газоснабжения региона выглядит следующим образом:

$$V_i^{G\ sup} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{КВО}}} \frac{Demand_i - Capacity_i^k}{Demand_i}}{N_{\text{КВО}}}, \quad (5)$$

где $Demand_i$ – спрос на ресурс у потребителя i ; $Capacity_i^k$ – поставка ресурса потребителю i при выходе из строя k -го КВО; $N_{\text{КВО}}$ – количество КВО рассматриваемых в исследовании.

Решение поставленной задачи осуществляется посредством использования имитационной потоковой модели газовой отрасли в рамках ПВК “Нефть и газ России”. В расчетную схему были добавлены указанные в табл. 1 пиковые ПХГ, и проведены расчеты с поочередным их включением при выходе из строя каждого из КВО (общее количество 61 объект из соответствующего перечня [1]).

Расчетная схема ЕСГ, используемая для моделирования работы ЕСГ, учитывает все основные особенности функционирования ЕСГ России и содержит:

- 378 узлов, в том числе: 28 источников газа; 64 потребителя газа (субъекты РФ); 24 подземных хранилища газа; 266 узловых компрессорных станций;
- 486 дуг, представляющих магистральные газопроводы и отводы на распределительные газовые сети.

Исходные данные, такие как суточные объемы потребления, добычи, экспорта и импорта газа, приняты в соответствии с официальной статистикой [23–25] за 2019 год. Данные о производственных возможностях газовой отрасли, включая пропускные способности газопроводов, соответствуют реальным производственным характеристикам российской ЕСГ.

Специализированные расчеты проведены с использованием программного комплекса [27], детально отражающего функционирование газотранспортной сети России и позволяющего имитировать различные условия функционирования ее объектов. Расчеты проводились с использованием методологии параллельных вычислений, реализованной в Иркутском суперкомпьютерном центре СО РАН [28].

Проведенные модельные исследования показали возможности снижения уязвимости систем газоснабжения регионов при подключении в систему газоснабжения проектируемых пиковых ПХГ. В таблице 2 отражена информация по показателям уязвимости без учета работы пикового ПХГ и с таким учетом. Кроме того, показано насколько снижается количество КВО, влияющих на уязвимость системы газоснабжения конкретного региона, в случае возникновения ЧС в условиях работы подключения пиковых ПХГ.

В таблице 2 представлены только те субъекты, где показатель уязвимости системы газоснабжения изменился. Далее на основе полученных данных и анализа информации по всем регионам была отдельно оценена и рассмотрена степень влияния каждого пикового ПХГ на изменение суммарного дефицита газа в системе при выводе из строя одного из КВО.

На основании расчета и обработки полученной информации по суммарному объему дефицита газа и по количеству субъектов с дефицитом газа в случае отключения каждого КВО представилось возможным ранжировать пиковые ПХГ по степени их эффективности снижения недопоставок газа потребителям в случае возникновения ЧС в ГТС, табл. 3. При этом следует отметить, что усредненный дефицит при выходе из строя всех КВО составил порядка 225 млн м³/сут.

При этом средний дефицит при вводе пиковых ПХГ варьируется 165–206 млн м³/сут. Таким образом, принимая во внимание то, что КВО рассредоточены по ЕСГ, и выход из строя каждого способен нанести значительный ущерб потребителям, наиболее эффективными пиковыми ПХГ будем считать те, работа которых позволит максимально

Таблица 2. Уязвимость системы газоснабжения регионов при выходе из строя одного КВО ЕСГ (показаны с уязвимостью 5% и более)

Субъект РФ	Уязвимость без пиковых ПХГ	Кол-во влияющих КВО	Усредненная уязвимость при работе пиковых ПХГ	Кол-во влияющих КВО
	без работы пиковых ПХГ		с работой пиковых ПХГ	
	доли ед.	шт.	доли ед.	шт.
1	2	3	4	5
Кировская область	0.171	33	0.044	14
Белгородская область	0.114	22	0.038	8
Брянская область	0.104	20	0.041	8
Смоленская область	0.101	21	0.062	12
Тюменская область	0.088	17	0.046	9
Республика Карелия	0.145	28	0.067	13
Ленинградская область	0.081	23	0.033	13
Пермский край	0.072	14	0.011	3
Челябинская область	0.103	21	0.037	9
Орловская область	0.057	11	0.004	1
Новгородская область	0.057	12	0.007	5
Удмуртская Республика	0.057	11	0.038	4
Костромская область	0.056	11	0.0001	5
Омская область	0.095	19	0.043	9
Московская область	0.048	14	0.0042	7

Таблица 3. Усредненная эффективность влияния пиковых ПХГ на снижение недопоставок газа потребителям при выходе из строя КВО ЕСГ

№	Наименование пиковых ПХГ	Усредненный дефицит газа при работе пиковых ПХГ, млн м ³ /сут.	Относительная эффективность пиковых ПХГ, %
1	Смоленское	165	26.6
2	Сереговское	172	23.5
3	УДРК	182	19.1
4	Скалинское	183	18.6
5	Беднодемьяновское	185	17.7
6	Новомосковское	185	17.7
7	Тульское	185	17.7
8	Шедокское	185	17.7
9	Серпуховское	186	16.3
10	Березняковское	194	13.7
11	Шатровское	196	12.8
12	Арбузовское	197	12.4
13	Калининградское	204	9.3
14	Волгоградское	206	8.4

снизить ущерб от выхода из строя КВО. При расчете также было выявлено, что при отключении некоторых КВО ни один из планируемых пиковых ПХГ не смог снизить возникающий дефицит газа у потребителей.

При включении всех пиковых ПХГ в сеть остаются 29 КВО с дефицитом газа, которые в основном сосредоточены на севере расчетной схемы. В то время как планируемые пиковые ПХГ будут размещены в центральной и южной частях. Так, например, при выходе из строя крупного КВО № 17, расположенного в северной части схемы, дефициты газа сокращаются всего на 53 млн м³/сут, с 227 до 174 млн м³/сут.

Тем не менее все пиковые ПХГ, запланированные к созданию до 2030 года, являются эффективными и в разной степени снижают уязвимость систем газоснабжения регионов, повышая надежность их топливоснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье подробно рассмотрен вопрос влияния пиковых ПХГ на снижение уязвимости систем газоснабжения регионов России в случае прекращения работы важнейших объектов газовой отрасли. Смоделирован ряд сценариев с учетом введения пиковых ПХГ в систему газоснабжения России. Представлены результаты анализа ситуации и оценки уязвимости систем газоснабжения каждого региона, расположенного в зоне действия ЕСТ, до и после введения указанных ПХГ. Также представлен перечень пиковых ПХГ, ранжированный по эффективности их создания, для снижения уязвимости систем газоснабжения регионов в случаях возникновения ЧС в газовой отрасли

Вышеизложенное подтверждает и обосновывает необходимость создания в ЕСТ пиковых подземных хранилищ газа с целью минимизации ущерба для потребителей газа в случае возникновения ЧС. Как видно из табл. 3, приоритетными являются Смоленское и Сереговское пиковые ПХГ, а также Удмуртский Резервирующий Комплекс.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Senderov S., Edelev A.* Formation of a List of Critical Facilities in the Gas Transportation System of Russia in Terms of Energy Security / *Energy* 184(C) (2019). P. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063>
2. *Tichy L.* Energy Infrastructure as a Target of Terrorist Attacks from the Islamic State in Iraq and Syria. *International J. Critical Infrastructure Protection*, <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.01.003>
3. *Tsavdaroglou M., Al-Jibouri S.H.S., Bles T., Halman J. I.M.* Proposed methodology for risk analysis of interdependent critical infrastructures to extreme weather events. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* V. 21. P. 57–71.
4. *Praks P., Kopustinskas V.* Node Importance Analysis of a Gas Transmission Network with Evaluation of a New Infrastructure by ProGasNet. CRITIS 2018, LNCS 11260. P. 3–16, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05849-4_1
5. *Zio E.* Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 152. P.137–150.
6. *Zio E.* Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2). P. 125–141.
7. *Apostolakis G.E.* How useful is quantitative risk assessment? *Risk analysis*. 24(3). P. 515–520.
8. *Liu H., Davidson R.A., Apanasovich T.V.* Spatial generalized linear mixed models of electric power outages due to hurricanes and ice storms. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(6). P. 897–912.
9. *Cuadra L., Salcedo-Sanz S., Del Ser J., Jiménez-Fernández S. and Geem Z.W.* A critical review of robustness in power grids using complex networks concepts. *Energies*. 8(9). P. 9211–9265.
10. *Ouyang M.* Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability engineering & System safety*. 121. P. 43–60.
11. *Wang S., Hong L., Chen X.* Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*. 391(11). P. 3323–3335.

12. *Johansson J., Hassel H.* Modelling, simulation and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures. P. 49–66 in *Hokstad P, Utne IB, Vatn J* (eds). Risk and Interdependencies in Critical Infrastructures: A Guideline for Analysis. London: Springer-Verlag, 2012.
13. *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. P. 107046. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107046>
14. *Сендеров С.М., Смирнова Е.М., Воробьев С.В.* Подходы к оценке уязвимости систем топливоснабжения газопотребляющих регионов России в условиях прекращения работы особо значимых объектов газовой отрасли / Известия РАН. Энергетика. 2020. № 1. С. 82–91.
15. *Казарян В.А.* Подземное хранение газов и жидкостей. Т. 2. Эксплуатация. Ремонт. Консервация. Ликвидация. Применение хранилищ газов и жидкостей в различных отраслях экономики. М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2019. 660 с.
16. Генеральная схема развития газовой отрасли России на период до 2030 года. М.: 2008, 184 с.
17. <https://www.gazprom.ru/about/production/underground-storage/>
18. *Еделев А.В., Еникеева С.М., Сендеров С.М.* Информационное обеспечение при исследовании вопросов функционирования больших трубопроводных систем / Вычислительные технологии. 1999. Т. 4. № 5. С. 30–35.
19. *Воробьев С.В., Еделев А.В.* Методика определения узких мест в работе больших трубопроводных систем / Программные продукты и системы. 2014. № 3. С. 174–177.
20. *Ford L.R., Fulkerson D.R.* Flows in networks. Princeton university press, Princeton, New Jersey, 1962. 276 p.
21. *Воробьев С.В., Еделев А.В.* Особенности математического моделирования при распределении излишков газа в Единой системе газоснабжения России / Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 62. № 1. С. 181–194.
22. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата. Справочное руководство в 2-х томах. Том II / Под ред. Ю.П. Коротаева, Р.Д. Маргулова. М.: Недра, 1984. 288 с.
23. Экспорт Российской Федерации важнейших товаров в 2012–2017 году (по данным ФТС России) http://customs.ru/index.php?option=com_newsfts&view=category&id=52&Item_id=1978&limitstart=60.
24. ИнфоТЭК Ежемесячный нефтегазовый журнал. 2017. № 1. С. 154.
25. Министерство энергетики Российской Федерации. Статистика. <http://minenergo.gov.ru/activity/statistic>.
26. *Сендеров С.М., Рабчук В.И., Воробьев С.В.* Формирование перечня критически важных объектов газовой отрасли с позиций энергетической безопасности страны / Материалы сборника докладов Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 90-е заседание “Надежность развивающихся систем энергетики”. 1–7 июля 2018 г., Иркутск.
27. *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.
28. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 03.09.2018).

Analysis of the Efficiency of Using Peak Underground Gas Storage Objects to Reduce Vulnerability Indicators of the Gas Supply System of Russian Regions

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

^a*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*
**e-mail: smirnova.e.m@isem.irk.ru*

Impact of peak underground gas storage (UGS) objects on reducing the vulnerability of gas supply systems to Russian regions in the event of the termination of the operation of the most important objects of the gas industry. Based on the simulation of the situation, taking into account the introduction of peak UGS objects into the gas supply system of Russia, the corresponding calculations were carried out. Reviewed the analysis results of the situation and the assessment of the vulnerability of the gas supply systems of the regions located in the UGS coverage area before and after the creation of these UGS objects. A list of peak UGS objects is presented, ranked by the effectiveness of their creation to reduce the vulnerability of gas supply systems to regions in the event of an emergency in the gas industry.

Keywords: gas industry, underground gas storage objects, critical objects, vulnerability, fuel and energy supply