
УДК 622.691.019 (470)

ПОИСК НАПРАВЛЕНИЙ МИНИМИЗАЦИИ ДЕФИЦИТА ГАЗА У ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ВАЖНЕЙШИХ ОБЪЕКТАХ ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

© 2021 г. С. В. Воробьев¹, *, С. М. Сендеров¹, А. В. Еделев¹

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

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

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Представлены возможные инвариантные мероприятия, направленные на снижение дефицита газа у потребителей при возникновении чрезвычайных ситуаций на критически важных объектах газовой отрасли. Исследование выполнено на примере Единой системы газоснабжения России и является логическим развитием темы поиска и определения критически важных объектов системы. Определен перечень наиболее часто встречающихся участков магистральных газопроводов, пропускной способности которых недостаточно в рассматриваемых ситуациях. В качестве мероприятий по снижению дефицитов газа у потребителей при чрезвычайных ситуациях на критически важных объектах показана целесообразность как кратковременного увеличения пропускных способностей участков, так и прокладки дополнительных участков магистральных газопроводов. Сделаны выводы о необходимости поиска таких участков магистральных газопроводов и применения к ним мер, направленных на повышение работоспособности газовой отрасли России в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: дефицит газа, системы газоснабжения, критически важные объекты, газовая отрасль, энергетическая безопасность

DOI: 10.31857/S000233102102014X

ВВЕДЕНИЕ

В связи со значительным износом основных производственных фондов и при отсутствии существенных финансовых инвестиций в их реконструкцию в последние годы увеличилось число крупных аварий в системах энергетики. Крупномасштабные аварии в системах энергетики, возникшие вследствие выхода из строя критически важных объектов систем, влекут за собой значительный, иногда невосполнимый, ущерб для потребителей в виде крупных недопоставок конечных видов энергии. Согласно [1] критически важным является объект, частичный или полный выход из строя которого может нанести стране значительный социальный и экономический ущерб со стороны топливно-энергетического комплекса.

В мире ведутся исследования, посвященные различным аспектам анализа важнейших объектов и их сочетаний в системах энергетики. Среди наиболее актуальных можно отметить следующие моменты.

В [2, 3] авторы проанализировали газотранспортную сеть для определения ее наиболее важных компонентов. Применяемые методологические подходы основаны на топологическом сетевом анализе с акцентом на изучение вопросов надежности и

управляемости. Данный анализ позволяет количественно оценить надежность газотранспортной сети и определить роль каждого компонента сети в различные интервалы времени. Был проведен глобальный анализ уязвимости с учетом возможных нарушений в работе источников газа и магистральных газопроводов.

В [4] представлен метод обнаружения и ранжирования критических компонентов и наборов компонентов в технических инфраструктурах. Критичность компонента или набора компонентов определяется как уязвимость системы к сбоям, когда определенный компонент выходит из строя. Эта проблема также касается многочисленных одновременных сбоев с синергетическими последствиями, которые усложняют проблему. Предложенный способ поможет решить эту проблему.

В [5] авторы предлагают комплексную модель для оценки влияния взаимозависимости между электрическими и газовыми системами на надежность электроснабжения потребителей. Ограничения на поставки газа могут повлиять на изменение режима работы электроэнергетики.

В [6] представлен анализ возможных воздействий в интегрированной газовой и электроэнергетической сети. Отказы системы газоснабжения считаются более определяющими для интегрированной системы энергоснабжения, чем сбой в самой подсистеме энергоснабжения.

Исследования [7, 8] посвящены различным вопросам моделирования энергетических систем как критических инфраструктур. В [7] авторы предлагают агентную модель типичной региональной энергосистемы, которая включает в себя характеристики конкретных типов установок и их систем охлаждения, которые зависят от адекватного водоснабжения при соответствующих температурах для поддержки работы на полной мощности. В исследовании [8] представлен новый подход к оценке уязвимости внутригородских распределительных газопроводных сетей от аварий на газопроводах. Этот подход позволяет идентифицировать уязвимые звенья сети трубопроводов, которые могут не только оказать значительное влияние на сеть трубопроводов, но также могут оказать существенное влияние на дорожную сеть.

Ранее был проведен ряд исследований, посвященных выявлению критически важных объектов (КВО) в газотранспортной сети. Определен перечень пересечений магистральных газопроводов в Единой системе газоснабжения (ЕСГ) России, нарушение работы которых приведет к относительному дефициту суточных поставок газа по системе в целом в размере 5% и более [9]. Были проведены исследования по поиску и определению сочетаний отдельных участков магистральных газопроводов, одновременное нарушение функционирования которых может привести к существенному дефициту суточных поставок газа по системе (5% и более) [10, 11]. С учетом ранее накопленного опыта и на основе анализа исследований, проводимых в мире в настоящее время в [12, 13], сформулирована методология формирования перечней КВО систем энергетики с позиций обеспечения работоспособности этих систем на примере газовой отрасли России.

В рассмотренных работах определены КВО и значимые объекты различного уровня, но не представлены меры и мероприятия, направленные на снижение значимости таких объектов. В данном исследовании перед авторами была поставлена задача по поиску и определению возможных инвариантных мероприятий, направленных на снижение дефицита газа у потребителей при возникновении чрезвычайных ситуаций на КВО Единой системы газоснабжения России. В качестве мероприятий, направленных на снижение дефицита газа у потребителей, в рамках данного исследования предложены:

- увеличение (до 10%) пропускных возможностей там, где это необходимо, существующих магистральных газопроводов;
- создание дополнительных мощностей по транспортировке газа в рамках существующих магистральных газопроводов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ПОИСКУ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗМОЖНЫХ ИНВАРИАНТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ДЕФИЦИТА ГАЗА У ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЧС НА КВО

В исследованиях, проводимых для определения КВО, использована потоковая модель, являющаяся ядром программно-вычислительного комплекса (ПВК) “Нефть и газ России” [14, 15]. Применение этого ПВК позволяет определить степень удовлетворения потребностей в газе внутри страны и обеспечения экспортных поставок в различных условиях работы ЕСГ. Кроме того, ПВК “Нефть и газ России” позволяет определить узкие места – участки газотранспортной сети (ГТС), в ряде случаев ограничивающие производственные возможности системы.

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

Математически рассматриваемая связанная ГТС представлена как сеть, изменяющаяся во времени, в узлах которой находятся предприятия по добыче, преобразованию и потреблению материальных потоков, реализующих материальные связи между предприятиями. При решении задачи оценки состояния системы после возмущения критерием оптимальности распределения потоков служит минимум дефицита энергоресурса у потребителя при минимальных затратах на его доставку.

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 [16]. Математическая запись данной задачи подробно описана в [17].

Комплексный подход к решению поставленных задач по всей технологической цепочке ЕСГ позволяет получить общую оценку производственных возможностей всей системы в экстремальных условиях. Результат решения задачи – определение возможностей удовлетворения потребителей сетевым газом с выявлением объемов возможных недопоставок газа в узлы потребления при той или иной нештатной ситуации.

При возникновении у потребителей дефицита газа, вызванного нехваткой пропускных возможностей соответствующих газотранспортных дуг, другие такие дуги, не затронутые рассматриваемым нарушением, могут принять для транспортировки увеличенные объемы газа. В такой ситуации изменяется структура загрузки сети и возможно проявление недостатка пропускных способностей на определенных участках ГТС. Последующая расшивка узких мест в ГТС позволит минимизировать дефициты газа у потребителей в условиях отключения каких-либо объектов газовой отрасли и их сочетаний.

ПВК “Нефть и газ России” позволяет исследователю при анализе результатов расчета выделить потенциальные узкие места или участки сети, ограничивающие работоспособность системы. Чаще всего именно такие объекты могут стать причиной недопоставки необходимого количества газа потребителям. В то же время без дополнительного моделирования невозможно найти реальные узкие места ограничивающие возможности ГТС по поставке газа потребителям в каждом анализируемом случае. Подробно математическая постановка задачи обхода узких мест описана в [18].

Для решения задачи обхода найденных узких мест в модель потокораспределения заложена возможность приращения потока газа по дугам в пределах 10% от величины их пропускной способности. Такое кратковременное увеличение пропускной способности участка магистрального газопровода возможно при увеличении рабочей мощности компрессоров на крупных магистральных компрессорных станциях (КС) [19].

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.

В то же время, в зависимости от масштабов ЧС, с газоснабжением далеко не во всех случаях при решении задачи обхода узких мест эти дефициты газа у потребителей можно свести к нулю. Необходимо найти пути формирования мероприятий, которые в условиях минимизации дополнительных затрат, при исследовании каждого из рассматриваемых сценариев, позволяли бы полностью удовлетворить потребителей, потенциально страдающих от дефицита газа при реализации данных сценариев изначально. Здесь следует напомнить, что под рассматриваемыми сценариями имеются в виду отключения (потери работоспособности) КВО газовой отрасли или любых сочетаний объектов газовой отрасли, способные привести к значительным дефицитам газа у потребителей. На данном этапе исследований рассматриваются сценарии с выходом из строя одновременно одного КВО или одного сочетания, состоящего из двух объектов газовой отрасли.

Задача минимизации дефицитов газа у потребителей решалась путем непродолжительного (на время аварии) увеличения пропускных способностей газотранспортных дуг при увеличении давления на соответствующих КС. По аналогии с этим попробуем задать возможные приращения пропускных способностей газотранспортной дуги величиной до некой Δ большей, чем заданное 10%-ное ограничение на приращение потока по дуге. Понятно, что приращения пропускной способности большего, чем на 10% от первоначальной, можно добиться лишь созданием дополнительных мощностей по транспортировке газа. Это и линейная часть (дополнительные нитки газопровода) и дополнительные мощности КС. Естественно, никто не будет создавать такие мощности на всякий случай, если тот или иной объект из перечня КВО выйдет из строя. Но задача состоит в том, чтобы попытаться найти такие инвариантные решения, которые бы позволили снизить критическую значимость для работоспособности системы не одного-двух КВО или важнейших сочетаний объектов газовой отрасли, а значимого их количества.

Полученные в результате успешного решения такой задачи инвариантные мероприятия на практике должны означать необходимость создания дополнительных мощностей по транспортировке газа. Понятно, что стоимость создания таких мощностей должна быть учтена при получении решения. Это означает, что наряду с константами C_{ij} и A_{ij} должна использоваться и некая G_{ij} , означающая величину удельных затрат на поток газа по приращению пропускной способности дуги (i, j) в рамках специально созданных новых мощностей по транспорту газа по данной дуге. Тогда запись задачи принимает следующий вид:

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

при условиях

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

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

$$0 \leq y_{ij} \leq b_{ij}, \text{ для всех } (i, j), \quad (4)$$

$$0 \leq g_{ij} \leq \Delta_{ij}, \text{ для всех } (i, j), \quad (5)$$

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) ; y_{ij} – приращение потока по дуге (i, j) ; b_{ij} – ограничение на приращение потока по дуге (i, j) в пределах 10% от пропускной способности данной дуги; g_{ij} – приращение потока по дуге (i, j) в рамках специально созданной дополнительной пропускной способности; Δ_{ij} – ограничение на приращение потока по дуге (i, j) в рамках специально созданной дополнительной пропускной способности.

При работе со сложными схемами, коими являются российская и европейская газотранспортные сети, может быть несколько вариантов решения, т.е. несколько возможных максимальных потоков. Тогда задача минимизации стоимости решения будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{(i,j)} C_{ij}x_{ij} + \sum_{(i,j)} A_{ij}y_{ij} + \sum_{(i,j)} G_{ij}g_{ij} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где C_{ij} – удельные затраты на поток по дуге (i, j) ; A_{ij} – удельные затраты на поток по приращению y_{ij} ; G_{ij} – удельные затраты на поток по приращению g_{ij} .

ПОИСК ИНВАРИАНТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

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

- 378 узлов, в том числе: 28 источников газа; 64 потребителя газа (субъекты РФ); 24 подземных хранилищ 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 [20–22] за 2019 год. В специально проведенном исследовании [23] представлен анализ, в результате которого 61 объект газовой отрасли был отнесен к КВО ЕСТ. Среди этих объектов: 25 дуг между узловыми компрессорными станциями и 36 узлов, в числе которых 30 узловых КС, 5 головных КС на выходах с крупных газовых месторождений и КС на одном ПХГ.

Данные расчеты проведены с использованием программного комплекса [24] детально отражающего функционирование газотранспортной сети России и позволяющего имитировать различные условия функционирования ее объектов, включая полное отключение. Расчеты проводились с использованием методологии параллельных вычислений в иркутском суперкомпьютерном центре СО РАН [25].

В качестве расчетных сценариев была принята ситуация с поочередным выходом из строя каждого из КВО. Так, был проведен 61 расчет с целью максимально минимизировать дефициты газа у потребителей при наименьших затратах. В результате для решения данной проблемы при выходе из строя различных КВО необходимо от 35 до 85 мероприятий, включающих в себя как кратковременное увеличение пропускных возможностей, так и расширение участков магистральных газопроводов. Также стоит отметить, что всего таких мероприятий по всем 61 КВО получено 548. В таблице 1 представлены наиболее часто встречающиеся мероприятия.

Таблица 1 демонстрирует, что в текущей конфигурации газотранспортной сети России есть 27 участков, на которых целесообразно с высокой степенью инвариантности (от 25 до 48% рассматриваемых сценариев) расширение пропускных возможностей. Планы по соответствующему расширению этих участков целесообразно добавить в

Таблица 1. Наиболее часто повторяющиеся мероприятия по снижению дефицита газа у потребителей

№	Количество повторений в расчетах	Доля от всех КВО, %	Объем увеличения пропускной способности соответствующей дуги расчетного графа, млн м ³ /сут	Доля увеличения по отношению к первоначальной пропускной способности, %
1	29	48	8.25	10
2	25	41	6.61	10
3	24	39	8.25	10
4	23	38	8.25	10
5*	23	38	74.25	100
6	22	36	9	10
7	22	36	8.25	10
8	21	34	1	7
9	20	33	6.61	10
10	20	33	8.25	10
11	20	33	6.61	10
12*	20	33	82.5	100
13	19	31	8.25	10
14	18	30	8.25	10
15*	18	30	74.25	100
16	17	28	8.25	10
17	17	28	8.25	10
18	16	26	8.25	10
19	16	26	1	7
20	16	26	3.046	10
21	16	26	8.25	10
22	16	26	9	10
23	16	26	8.25	10
24*	16	26	59.49	72
25	15	25	8.25	10
26	15	25	1.35	10
27*	15	25	82.5	100

* Сооружение дополнительных участков газопроводов.

программы реконструкции и развития ЕЭС России. Увеличение пропускных возможностей на участках 5, 12, 15, 24, 27 подразумевает под собой сооружение дополнительных ниток магистральных газопроводов. Такие меры значительно дороже кратковременного увеличения пропускных возможностей, но частота их повторяемости в рассматриваемых условиях свидетельствует об их необходимости с позиции улучшения топливоснабжения потребителей при ЧС на объектах газовой отрасли.

Следует указать, что даже в таких расчетных условиях в системе остаются 23 КВО, при нарушении работы которых сохраняется дефицит газа у потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена поиску и определению возможных инвариантных мероприятий, направленных на снижение дефицита газа у потребителей при возникновении чрезвычайных ситуаций на критически важных объектах газовой отрасли. Представлен перечень наиболее часто встречающихся участков магистральных газопроводов, пропускной способности которых недостаточно в рассматриваемых ситуациях. В качестве мероприятий по снижению дефицита газа у потребителей при чрезвычайных ситуациях на критически важных объектах показана целесообразность как кратковременного увеличения пропускных способностей участков, так и прокладки дополнительных участков магистральных газопроводов. Отмечено, что при рассматриваемых сценариях в системе остается ряд КВО, при нарушении работы которых сохраняется дефицит газа у потребителей.

Сделаны выводы о необходимости поиска таких участков магистральных газопроводов и применения к ним мер, направленных на повышение работоспособности газовой отрасли России в условиях чрезвычайных ситуаций.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант РФФ № 20-79-00242.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Han F., Zio E., Kopustinskas V., Praks P.* Quantifying the importance of elements of a gas transmission network from topological, reliability and controllability perspectives, considering capacity constraints. In book: *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, 2016. P. 2565–2571. <https://doi.org/10.1201/9781315374987-389>
3. *Su H., Zio E., Zhang J., Li X.* A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network. *Reliability Engineering & System Safety.* 2018. V. 175. P. 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.03.006>
4. *Jonsson H., Johansson J., Johansson H.* Identifying critical components in technical infrastructure networks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: J. Risk and Reliability. 2008. V. 222. № 2. P. 235–243. <https://doi.org/10.1243%2F1748006XJRR138>
5. *Li T., Eremia M., Shahidehpour M.* Interdependency of natural gas network and power system security, *IEEE Transactions on Power Systems.* 2008. V. 23. P. 1817–1824. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2004739>
6. *Dokic S.B., Rajakovic N.Lj.* Security Modelling of Integrated Gas and Electrical Power Systems by Analyzing Critical Situations and Potentials for Performance Optimization. *Energy* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.165>
7. *Thompson J.R., Frezza D., Necioglu B., Cohen M.L., Hoffman K., Rosfjord K.* “Interdependent Critical Infrastructure Model (ICIM): An agent-based model of power and water infrastructure”. *International J. Critical Infrastructure Protection.* Volume. 24. 2019. P. 144–165.
8. *Kai L., Ming W., Weihua Z., Jinshan W., Xiaoyong Y.* “Vulnerability analysis of an urban gas pipeline network considering pipeline-road dependency”. *International J. Critical Infrastructure Protection.* Volume 23. 2018. P. 79–89.

9. *Senderov S., Edelev A.* Formation of a List of Critical Facilities in the Gas Transportation System of Russia in Terms of Energy Security // 2017. Energy. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.11.063>
10. *Vorobev S., Edelev A.* Analysis of the importance of critical objects of the gas industry with the method of determining critical elements in networks of technical infrastructures // Management of Large-Scale System Development (MLSD), 2017 Tenth International Conference. IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/MLSD.2017.8109707>
11. *Vorobev S., Edelev A., Smirnova E.* Search of critically important objects of the gas industry with the method of determining critical elements in networks of technical infrastructures // Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2017). E3S Web Conf. Volume 25. 2017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172501004>
12. *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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063>
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. *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.
15. *Храмов А.В., Еникеева С.М., Хрусталева Н.М. и др.* Программное и информационное обеспечение решения задач живучести Единой системы газоснабжения СССР // в Методы и модели исследования живучести систем энергетики, Новосибирск: Наука, Сиб. отд, 1990. С. 86–91.
16. *Ford L.R., Fulkerson D.R.* Flows in Networks / Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962. 276 p.
17. *Воробьев С.В., Еделев А.В.* Особенности математического моделирования при распределении излишков газа в Единой системе газоснабжения России / Научный вестник НГТУ т. 62, № 1, 2016. С. 181–194.
18. *Воробьев С.В., Еделев А.В.* Методика определения узких мест в работе больших трубопроводных систем // Программные продукты и системы. 2014. № 3. С. 174–177.
19. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата. Справочное руководство в 2-х томах. Т. II / Под ред. Ю.П. Коротаева, Р.Д. Маргулова. М.: Недра, 1984. 288 с.
20. 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&Itemid=1978&limitstart=60
21. ИнфоТЭК Ежемесячный нефтегазовый журн. № 1. 2017. С. 154.
22. Министерство энергетики Российской Федерации. Статистика. <http://minenergo.gov.ru/activity/statistic>
23. *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.
24. *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.
25. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 03.09.2018).

Search for Directions for Minimizing Gas Deficiency in Consumers in Emergency Situations at the Most Important Objects of the Gas Industry

S. V. Vorobev^{a,*}, S. M. Senderov^a, and A. V. Edelev^a

^aMelentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, Russia

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

Possible invariant measures aimed at reducing gas shortages among consumers in case of emergencies at critical facilities of the gas industry are presented. The study was carried out

using the example of the Unified Gas Supply System of Russia and is a logical development of the topic of searching and identifying critical objects of the system. A list of the most frequently encountered sections of main gas pipelines, the throughput of which is insufficient in the situations under consideration, has been determined. As measures to reduce gas shortages among consumers in emergency situations at critical facilities, the expediency of both a short-term increase in the throughput of the sections and the laying of additional sections of main gas pipelines is shown. Conclusions are drawn about the need to search for such sections of gas pipelines and apply measures to them aimed at increasing the operability of the Russian gas industry in emergency situations.

Keywords: gas shortage, gas supply systems, critical facilities, gas industry, energy security