УДК 696.2:614.0.06

© А. Л. Шкаровский, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: szkarowski@mail.ru

© М. Котула, аспирант

(Технологический университет г. Кошалин, Польша)

E-mail: maciej-kotula@wp.pl

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-125-133

© A. L. Shkarovskiy, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: szkarowski@mail.ru

© M. Kotula, post-graduate student

(Koszalin University of Technology, Poland)

E-mail: maciej-kotula@wp.pl

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

RESEARCH OF CAUSES OF THE PRESSURE MODE VIOLATION IN GAS DISTRIBUTION NETWORKS

Представлены результаты анализа причин и последствий несоблюдения режима давления в газораспределительных системах низкого давления. Рассмотрена авария квартальной сети, которая произошла 30 ноября 2010 г. в польском городе Зелёна Гура (Zielona Góra) и повлекла разгерметизацию внутренних систем в подключенных объектах. Проанализированы данные прокурорского расследования, материалы публикаций и информация работников газового хозяйства. Показано, как несогласованное изменение оборудования газорегуляторного пункта и нарушение правил эксплуатации привели к недопустимому повышению давления в квартальной сети и внутренних системах, рассчитанных на низкое давление. Выполнен анализ технических и организационных мероприятий для недопущения таких аварий.

Ключевые слова: газоснабжение, безопасность, газорегуляторный пункт, оборудование, эксплуатация, нарушение давления.

The paper presents the results of analysis of the causes and consequences of non-compliance of the pressure mode in low pressure gas distribution systems. The authors consider the accident of the district network, which took place November 30, 2010 in the Polish city of Zielona Góra (Zielona Góra) and caused depressurization of internal systems in connected objects. The data of the prosecutor's investigation, materials of publications and information from employees of the gas supply company are analyzed. It is shown, how unacceptable change in the gas distribution plant equipment and violation of the operating rules has resulted in an unauthorized pressure increase in the district network and internal systems designed for low pressure. The analysis of technical and organizational measures to prevent such accidents has been performed.

Keywords: gas supply, safety, gas distribution plant, equipment, operation, pressure violation.

Введение

Схожесть систем газоснабжения в большинстве стран делает весьма похожими и причины аварий, их протекание и последствия. Но в большинстве случаев аварии вызваны местными утечками газа непосредственно во внутренних системах низкого давления. Несмотря на нередко трагические последствия, такие аварии имеют локальный характер, охватывая квартиру, лестничную клетку или одно здание [1]. В статье приводятся результаты анализа аварии совсем другого типа, которая охватила несколько жилых кварталов и вызвала эвакуацию тысяч жильцов.

Специалистам в области проектирования, строительства и эксплуатации систем газоснабжения предоставляется возможность самим оценить, как невероятное, на первый взгляд, стечение обстоятельств привело к трагическому исходу. Авторы надеются, что приводимый анализ позволит избежать подобных случаев в будущем путем сравнительно несложных конструктивных, технологических и организационных мероприятий.

Предмет исследования и постановка задачи

Исследована авария системы газоснабжения, которая произошла 30 ноября 2010 г. в польском

городе Зелёна Гура (*Zielona Góra*). О начале аварии можно составить впечатление по газетным публикациям того времени. По эмоциональным высказываниям пострадавших «...газовые плиты в квартирах начали одна за другой взрываться» [2]. Вероятно, при попытках зажечь конфорочную горелку вспыхивал сильный огонь, который не удавалось погасить [3]. Особенно характерно это для духовых шкафов — так называемый хлопок заполненного горючей смесью объема духовки действительно мало отличается от взрыва [4].

Несложно понять, почему не удавалось погасить огонь. При сильной вспышке человек отскакивает, интуитивно оберегая себя от пламени, а кран остается открытым. На современных плитах при сильной вспышке может подействовать датчик пламени, и результат будет тот же [5]. После этого обычная паника уже не позволяет приблизиться к плите и закрыть кран горелки или отключающий кран плиты, нередко менее доступный [6].

События охватили квартальные сети сразу трех городских микрорайонов, где возникло несколько пожаров. Большинство из них удалось погасить довольно быстро, но один развивался по трагическому сценарию. Пожарные спасли окруженную огнем женщину, но пятидесятилетний мужчина погиб в пожаре. Вероятно, он потерял сознание в момент взрыва либо под действием выделяющихся при горении вредных веществ [7]. Из охваченных аварией домов были эвакуированы около 6,5 тысяч жильцов [8].

Оценивая событие, министр внутренних дел признался, что аварии такого масштаба в Польше еще не было. Количество жертв при «точечных» авариях, случающихся в масштабе квартиры, лестничной клетки или одного жилого дома, часто бывает более значительным. Но с точки зрения охваченной аварией территории и масштабов эвакуации такая оценка вполне оправдана [9]. К ликвидации аварии были привлечены сотни полицейских, пожарных, работников аварийных служб, кризисного центра и медиков скорой помощи. Были задействованы десятки спецавтомобилей и городских автобусов для эвакуации жильцов.

Задачей анализа было определение причин и последовательности событий, которые, с тех-

нической точки зрения, привели к аварийной ситуации столь необычного характера.

Методика и результаты исследований

Продолжительное время, прошедшее со времени аварии, и закрытость данных прокурорского расследования потребовали комбинированного метода исследований для решения поставленной задачи. После предварительного анализа, выполненного на основании имеющегося опыта, предстояло проанализировать доступные данные и затем провести собственные исследования.

1. Предварительный анализ

До окончания следствия причины аварии официально не были известны. Но ее масштабы указывали на то, что в газораспределительную систему низкого давления начал поступать газ под средним давлением: сначала от газорегуляторного пункта (ГРП) в уличную сеть, а затем во внутренние системы зданий.

Рассматриваемая система газоснабжения создавалась в 70-е годы прошлого столетия, когда в большинстве стран газификация населенных мест развивалась по схожему принципу. Газ среднего давления подводился к отдельностоящим ГРП, а застроенная территория покрывалась сетью газопроводов низкого давления. Считалось, что такие схемы более безопасны. Поскольку давление перед бытовыми приборами не превышает 2,5 кПа, сеть проектировалась обычно на давление 2,0–3,0 кПа.

Во время аварии трубопроводы и оборудование системы газоснабжения оказались под давлением в несколько бар, то есть в сотни раз более высоким. Многие элементы систем, такие как краны, уплотнения, подводящие шланги, этого просто не выдержали, приводя к загазованности помещений, накоплению газа в духовках и т. п. Достаточно сказать, что газовые плиты имеют аттестат газоплотности на давление до 3,0 кПа, а газовые счетчики — до 5,0 кПа. А что происходило при попытке зажечь горелку, уже кратко упомянуто выше.

Факт попадания газа среднего давления в системы низкого давления не вызывал сомнения. Но определить причины этого при отсутствии необходимой технической информации было невозможно даже для ученых и опытных специалистов. В любой стране конструкция ГРП предусматривает принципиальную невозможность попа-

дания газа среднего давления в выпускной газопровод. Обычно это обеспечивают три устройства: регулятор давления и два клапана безопасности — предохранительно-запорный (ПЗК) и предохранительно-сбросной (ПСК). Вместе они должны не допустить превышения установленного уровня выходного давления (в России обычно на 20 % больше максимально допустимого). При таком пресвышении срабатывает запорный клапан. Сбросной клапан настраивается на вдвое меньшую величину, чтобы не допускать необоснованного прекращения газоснабжения при срабатывании запорного устройства.

Причин, которые заставляют действовать устройства безопасности, не так уж много. Например, при резких колебаниях входного давления динамические характеристики регулятора давления могут оказаться недостаточными. Более частой причиной является загрязнение седла клапана регулятора. При отсутствии газопотребления он должен полностью закрыться, но этого не происходит, и давление за регулятором начинает расти. Нередки также случаи повреждения мембраны регулятора. Максимальное давление в системах низкого давления того времени постройки составляло 5 кПа, поэтому при давлении не более 6 кПа должен был подействовать запорный клапан. Дальнейший анализ должен был определить, почему этого не произошло.

2. Данные прокуратуры

По окончании следствия был предоставлен доступ к его материалам, что позволило приступить к научному анализу причин аварии. Первой информацией является само название сообщения окружной прокуратуры от 18 января 2013 г.: «Обвинительное заключение в отношении мастера газовой сети по делу о взрыве газа в микрорайоне Зелёной Гуры»¹. Как видим, прокурорское расследование переводит поиск причин в плоскость так называемого человеческого фактора. Утверждается, что, «будучи ответственным за модернизацию газорегуляторного пункта, мастер допустил неправильное соединение элементов и использование несоответствующих материалов. Это привело к нарушению функционирования ГРП, выразившемуся в поступлении

в газораспределительную сеть газа слишком высокого давления. Это, в свою очередь, вызвало разгерметизацию ГРП и сети, транспортирующей газ к потребителям. В результате действия обвиняемого непреднамеренно привели к событиям, угрожающим здоровью и жизни граждан и их имуществу в значительном размере».

Следствием установлено, что 30.11.2010 в ГРП произошла авария регулятора давления. С целью установления причин и развития аварии ГРП следствие обратилось за помощью к экспертам. В их заключении отмечены следующие причины происшествя:

- заниженный диаметр сбросного трубопровода;
- неправильная прокладка этого трубопровода (сифонная);
- отсутствие его предохранения от атмосферных осадков;
- несрабатывание отсечного клапана резервной линии (спусковой механизм клапана не подействовал на его запорную часть).

Эти фрагменты сообщения прокуратуры дали важную информацию для анализа. Безусловно, главной причиной трагедии была авария регулятора давления. Однако такие отказы оборудования в газоснабжении случаются, как и в любой другой области техники. При этом не происходит трагических событий, поскольку газорегуляторные пункты имеют целый ряд систем безопасности, которые были кратко описаны выше [10].

Но обращает на себя внимание упоминание о несрабатывании отсечного клапана именно **резервной** линии. Это прямо указывает на то, что **основная** редуцирующая линия была просто отключена. Здесь необходима краткая информация о конструкции ГРП, созданного более 40 лет назад. Он был выполнен по двухлинейной редуцирующей схеме (рис. 1). Обе линии редуцирования, размещенные в здании ГРП, являются полнофункциональными и идентичными, за исключением некоторых настроек оборудования. Общими являются запорно-сбросные комплекты, расположенные снаружи здания, и предохранительно-сбросной клапан.

Кроме конструкции ГРП, принципиально важной является настройка оборудования. Проектное выходное давление составляло 2,0 кПа.

¹ ГОСТ 5542–2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

Рис. 1. Схема ГРП низкого давления с двумя редукционными линиями: ПА — продувочная арматура; ЗА — запорная арматура; НА — наружная запорная арматура; Ф — фильтр; ПЗК — предохранительно-запорный клапан; РД — регулятор давления; ПСК — предохранительно-сбросной клапан; М — манометр; Т — регистратор температуры; Р — регистратор давления; К — конденсатосборник

При давлении 2,7 кПа должен был подействовать пружинный предохранительно-сбросной клапан (ПСК), общий для обеих линий, обеспечивая сброс в атмосферу газа до 25 % пропускной способности ГРП. В случае дальнейшего роста выходного давления до 2,9 кПа подействовал бы запорный клапан основной линии (ПЗК₁), а работа ГРП автоматически переключилась бы на резервную линию с регулятором давления РД₂. Если бы рост давления продолжался, то запорное устройство резервной линии (ПЗК₂) должно было сработать при давлении 3,9 кПа, и подача газа в сеть прекратилась бы. Сброс газа в атмосферу через ПСК при этом продолжался бы. Таким образом, давление в местных системах не могло при любом стечении обстоятельств превысить 3,9 кПа — величины, безопасной для всех элементов этих систем.

3. Действия работников газового хозяйства

Из доверительных бесед с работниками газового хозяйства выяснилось, что отмеченное впоследствии экспертами несрабатывание запорного устройства сразу называлось в качестве причины аварии. Материалы прокурорского расследования это только подтвердили. Но полученная от специалистов информация показала, что аварийная ситуация могла быть вызвана целой совокупностью причин, которые, вопреки законам вероятности, подействовали одновременно.

Проблемы в работе ГРП появились в процессе плановой модернизации оборудования, выполняемой собственными силами предприятия газоснабжения. При осуществлении работ было установлено, что на главной линии не действует должным образом предохранительно-запорный клапан. Он был снят и отправлен в наладку, а работа ГРП была принудительно на длительное время переведена на резервную линию. Именно на этой линии произошло нарушение работы регулятора давления РД₂, предположительно из-за повреждения мембраны, что неизбежно привело к росту давления после регулятора. Возникла аварийная, но штатная ситуация, когда по вышеописанной схеме должны были подействовать по очереди системы безопасности.

Если бы ГРП находился в нормальном эксплуатационном состоянии, при переходе на резервную линию в работу включился бы исправный регулятор давления и аварийная ситуация была бы исчерпана. Но, как уже сказано, исследуемый ГРП не был полностью функционален и **уже работал на резервной редукционной линии**. При этом оба устройства безопасности не подействовали. Если говорить о причинах несрабатывания ПЗК резервной линии, то из материалов прокуратуры известно только, что его «спусковой механизм не подействовал на запорный». Однако ав-

торам удалось установить, что клапан был просто безответственно заблокирован.

Работники газового хозяйства признались, что после перевода ГРП на работу резервной линии она часто выключалась — срабатывал ПЗК и подача газа потребителям прекращалась. Чтобы избежать необоснованных перерывов в газоснабжении, спускной механизм ПЗК был заблокирован механически в надежде на достаточную безопасность, обеспечиваемую при помощи ПСК. Однако это устройство тоже не подействовало.

4. Технические проблемы оборудования

Материалы прокурорского расследования касаются не самого предохранительно-сбросного клапана, а его обвязки. К концу 1990-х гг. гидрозатворы, выполнявшие функцию ПСК, были повсеместно заменены механическими пружинными клапанами. Гидрозатворы были простым и надежным устройством, обеспечивающим 1-й и 4-й уровни защиты (соответственно 25 и 100 % пропускной способности ГРП). Однако они требовали либо обогрева помещений ГРП, либо применения незамерзающих жидкостей. Сбросная «свеча» гидрозатвора, обеспечивающая 100 % пропускной способности ГРП, обычно не была закрыта. Это приводило к попаданию атмосферных осадков в емкость, искажению геометрической высоты настройки устройства и разбавлению незамерзающей жидкости.

Именно 100 %-ная возможность сброса газа оказалась трудно реализуемой для пружинных устройств. Технологические возможности отрасли ограничивали характеристики ПСК, поэтому устройства с пропускной способностью 100 % по отраслевой норме Польши использовались только в ГРП с расчетным расходом до 60,0 м³/ч и с входным давлением более 1,6 МПа.

В остальных ГРП применялись пружинные ПСК с пропускной способностью до 25 % расчетного расхода. Этому способствовало также появление более совершенных и безопасных редуccionных линий, где, кроме запорного и сбросного клапанов, присутствует также регулятор-монитор, задача которого — корректировка работы основного регулятора, а в случае аварии — выполнение его функций. Но большинство старых ГРП оказались лишены 4-го уровня защиты, когда гидрозатвор обеспечивал 100 % пропускной способности станции.

Вывод экспертов о заниженном диаметре сбросной «свечи» ПСК трудно понять. Клапан имеет отверстие с внутренней резьбой под диаметр, соответствующий паспортной пропускной способности. Сбросной трубопровод такого диаметра выводится затем наружу. Высота «свечи» рассчитывается по условию рассеивания газа так, чтобы в приземном слое не образовалась взрывоопасная концентрация, обычно не менее 3,0 м от уровня земли. Если переход на меньший диаметр и был осуществлен, критическим для обеспечения сброса газа это быть не могло.

Гораздо важнее сведения о «сифонной», то есть U-образной прокладке сбросного трубопровода и его незащищенности от атмосферных осадков. На польских ГРП этот трубопровод должен прокладываться Г-образным способом: сначала горизонтально через стену, а затем сразу вверх. Причину выполнения нелогичного, казалось бы, сифона можно объяснить. Отсутствие защиты от попадания влаги обычно объяснялось малым диаметром трубопровода. Считалось, что значительное количество осадков проникнуть туда не могло. Однако какое-то количество воды в «свечу» все-таки попадало. По трубопроводу она проникала в оборудование, вызывая его коррозию. А в случае замерзания воды работа ПСК могла полностью нарушаться.

Таким образом, сифон мог служить конденсатосборником, защищающим оборудование ГРП от попадания влаги. Расчет был на то, что при срабатывании ПСК газ просто вытолкнет воду в «свечу». Можно предположить, что снижение диаметра сбросного трубопровода было вызвано использованием готового сифона из подручного материала. Это действительно критическая ошибка персонала — при отрицательной температуре вода в сифоне превращается в ледяную пробку. Тогда даже при срабатывании ПСК газ в принципе не мог быть отведен в атмосферу.

Это подтверждает городская хроника, где за два дня до аварии была зарегистрирована «первая серьезная атака зимы». В 7 часов утра толщина снежного покрова достигала 37 см, а температура составляла –11 °С. Становится очевидной последовательность событий, относящихся к человеческому фактору и приведших к аварии: эксплуатация ГРП при неполном составе оборудования — безответственная блокировка

ПЗК резервной линии — незаконное «сифонное» выполнение сбросной линии — попадание влаги в сифон — ее замерзание при отрицательной температуре. Техническая причина — авария регулятора давления резервной линии ГРП — стала только инициирующим фактором этой цепочки.

5. Происхождение воды в системе

Этот вопрос не был проанализирован в прокурорском расследовании, которое однозначно указывает на атмосферное происхождение влаги. Но этот вывод основан на мнении экспертов, принятом без каких-либо доказательств.

Не отвергая полностью такую возможность, авторы хотят привлечь внимание еще к одному возможному источнику появления влаги в системах газоснабжения — влажности самого газа. По нормам любой страны в городские газораспределительные системы должен поступать сухой газ. Этот стереотип привел к тому, что из практики проектирования постепенно исчезли конденсатосборники, устанавливаемые в нижних точках подключающих участков, а ранее и под каждым стояком. На распределительных газопроводах их использование стало ограниченным.

В действительности речь идет об использовании не «сухого», а предварительно осушенного газа, который в принципе не может быть абсолютно сухим, иначе зачем бы в нормах по качеству газа упоминалась температура точки росы по влаге². Авторы посвятили цикл исследований проблемам качества газового топлива, в том числе его влажности [11]. Достаточно привести пример, что при влагосодержании на уровне температуры точки росы 0 °С абсолютная влажность газа составляет 4,88 г/м³, что соответствует 0,61 %об. Это означает, что газораспределительная система, доставляющая потребителям 1 млн м³ газа, транспортирует в его составе более 6000 м³ водяного пара.

Значение температуры точки росы в проанализированных нами сертификатах колебалось от +4 °С до –6 °С. В реальных же условиях эксплуатации этот показатель может достигать +20 °С. Это значит, что в зимние месяцы в газопроводах неизбежно происходит насыщение газа водяным паром с его последующей конденсацией.

Рассуждения о происхождении воды в системе никак не меняют сущности выполненного анализа — в рассматриваемом случае авария все равно бы произошла из-за сочетания неблагоприятных причин технического характера и человеческого фактора. Поэтому следующим шагом анализа была разработка рекомендаций по предотвращению повторения таких событий в системах газоснабжения.

Анализ организационно-технических мероприятий

Задачей прокурорского расследования было определение виновных в аварии. Для специалистов важнее определить комплекс организационно-технических мероприятий, которые гарантировали бы от повторения таких происшествий даже при самом неблагоприятном стечении обстоятельств.

После аварии польский нефтегазодобывающий концерн PGNiG разработал ряд рекомендаций. В первую очередь было предписано проверить действие всех пружинных предохранительно-сбросных клапанов. На ГРП, где еще сохранились гидрозатворы, требовалось инструментально проверить состав незамерзающих жидкостей, которыми они были заполнены.

Было найдено также временное решение по предотвращению проникновения воды в сбросные линии. Для этого в горизонтальной части «свечи» были сделаны небольшие отверстия. Отметим, что эта полумера противоречила принципу предотвращения образования взрывоопасной концентрации в приземном слое атмосферы. Отверстие было совсем небольшим, но в случае сброса газа часть его попадала в атмосферу на высоте около 0,5–1,0 м от поверхности земли.

Следующим шагом было конструктивное предотвращение попадания влаги в «свечу». Для этого из доступных материалов изготавливались шарнирные откидные клапаны на конце сбросного трубопровода. Клапан открывался под давлением выпускаемого газа, а по окончании сброса закрывался под собственным весом. Однако кустарный способ производства имел негативные последствия. Оси шарниров ржавели, их могло заклинивать, что затрудняло свободное открытие клапана. Иногда порыв ветра мог открыть клапан, и он оставался в таком положении.

² ГОСТ 5542–2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

Со временем такие устройства стали изготавливаться фабричным способом (рис. 2). Использование соответствующих материалов повышало надежность работы клапана, но полностью не исключало попадания осадков в «свечу». Загрязнения, перья птиц, листья, замерзающая в шарнире влага могли нарушать герметичность закрытого клапана.

Российским специалистам будет непонятно, почему польским коллегам не пришло в голову более простое и надежное решение. Речь идет об

Рис. 2. Современное исполнение сбросного и продувочного трубопроводов блочного ГРП польского производства

изгибе конца свечи вниз, издавна используемом в наших газорегуляторных установках (рис. 3). Здесь нет ненадежных движущихся деталей, а снег на правом снимке наглядно доказывает, что осадки в принципе не могут проникнуть в трубопровод.

Удалось выяснить, что этот способ в польском газоснабжении рассматривался. Но доводы в пользу решения с откидным клапаном трудно назвать убедительными. Например, были опасения, что истечение газа с большой скоростью при сбросе может перенести область взрывоопасной концентрации вниз — в зону работающей там аварийной бригады. Высказывалось даже несерьезное мнение о постепенном истирании изгиба трубы потоком газа.

Опасения создания взрывоопасной концентрации опровергает простой пример. Если расчетный расход ГРП составляет $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, а пропускная способность сбросной линии 25 %, то скорость истечения газа через «свечу» диаметром 25–30 мм составила бы всего 5–8 м/с. Газ в 1,7 раза легче воздуха, поэтому его струя сразу же изгибается вверх [12]. А вместе с ростом скорости истечения увеличивается и эжектирующая способность струи, поэтому она быстро размывается воздухом [13]. Образование взрывоопасной концентрации в приземном слое при высоте истечения 4,5–5 м практически невозможно,

Рис. 3. Предотвращение попадания атмосферных осадков в сбросной трубопровод на российских ГРП низкого давления

иначе это решение просто не могло бы использоваться в отечественном газоснабжении.

Кроме того, высокая скорость истечения при сбросе газа — это редкое явление. При стандартных причинах действия ПСК (слабая динамика регулятора давления, загрязнение седла его клапана или повреждение мембраны) клапан работает в пульсационном режиме. Происходит повышение давления в выпускном трубопроводе, клапан открывается, и некоторое количество газа сбрасывается в атмосферу. Давление падает, клапан закрывается, после чего цикл пульсации давления повторяется.

К тому же срабатывание ПСК должно дублироваться телеметрическим сигналом на диспетчерский пульт предприятия газоснабжения. В западных странах при высоких динамических характеристиках регуляторов в схемах ГРП часто вообще нет сбросного клапана. Присутствует только линия сигнализации, сообщающая о повышении давления газа до установленного «тревожного» уровня.

В польском газоснабжении на крупных станциях, где колебания потребления газа и давления сглажены, сбросные устройства не монтируются. На городских ГРП, более подверженных резким колебаниям давления, обычно предусматривается ПСК с пропускной способностью 2 % от расчетного расхода станции. Такое устройство уже не рассматривается как элемент системы безопасности. Оно только «страхует» регулятор давления, если тот не справляется с динамикой изменения давления.

Выводы

Выполненный анализ и саму его необходимость легко подвергнуть критике на одном только основании — описанная ситуация уникальна и повториться просто не может. Обратим, однако, внимание на то, что и произойти эта авария не должна была и даже не могла. Но цепочка насаивающихся и взаимно усиливающих последствия действий очень похожа на эффект домино. Задачей авторов было привлечь внимание специалистов к тому, что в газоснабжении нет более или менее важных аспектов в эксплуатации. Каждая неисправность или ошибочные действия, несмотря на их незначительность, могут привести к трагическим последствиям.

То, что рассмотренная авария не может считаться единичной, доказывает недавний пример. 14 сентября 2018 г. один человек погиб и 12 были ранены в результате нескольких десятков взрывов, связанных с утечками газа в трех населенных пунктах недалеко от Бостона, США³. В городах Лоуренс (Lawrence), Эндовер (Andover) и Северный Эндовер (North Andover) в тушении пожаров принимало участие 50 пожарных расчетов, сотни жильцов были эвакуированы. По предварительным выводам пожарных причиной было слишком высокое давление газа. На фоне этого примера проанализированная выше авария уже не кажется столь уникальной.

Библиографический список

1. Ansari N., Riazi M., Ayatollahi S., Samipour S. Underground natural gas storage in a low quality gas reservoir - Produced gas quality control by rate optimization // *Proceedings of 79th EAGE Conference and Exhibition 2017: Energy, Technology, Sustainability - Time to Open a New Chapter*. Paris, France, 12–15 June 2017. Pp. 1518–1522.
2. Kuleszyńska D. Zielona Góra: Kuchenki wybuchały ludziom w domach! // *Super Express*. 01.12.2010. URL: http://www.se.pl/wiadomosci/polska/kuchenki-wybuchały-ludziom-w-domach_162460.html (Дата доступа 12.09.2018).
3. Janta-Lipińska S., Szkarowski A. The study on decreasing of nitrogen oxides emission carried out on DKVR 10-13 industrial heating boilers // *E3S Web of Conferences*. Volume 44, 2018. 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering. EKO-DOK 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400056.
4. Fu X., Li G., Zhang X., Qiao Z. Failure probability estimation of the gas supply using a data-driven model in an integrated energy system // *Applied Energy*. 2018. Vol. 232 (C). Pp. 704–714. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.097.
5. Pavlenko A., Koshlak H., Szkarowski A. Modeling of Combustion Processes water-oil emulsion // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 1. Pp. 128–131 (ISSN 2076-0507).
6. Kim J.-H., Doh D.-H., Choi B.C. Evaluation of the ventilation safety requirements for the fuel gas supply system room of a gas-fueled vessel: Simulated leaks of methane and propane // *Journal of Mechanical Science*

³ USA: Seria wybuchów gazu. Kilkadziesiąt eksplozji // *Interia Fakty*. 14.09.2018. URL: <https://fakty.interia.pl/swiat/news-usa-seria-wybuchow-gazu-kilkadziesiat-eksplozji,nId,2631139> (Дата доступа 12.09.2018).

and Technology. 2018. Vol. 32 (11). Pp. 5521–5532. DOI: 10.1007/s12206-018-1050-7.

7. Maliszewska A., Shkarovskiy A. The influence of gas cookers on the concentration of hazardous substances in individual kitchens and in living rooms, including ventilation for the final air quality // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 44. 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering. EKO-DOK 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400160. 8 p.

8. Tymchik G. S. et al. Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines // *Proceedings of SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108085A (1 October 2018). DOI: 10.1117/12.2501594. 01.10.2018.

9. Vasista T. G., al-Sudairi M. A. T. Managing through computer aided quality control in oil & natural gas industry project sites // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018. Vol. 10 (4). Pp. 896–905.

10. Szkarowski A. *Spalanie gazów. Teoria, praktyka, ekologia*. Warszawa: WNT, 2014. 160 p.

11. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Kolienko A. Gas quality control as a tool of energy saving // *Gas, Water and Sanitary Engineering*. 2013. Vol. 4. Pp. 146–150.

12. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Dąbrowski T. Research on Co-combustion of Gas and Oil Fuels // *The Environment Protection*. Annual set. 2018. Vol. 20, Part 2. Koszalin. Poland. Pp. 1515–1529.

13. Wang Y., Yang S. Proposal and thermodynamic analysis of a combined open-cycle absorption heat pump and thermal desalination system driven by high-humidity exhaust gas // *Desalination*. 2018. Vol. 448. Pp. 93–102. DOI: 10.1016/j.desal.2018.10.003.

References

1. Ansari N., Riazi M., Ayatollahi S., Samipour S. *Underground natural gas storage in a low quality gas reservoir. Produced gas quality control by rate optimization*. Proceedings of 79th EAGE Conference and Exhibition 2017: Energy, Technology, Sustainability – Time to Open a New Chapter. Paris, France, 12–15 June 2017, pp. 1518–1522.

2. Kuleszyńska D. Zielona Góra: Kuchenki wybuchały ludziom w domach! *Super Express*, 01.12.2010. Available at: http://www.se.pl/wiadomosci/polska/kuchenki-wybuchały-ludziom-w-domach_162460.html (accessed: 12.09.2018).

3. Janta-Lipińska S., Szkarowski A. The study on decreasing of nitrogen oxides emission carried out on DKVR 10-13 industrial heating boilers. *E3S*

Web of Conferences, 2018, vol. 44. 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering. EKO-DOK 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400056.

4. Fu X., Li G., Zhang X., Qiao Z. Failure probability estimation of the gas supply using a data-driven model in an integrated energy system. *Applied Energy*, 2018, vol. 232 (C), pp. 704–714. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.097.

5. Pavlenko A., Koshlak H., Szkarowski A. Modeling of Combustion Processes water-oil emulsion. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 1. pp. 128–131 (ISSN 2076-0507).

6. Kim J.-H., Doh D.-H., Choi B.C. Evaluation of the ventilation safety requirements for the fuel gas supply system room of a gas-fueled vessel: Simulated leaks of methane and propane. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32 (11), pp. 5521–5532. DOI: 10.1007/s12206-018-1050-7.

7. Maliszewska A., Shkarovskiy A. The influence of gas cookers on the concentration of hazardous substances in individual kitchens and in living rooms, including ventilation for the final air quality. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 44, 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering. EKO-DOK 2018, 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400160.

8. Tymchik G. S. et al. Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines. *Proceedings of SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108085A (1 October 2018). DOI: 10.1117/12.2501594. 01.10.2018.

9. Vasista T. G., al-Sudairi M. A. T. Managing through computer aided quality control in oil & natural gas industry project sites. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2018, vol. 10 (4), pp. 896–905.

10. Szkarowski A. *Spalanie gazów. Teoria, praktyka, ekologia*. Warszawa: WNT, 2014, 160 p.

11. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Kolienko A. Gas quality control as a tool of energy saving. *Gas, Water and Sanitary Engineering*, 2013, vol. 4, pp. 146–150.

12. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Dąbrowski T. Research on Co-combustion of Gas and Oil Fuels. *The Environment Protection*, annual set. 2018, vol. 20, Pt 2, pp. 1515–1529. Koszalin, Poland.

13. Wang Y., Yang S. Proposal and thermodynamic analysis of a combined open-cycle absorption heat pump and thermal desalination system driven by high-humidity exhaust gas. *Desalination*, 2018, vol. 448, pp. 93–102. DOI: 10.1016/j.desal.2018.10.003