

УДК 504.05

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Стручкова Г.П.<sup>1</sup>, Капитонова Т.А., Слепцов О.И., Левин А.И.<sup>2</sup>

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН*

*г. Якутск, e-mail: <sup>1</sup>g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru, <sup>2</sup>a.i.levin@prez.ysn.ru*

**Аннотация.** На основе статистических данных за 30 лет, гистограмм и характера отказов работы магистрального газопровода Мастах - Берге - Якутск определены причины и особенности механизмов возникновения аварий в условиях криолитозоны.

Рассмотрены различные сценарии развития аварийных процессов на объектах нефтегазового комплекса, выделены наиболее возможные и наиболее опасные из них и определены зоны возможного поражения. Результаты могут быть использованы при решении задач мониторинга, оценки риска и прогноза развития чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса Республики Саха (Якутия).

**Ключевые слова:** трубопровод, гистограмма количества отказов, моделирование аварийных ситуаций, объекты нефтегазового комплекса, чрезвычайные ситуации, геоинформационные технологии, ГИС

На объектах газоснабжения Якутии за год регистрируется несколько десятков чрезвычайных ситуаций разной степени тяжести, в основном, в зимний период. В связи с тем, что последствия аварий могут быть колоссальны по ущербу и человеческим жертвам, особенно, если техногенная катастрофа произойдет в период низких зимних температур, актуальной становится задача оценки потенциальных угроз, моделирование аварий, определение зоны поражения и оценка последствий.

В течение 30 лет эксплуатации Институт физико-технических проблем Севера (ИФТПС СО РАН) ведет мониторинг газопроводных систем Республики Саха (Якутия), накоплена информация по работоспособности и состоянию газопроводов в районах с экстремальными климатическими условиями Севера, которые обобщены в ряде публикаций [1 - 3]. Все случаи аварийных ситуаций за годы эксплуатации имеют привязку к газопроводу. Визуализация их с помощью геоинформационных систем (ГИС) показывает, что некоторые участки трубопровода чаще подвергаются авариями – рис. 1. Как правило, это зоны тектонических нарушений, где имеют место пульсации горных пород, речные переходы, места резких изменений рельефа, участки развития сложных геологических процессов. Климатические особенности территории прохождения трассы трубопровода определяют такие специфические экзогенные процессы, развитие которых представляет опасность для трубопровода, как термоэрозия, термокарстовые явления, оползни, заболачивание мест прохождения трассы.

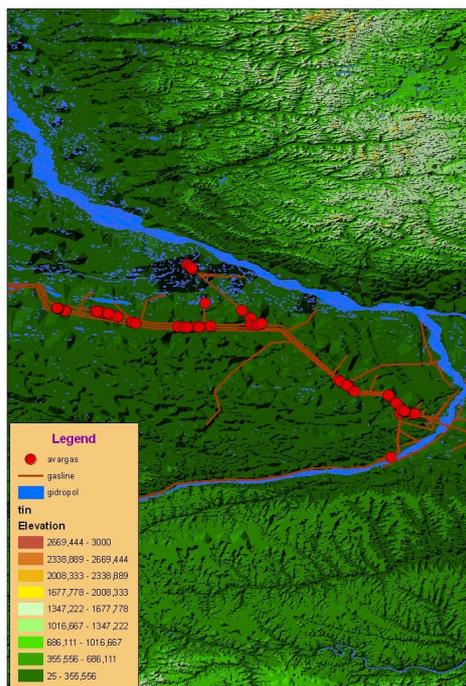


Рис. 1. Распределение отказов и аварий газопровода Мастаах - Берге - Якутск по данным статистики за 30 лет эксплуатации

На основе данных по авариям и отказам построена гистограмма количества отказов (рис. 2), связанных с разрушением металла труб за весь период эксплуатации. Анализ гистограммы показывает, что с 1975 по 1978 годы зависимость носила стабильный характер, а начиная с 1978 года, наблюдается рост количества разрушений. Это связано с вводом в эксплуатацию второй нитки подземного газопровода Мастах - Берге - Якутск.

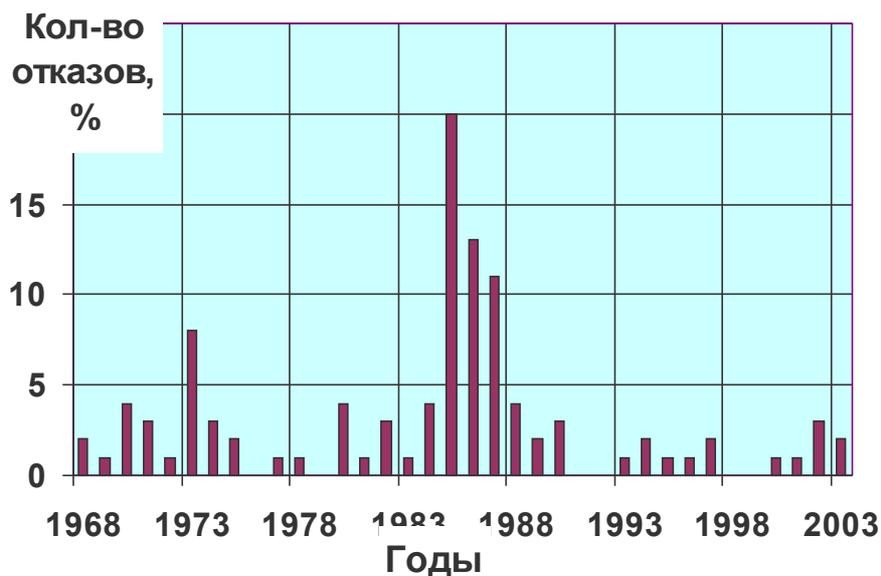


Рис.2. Гистограмма количества отказов магистральных газопроводов с 1968 по 2003 гг.

Анализ наиболее характерных причин отказов газопровода Мастаах - Берге - Якутск выявил, что более 50 % отказов приходится на сварные кольцевые швы с образованием сквозной трещины-свища (рис. 3). Изучение причин образования свищей показывает, что основными очагами разрушений служат дефекты сварки корневого шва (непровары, поры, шлаки и т.д.), являющиеся концентраторами напряжений. Статистическим анализом размеров выявленных свищей, установлено, что свищи с размерами от 10 до 30 мм составляют более 55 % от общего количества [1].

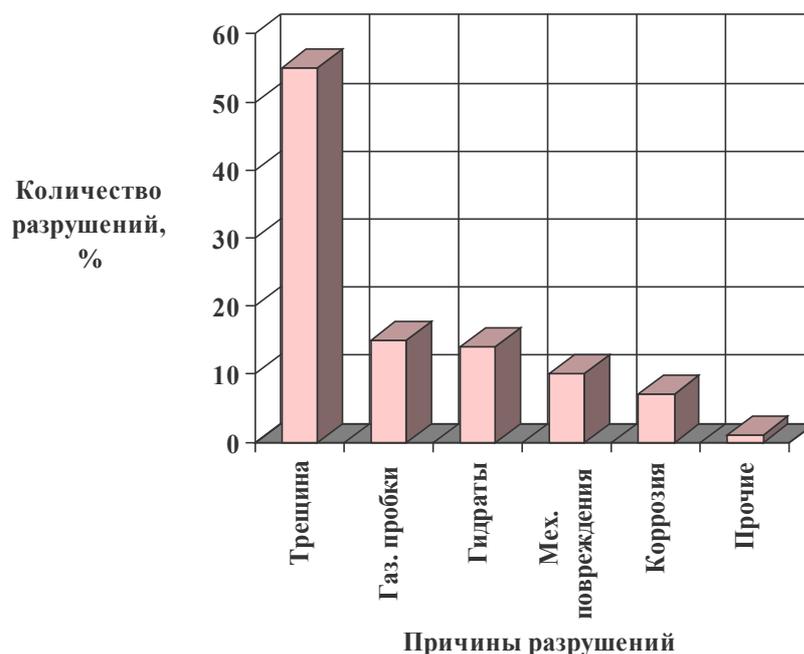


Рис. 3. Характер отказов магистральных газопроводов.

Общую последовательность развития разрушения трубопровода можно представить следующим образом. В результате циклических напряжений, созданных опасными геологическими экзогенными процессами, перепадами температуры окружающей среды и колебаниями рабочего давления за время эксплуатации трубопровода около дефектов (пор, непроваров, шлаковых включений и т.д.) накапливаются повреждения, которые служат зародышем магистральной трещины. В процессе эксплуатации с образованием сквозной трещины-свища происходит хрупкое или квазихрупкое распространение трещины по металлу кольцевого сварного шва с последующим выходом в основной металл.

Одним из наиболее распространенных и характерных режимов выброса природного газа в атмосферу из трубопроводов высокого давления является факельный выброс [4 - 6]. Факельными выбросами газов называют кратковременные выбросы газов из трубопроводов или сосудов под высоким давлением в атмосферу. Объемы поступающего в окружающую среду природного газа при факель-

ных выбросах, как правило, относительно невелики. Они представляют опасность для персонала, населения и окружающей среды в непосредственной близости к очагу выброса (зона опасности, как правило, не превышает нескольких километров).

Механизм действия факельного выброса основан на дальнобойности свободной затопленной струи и эжекционном вовлечении этой струей окружающего воздуха. При слабом ветре выброшенная газовая струя достигает значительной высоты. Интенсивное турбулентное перемешивание приводит к быстрому рассеиванию газовой струи в окружающем воздухе и образованию хорошо смешанных метановоздушных смесей.

При исследовании механизма выброса природного газа в атмосферу и его распространения в окружающей среде необходимо учитывать рельеф местности и состояние атмосферы [7 - 9].

Анализ показал, что воспламенение метановоздушной смеси при аварии на газопроводах, как правило, происходит:

- от точечных источников (искра от замыкания в электроприборах, зажженная сигарета и т.п.);
- линейных источников (например, накалинные провода при замыкании высоковольтной линии электропередачи);
- плоскостных источников (раскаленная стена сооружения, «стена» открытого огня и т.п.);
- от осколков разрушенной трубы;
- пространственных источников (например, костер в зоне аварии или перегретый электроприбор на крановой площадке линейной части магистрального газопровода).

Сценарии развития аварийных ситуаций разрабатываются исходя из опасностей, обнаруженных на этапе их идентификации и анализе последствий проявления. При определении возможного набора сценариев предполагается, что одно и то же событие может вызвать различные последствия, вызванные различными риск-факторами или их сочетаниями. Обычной практикой является выделение базовых (как правило, связанных с наиболее острыми последствиями) сценариев [2].

При моделировании сценариев ЧС природного характера необходимо учитывать развитие следующих опасных ситуаций:

1. атмосферно-экологических, связанных с погодными и климатическими явлениями (ураган, ливни, снегопады, смог и др.);
2. геологических, связанных с проявлением геолого-геоморфологических явлений (землетрясение, термокарст, термоэрозия, осыпь, оползень, просадка);
3. гидроэкологических (паводок, подъем - падение уровня грунтовых вод, их загрязнение);

Все они могут проявляться вместе, или в определенном сочетании, вызывать друг друга, или наоборот, гасить. В зависимости от разных пространственных и временных уровней проявления геоэкологических ситуаций нужно выделять участки экологических нарушений и проблем, неблагоприятных проявлений (сезонный период) и воздействий (суточный период).

На основе анализа отказов и аварий на магистральных газопроводах и на объектах, находящихся в похожих климатических условиях, с близкими объемами транспортировки и имеющих сходное оборудование, выбраны следующие последствия аварий (в порядке убывания вероятности)

- образование свищей, разливы газоконденсатов как на суше, так и на водной поверхности (на поймах рек, озера и болота);
- пожары в лесах и в окрестностях магистрального газопровода;
- пожары и взрывы в населенных пунктах;
- горение паров газоконденсата в открытом пространстве при высоких летних температурах;
- загрязнение воздуха токсичными продуктами горения;
- загрязнение воды нефтепродуктами (газоконденсата);
- взрыв, пожар и «огненные шары» при пожаре в газораспределительных станциях и объектах газодобычи и переработки;
- пожар в жилых помещениях;
- отключение подачи газа на объекты жилищно-коммунального хозяйства;
- отключение подачи газа на объекты «Якутскэнерго»;
- отключение подачи электроэнергии в центральном энергетическом районе республики;
- размораживание объектов жилищно-коммунального и коммунально-бытового хозяйства;
- прекращение работы всех жизненно важных объектов центрального района республики.

Поражающими факторами рассмотренных аварий являются:

- ударная волна;
- тепловое излучение и горячие продукты горения;
- открытое пламя и горящие газонефтепродукты (газоконденсат);
- токсичные продукты горения;
- осколки разрушенного оборудования, трубопроводов и емкостей, обрушение зданий и конструкций.

Для линейной части магистрального газопровода Мастаах - Бергэ - Якутск построены возможные сценарии развития аварийной ситуации, проанализированы и определены самый опасный – разрыв на пересечении трех ниток (сценарий А) и самый вероятный случаи (сценарий Б):

**Сценарий А:** разрыв газопровода → образование котлована в «твердом» грунте с разлетом осколков трубы и одновременным образованием ударной воздушной волны → истечение газа из котлована в виде «колонного» шлейфа → воспламенение истекающего газа с образованием «столба» пламени → вследствие физического взрыва или пожара разрушение еще двух ниток газопровода с образованием ударных воздушных волн → горение реактивно взаимодействующих струй газа в виде «колонного шлейфа» → попадание людей, наземных сооружений газопровода в зону барического, прямого или радиационного термического воздействия → получение людьми травм в результате воздействия ударной волны и/или осколков, ожогов различной степени тяжести, повреждение сооружений;

**Сценарий Б:** разрыв газопровода → «вырывание» концов разрушенного газопровода из «слабонесущего» грунта с разлетом осколков трубы и одновременным образованием ударной воздушной волны → истечение газа из газопровода в виде двух независимых высокоскоростных струй → рассеивание истекающего газа без воспламенения → попадание людей, наземных сооружений газопровода в зону барического воздействия или газового облака → получение людьми травм в результате воздействия ударной волны и/или осколков.

11 марта 2010 г. взрыв и возгорание произошли в четверг ночью на 177-м километре магистрального газопровода в Якутии – рис. 4.



Рис. 4. Факельное воспламенение на 177 км магистрального газопровода.

Аварийный участок находился в 40 километрах от города Мирный и в 500 метрах от автотрассы Мирный-Ленск. Протяженность участка 35 км. Предположительной причиной аварии явилось образование свища в технологическом отверстии. В результате утечки газа произошла разгерметизация газопровода в районе технологического отверстия с последующим выбросом газа и его возгоранием от осколков разрушенной трубы и железобетонных плит переезда.

Предположительный сценарий развития аварийной ситуации следующий:

Вытаивание вечной мерзлоты → образование термокарста → изменение напряженно-деформированного состояния металла трубопровода → накопление повреждений → разрыв газопровода с разлетом осколков трубы и одновременным воспламенением истекающего газа → горение реактивно взаимодействующих струй газа в виде «колонного шлейфа» → попадание наземных сооружений газопровода в зону термического воздействия.

### Выводы

Проведено исследование процессов, определяющих инициирование техногенных аварий на газодобывающих территориях Севера России.

Выполнено моделирование сценариев чрезвычайных ситуаций, характерных для газодобывающих территорий в условиях криолитозоны, и решены следующие задачи:

– собраны, проанализированы и введены в базу геоинформационных данных сведения об опасных геологических процессах и техногенных авариях, характерных для газодобывающих территорий Севера России;

– на основе исследования особенностей причин аварий и отказов на магистральных газопроводах, характерных для климатических условий Севера, разработаны модели сценариев, выделены наиболее опасные и наиболее вероятные из них.

*Работа выполнена при поддержке Программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН, проект № 42 «Природные и техногенные риски критически важных гидротехнических объектов, водохранилищ и водных систем Сибири» и Программы Президиума РАН № 14 «Проблемы создания информационной среды на основе GRID-технологий, облачных вычислений и современных телекоммуникационных систем».*

### Литература

1. Слепцов О.И., Левин А.И., Стручкова Г.П., Семенова Т.И. Безопасность Республики Саха (Якутия): социальные, экономические и техногенные проблемы. Под ред. В.Ю. Фридовского, В.А. Прохорова. Новосибирск: Наука, 2008. 296 с., Раздел 4.

2. Слепцов О.И., Левин А.И., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Большаков А.М. Надежность и безопасность газопроводного транспорта в условиях Крайнего Севера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 4. С. 95 - 103.

3. Слепцов О.И., Лыглаев А.В., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П. Исследование техногенных аварий и антропогенных воздействий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия) // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 4. С. 88 - 94.

4. Вулис Л.А., Ершин Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. Л.: Энергия, 1968. 204 с.

5. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. Л.: Энергия. 1978. 216 с.

6. Селезнев В.Е., Клишин Г.С., Гриценко А.И. и др. Технология комплексной оценки состояния трубопроводов // Итоги и перспективы десятилетнего сотрудничества Минатома РФ и ОАО «ГАЗПРОМ»: Сборник докладов научно-практической конференции (г. Нижний Новгород, 03 дек. 1999 г.). Ч. I. М.: ИРЦ ОАО «Газпром», 2000. С. 103 - 112.

7. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем. М.: УРСС, 2002. 448 с.

8. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. и др. Моделирование выбросов и утечек природного газа // Газовая промышленность. 2000. № 1. С. 6 - 7.

9. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. Математический анализ газовой опасности при выбросах природного газа // Инженерная экология. 2000. № 5. С. 29 - 36.

**SIMULATION OF EMERGENCY SITUATIONS  
AT THE OIL AND GAS COMPLEX  
UNDER CONDITIONS OF THE PERMAFROST**

G.P. Struchkova<sup>1</sup>, T.A. Kapitonova, O.I. Sleptsov, A.I. Levin<sup>2</sup>

*Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North  
of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia*

*e-mail: <sup>1</sup>g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru, <sup>2</sup>a.i.levin@prez.ysn.ru*

**Abstract.** *On basis of the statistical data for 30 years, the histogram and the nature of pipeline failures on the Mastakh-Bergeh-Yakutsk gas main the causes and mechanisms of accidents under conditions of the permafrost have been determined. Various scenarios of emergency processes at facilities of oil and gas complex have been considered. The most probable and dangerous of them are marked out and the areas of possible defeat are identified. The results can be used for solving the tasks of monitoring, risk assessment and prognosis of emergency at oil and gas facilities in the Republic of Sakha (Yakutia).*

**Keywords:** *pipeline; histogram of failures; simulation of emergency situations. facilities of oil and gas complex, emergency, GIS-technologies*

**References**

1. Sleptsov O.I., Levin A.I., Struchkova G.P., Semenova T.I. Bezopasnost Respubliki Saha (Yakutiya): sotsialnye, ekonomicheskie i tehnogennye problemi (Safety of the Sakha Republic (Yakutia): social, economic, and man-made problems) Ed. by Fridovsky, V.Yu., Prokhorov V.A. Novosibirsk, Nauka, 2008. 296 p. Part 4.

2. Sleptsov O.I., Levin A.I., Kapitonova T.A., Struchkova G.P., Bolshakov A.M. Nadezhnost i bezopasnost gazoprovodnogo transporta v usloviyakh Krainego Severa (Reliability and safety of gas-line transport under conditions of the far north), *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, 2007, Issue 4, pp. 95 - 103.

3. Sleptsov, O.I., Lyglaev A.V., Kapitonova, T.A., Struchkova, G.P. Issledovanie tehnogennykh avariyy i antropogennykh vozdeystviy na ekologicheskuyu bezopasnost Respubliki Sakha (Yakutiya) (Investigation of technogenic emergency and anthropogenic influence upon ecological safety of the republic of Sakha (Yakutia)), *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, 2007, Issue 4, pp. 88 - 94.

4. Vulis L.A., Ershin Sh.A., Yarin L.P. Osnovy teorii gazovogo fakela (Fundamentals of gas flare theory). Leningrad, Energiya, 1968. 204 p.

5. Vulis L.A., Yarin L.P. Aerodinamika fakela (Flare aerodynamics). Leningrad, Energiya, 1978. 216 p.

6. Seleznev V.E., Klishin G.S., Gritsenko A.I. et al. Tekhnologiya kompleksnoi otsenki sostoyaniya truboprovodov (Technology of complex estimation of pipelines state), *Itogi i perspektivy desyatiletnego sotrudnichestva Minatoma RF i OAO "GAZ-PROM"* (Results and prospects of the ten-year co-operation of the Ministry of Atomic

*Energy and "Gazprom" JSC*), Proceedings of the sci. conf. (Nizhny Novgorod, December 3, 1999). Part I. Moscow: IRC "Gazprom" JSC, 2000. pp. 103 - 112.

7. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Klishin G.S. *Metody i tekhnologii chislennogo modelirovaniya gazoprovodnykh sistem* (Methods and technologies of numerical simulation of gas pipeline systems). Moscow, URSS, 2002. 448 p.

8. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Klishin G.S. et al. *Modelirovanie vybrosov i utechek prirodnogo gaza* (Simulation of natural gas emission and leakage), *Gazovaya promyshlennost - Gas Industry of Russia*, 2000, Issue 1, pp. 6 - 7.

9. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Klishin G.S. *Matematicheskii analiz gazovoi opasnosti pri vybrosakh prirodnogo gaza* (Mathematical analysis of gas hazard in emissions of natural gas). *Inzhenernaya ekologiya*, 2000, Issue 5, pp. 29 - 36.