

DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-71-76

УДК 004.021:621.643.8

© В.В. Жарков, Т.В. Савицкая, А.М. Сверчков, 2021

Исследование влияния факторов состояния магистральных нефтепроводов на степень риска аварий



В.В. Жарков,
аспирант,
191641@muctr.ru

РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва,
Россия



Т.В. Савицкая,
д-р техн. наук,
проф.



А.М. Сверчков,
науч. сотрудник

ЗАО НТЦ ПБ,
Москва, Россия

Рассмотрены современное состояние нефтяной промышленности в России, основные причины разгерметизации нефтепроводов и методы оценки риска аварий на магистральных нефте- и продуктопроводах. Проведен обзор программного обеспечения для оценки риска аварий на опасных производственных объектах. В среде программирования Delphi разработано программное приложение, предназначенное для оценки факторов влияния состояния опасных производственных объектов магистральных нефте- и продуктопроводов на степень риска аварий. Представлена апробация программного приложения для эксплуатируемого трубопровода.

Ключевые слова: оценка степени риска аварий, балльная оценка, опасный производственный объект, магистральный нефтепровод, магистральный нефтепродуктопровод, программное приложение.

Для цитирования: Жарков В.В., Савицкая Т.В., Сверчков А.М. Исследование влияния факторов состояния магистральных нефтепроводов на степень риска аварий// Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 10. — С. 71–76. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-71-76

Введение

В свете глобального экономического развития спрос на нефтяные ресурсы и энергию в разных странах растет [1, 2]. Чтобы решить проблему дисбаланса между спросом и предложением, нефте- и газопроводы строились в большом количестве из-за их экономичности и высокой эффективности в транспортировке газа и нефти. Строительство трубопроводов существенно влияет на экономическую и экологическую обстановку в районах их расположения. Из-за большой протяженности трубопроводов неизбежно, что они будут проложены через районы со сложной геологической средой. Имеется много рисков, связанных с многочисленными авариями и инцидентами, вызванными коррозией, оползнями, наводнениями, обвалами и землетрясениями [3]. Следовательно, оценка риска используется для определения риска, связанного с эксплуатацией трубопроводов, возможности возникновения и последствий несчастных случаев, а также для всестороннего расчета значения риска [4].

Выбор методики оценки риска — важнейший этап эффективной организации процессов по предупреждению и ликвидации последствий аварий на магистральных трубопроводах (МТ). Например, Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах (ОПО) магистрального трубопроводного транспорта газа [5] позволяет оценить риски аварий

на магистральных газопроводах. В работе [6] предложена методика оценки риска аварий на МТ. Она разработана на основе метода экспертных оценок и позволяет уточнить перечень МТ, для которых необходимо спрогнозировать последствия аварий, вовремя их ликвидировать и повысить эффективность их ликвидации. При постановке задачи используются критерии для оценки вероятности возникновения и развития аварии, оценки тяжести последствий аварии. Кроме критериев устанавливаются граничные условия, согласно которым критерий будет применяться или не применяться при оценке конкретного участка. Построение рейтинга опасных участков МТ позволяет оптимально распределять ресурсы на реализацию мероприятий по предупреждению, локализации и ликвидации последствий аварий.

Предложен новый подход к количественной оценке показателей риска аварий, который учитывает нестационарные процессы, происходящие во время аварий на МТ [7]. Этот подход применяется для снижения оценки количественных показателей риска аварий, а также для оценки показателей риска аварий на более качественном уровне. Данный подход позволяет для каждого единичного сценария на конкретном участке трубопровода получить изменяющиеся во времени поля потенциального риска, из которых и формируются традиционные поля потенциального риска, в том числе и с максимально

достижимыми значениями за весь рассматриваемый период.

В работе [8] обоснована необходимость учета при составлении математической модели течения в МТ вероятного вскипания транспортируемой жидкости. При анализе и моделировании МТ необходимо учитывать кавитационные явления. При нештатных ситуациях в трубопроводе могут образовываться столбы жидкости, разделенные зонами вскипания жидкости и колеблющиеся в разных фазах, соответственно при схлопывании кавитационных пузырей в определенных зонах на линейной части трубопровода могут возникнуть локальные гидроудары. В случае различных диаметров, длин трубопроводов, высотного профиля трубопровода возникают и другие ситуации. Для предупреждения и предотвращения данных эксцессов анализ нагрузок на трубопровод при возникновении явления гидроудара необходимо проводить с учетом возможного вскипания жидкости [8].

Таким образом, научным сообществом ведутся работы по модернизации и учету дополнительных элементов в последовательности риск-анализа, дополняющие существующие на практике подходы к оценке риска аварий, которые возможно адаптировать не только к российским условиям эксплуатации МТ, но и внедрить в практику управления промышленной безопасностью любой другой страны.

Теоретическая часть

Для оценки локальной частоты аварий вводится система классификации и группировки факторов влияния в соответствии с общими причинами аварий, выявляемыми при анализе статистических данных по аварийным отказам. Из статистических данных по авариям на ОПО магистральных нефтепроводов (МН) и магистральных нефтепродуктопроводов (МНПП) выделяются пять групп факторов влияния с указанием относительного вклада каждой группы Γ_i (i меняется от 1 до 5) в суммарную статистику аварийных отказов с помощью весового коэффициента ρ_i . Доля группы ρ_i определяется исходя из данных по аварийности на рассматриваемом участке ОПО МН и МНПП. В пределах каждой группы Γ_i имеется различное число факторов влияния J_i . Каждый фактор имеет обозначение F_{ij} , где i — номер группы; j — номер фактора в группе.

Относительный вклад фактора F_{ij} внутри своей группы в изменение интенсивности аварийных отказов на рассматриваемом участке ОПО МН и МНПП учитывается с помощью весового коэффициента (доли) q_{ij} .

Из статистических данных по авариям для эксплуатируемых ОПО МН и МНПП рассматриваются следующие группы факторов влияния: внешние антропогенные воздействия, коррозия, природные воздействия, конструктивно-технологические факторы, дефекты тела трубы и сварных швов.

За основу разработанного программного приложения взята методика «Балльная оценка факторов влияния состояния ОПО МН и МНПП на степень риска аварий» [9].

Проведенный анализ зарубежного и российского программного обеспечения по предупреждению и предотвращению возможных рисков на ОПО показал следующее.

Программный комплекс (ПК) PHAST и его версия для оценки риска SAFETI (PHAST RISK), разработанные международной фирмой Det Norske Veritas (DNV) [10], широко используются для количественной оценки риска в нефтегазовой и химической промышленности на известных всем методиках для отдельных явлений: взрывов топливно-воздушной смеси, огненных шаров и струй. Также можно отметить зарубежный ПК ALOHA [11], который позволяет давать количественную оценку зон поражения в случае гипотетических аварий на потенциально опасных объектах нефтегазовой, химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Комплекс дает оценку и прогноз зон поражения с учетом розы ветров при аварийных выбросах химически опасных веществ. Но в программах [10, 11] не реализованы функциональные возможности для ОПО МТ.

Программное средство ТОХИ+Гидроудар, разработанное ЗАО НТЦ ПБ, позволяет моделировать течение жидких продуктов по трубопроводам и переходные процессы, проводить оценку вероятности разгерметизации труб и количества вылившегося продукта после разгерметизации. Отображать давление, расход, скорость течения и др. в графиках, диаграммах и в табличном виде (Excel). Полученные данные можно загрузить в ТОХИ+Risk и количественно оценить показатели риска аварий [12].

Компания ЗАО НПП «Авиаинструмент» разработала ПК «Русь», который решает специфические отраслевые задачи: мониторинг, управление, сбор, хранение, анализ, моделирование и визуализация данных. Программный комплекс модульный, что позволяет подключить отдельные модули, представляющие отдельную программу или дополняющий функционал программы или модуля. В этом пакете интерес представляет программа «Балльная оценка факторов влияния состояния ОПО МН и МНПП на степень риска аварии», которая позволяет решить поставленные задачи [13].

В данных программах реализованы функциональные возможности для моделирования МН, но обе программы являются высоко профессиональными, предназначенными для специалистов с опытом расчетов эксплуатируемых и проектируемых МТ. В целях обучения студентов навыкам исследования факторов влияния состояния ОПО МН и МНПП на степень риска аварии разработано собственное программное приложение [14].

Это приложение предназначено для решения задач оценки факторов влияния состояния МН и МНПП на степень риска аварий.

Программное приложение позволяет рассчитывать вероятность возникновения аварий для эксплуатируемых или проектируемых нефте- и продуктопроводов по перечисленным выше группам факторов. Для работы программы интегрирован алгоритм расчета балльной оценки, разработаны и интегрированы алгоритмы обработки заданных значений и создания текстового отчета о проведенных расчетах.

Программа написана на языке программирования Delphi и реализует следующий алгоритм.

Пользователь вводит параметры трубопровода: коэффициент прочности, способ прокладки.

Проводится расчет:

балльной оценки внешних антропогенных воздействий (глубина заложения трубопровода, уровень антропогенной активности и опасность диверсий);

балльной оценки коррозии (коррозионная активность грунта, наличие подземных металлических сооружений и энергосистем, электрохимической защиты);

балльной оценки природных воздействий (вероятность перемещений грунта и проведение превентивных мероприятий);

балльной оценки конструктивно-технологических факторов (отношение фактической толщины стенки трубы к требуемой, усталость металла, возможность возникновения гидравлических ударов, системы телемеханики);

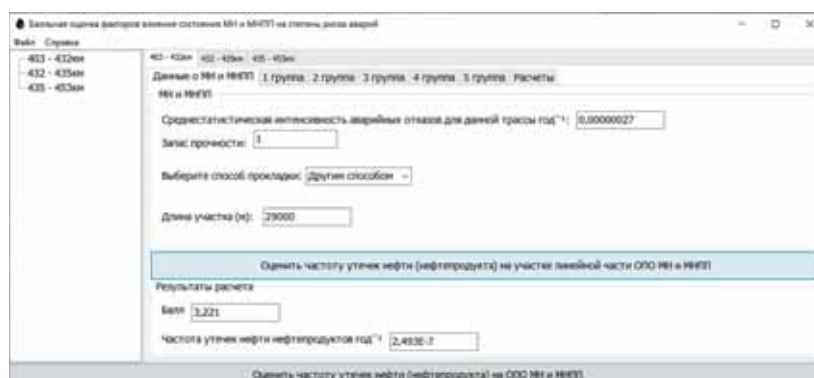
балльной оценки дефектов тела трубы для эксплуатируемого участка МН и МНПП (число дефектов и диагностика) или расчет балльной оценки сложности строительно-монтажных работ для проектируемого участка (категория участка по сложности производств работ);

балльной оценки нефтепровода;

удельной частоты аварий на нефтепроводе.

Приложение разделено на две области (рис. 1). Слева можно добавлять и удалять участки нефтепровода. Справа заполняются исходные данные по вкладкам (пять групп факторов). Результаты расчета балльной оценки и частоты утечек нефти (вероятность возникновения аварий) выводятся на вкладке «Данные о МН и МНПП». Более подробный расчет можно посмотреть на вкладке «Расчеты». Для расчета вероятности возникновения аварии используется средняя балльная оценка, которая рассчитывается или принимается равной 3 при отсутствии данных.

При запуске программы необходимо указать данные об участке трубопровода. Далее заполняются данные по пяти группам факторов (см. рис. 1). Результатами расчета являются балльная оценка и ве-



▲ Рис. 1. Пример расчета в программе

▲ Fig. 1. Example of calculation in the program

роятность возникновения аварии для любого участка нефте- и продуктопровода. На выходе программа выдает полную информацию о рассчитанной вероятности возникновения аварии в виде текстового отчета.

Проведена апробация разработанного программного приложения на нескольких эксплуатируемых трубопроводах, пример расчета одного из которых представлен далее в статье.

Пример расчета

Для примера возьмем три разных участка нефтепровода. Участок 403—432 км (участок 1) проходит через чернозем, участок 432—435 км (участок 2) — через реку, а участок 435—453 км (участок 3) — через лугово-черноземную почву [15]. Длина нефтепровода составляет 50 тыс. м; способ прокладки — траншейный (другой); отношение фактической толщины стенки трубы к расчетной — 0,7336; системы телемеханики и автоматики обеспечивают телеизмерение давления на эксплуатируемом участке. Глубина заложения трубопровода 1 м, а глубина реки составляет 22 м. Плотность населения рядом находящихся поселений равна 24 чел/км². Удельное сопротивление грунта равно 54 Ом·мс, кислотность почвы — 6,8 рН. Нефтепровод оборудован электрохимической защитой, а мониторинг деформации грунта проводится два раза в год. В качестве внутритрубного инспекционного прибора используется Ультраскан-WM.

Для группы 2 отличается участок 2, у которого отсутствуют данные по свойству грунта. Для группы 5 отличается участок 3, у которого отсутствуют данные о проведении внутритрубной диагностики. Наибольшее число вариантов (38) исследовалось по влиянию конструктивно-технологических факторов (группа 4). Были проварьированы амплитудная нагрузка от 5 до 100 %, число циклов нагружения от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^6$ в течение всего периода эксплуатации и возможности возникновения гидравлических ударов от низкой до высокой.

В результате расчетов получено: по группе факторов 1 для первого и третьего участков балл составил 1,354, а по второму — 0,8. По группе факторов 2 для всех участков балл разный: для первого составил

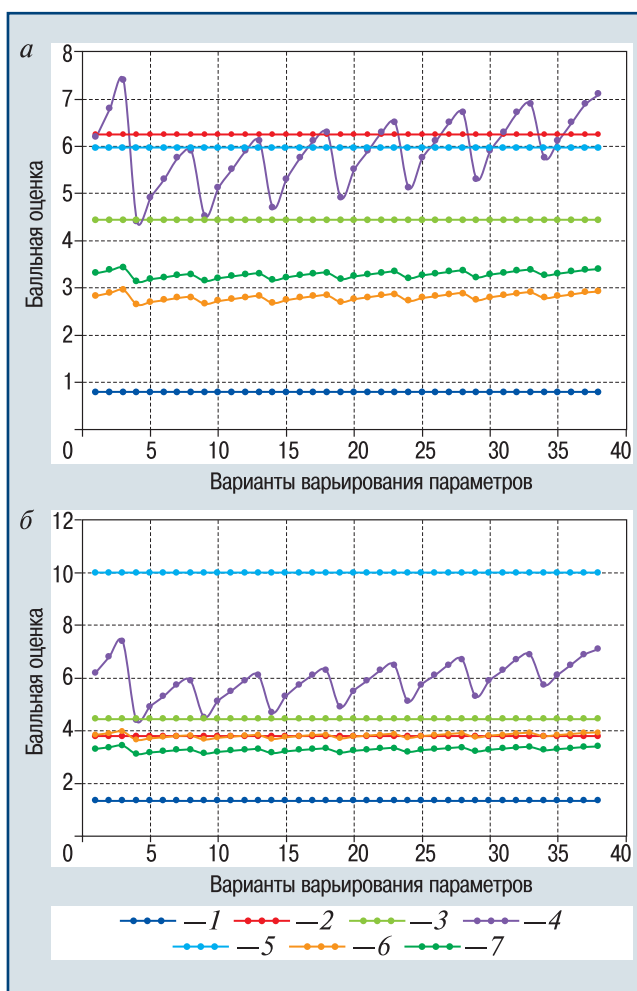
3,888; для второго — 6,25 и для третьего — 3,788. По группе 3 для всех трех участков балл составил 4,45. По группе 5 для первых двух участков балл равен 5,978, для третьего, так как данных по нему нет, равен 10. Различающиеся полученные результаты представлены на графиках (рис. 2), здесь 1 — балл по группе 1; 2 — балл по группе 2; 3 — балл по группе 3; 4 — балл по группе 4; 5 — балл по группе 5; 6 — балльная оценка данного участка; 7 — B_{cp} , средняя балльная оценка трассы нефтепровода, полученная на основе балльной оценки каждого участка трассы. Наименьшая балльная оценка по группе факторов 4 при амплитудной нагрузке, равной 5 %, и числе циклов нагружения менее $1 \cdot 10^3$ составила 4,4 балла. Наибольшая при амплитудной нагрузке, равной 100 %, и числе циклов нагружения более $1 \cdot 10^6$ составила 7,1 балла. В методике балльной оценки представлена таблица зависимости амплитудной нагрузки от числа циклов нагружения от 1 до 10 баллов соответственно. Также в ряде случаев для разных нагрузки и циклов нагружения были получены одинаковые баллы. Например, для нагрузки 5 % и при числе циклов от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4$ и для нагрузки 50 % и при числе циклов менее 10^3 получен балл 4,91. Наименьшая вероятность аварии для участка 1 составляет $2,58 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹, для участка 2 — $2,39 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹ и для участка 3 — $3,30 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹. Наибольшая вероятность аварии для участка 1 составляет $2,82 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹, для участка 2 — $2,63 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹ (рис. 3) и для участка 3 — $3,54 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹.

В таблице рассмотрено влияние возникновения гидравлических ударов на вероятность аварии. Видно, что разность между вероятностями возникновения аварии небольшая.

Программа позволяет оценить вероятность возникновения аварий для проектируемых нефтепроводов. Поэтому возьмем данные от участка 403–432 км при средней вероятности возникновения гидравлических ударов. Для групп факторов 1 и 3 баллы не отличаются и составляют 1,354 и 4,45 соответственно. По группе факторов 2 для эксплуатируемого участка балл равен 3,888, а для проектируемого — 3,775. По группе факторов 4 для эксплуатируемого участка балл равен 6,8, а для проектируемого — 5,865. Основные отличия по группе факторов 5, так как для эксплуатируемого участка имеется множество статистических данных, которых для проектируемого участка нет. Балл по группе 5 равен 5,978 и 0 соответственно. Общая балльная оценка для эксплуатируемого участка — 3,105, а для проектируемого — 2,221. Частота утечек нефти для эксплуатируемого участка составляет $2,794 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹, а для проектируемого — $1,999 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹.

Анализ полученных результатов

На основе рис. 2 можно сделать вывод, что самый безопасный участок — подводный (432–435 км), а самый опасный — 435–453 км. Подводный участок имеет самый низкий балл по группе 1, так как является участком перехода через водную преграду, для



▲ Рис. 2. График балльной оценки для участков нефтепровода 432–435 км (а), 435–453 км (б)

▲ Fig. 2. Score graph for the sections of pipeline 432–435 km (a), 435–453 km (b)



▲ Рис. 3. График вероятности возникновения аварии для участка нефтепровода 432–435 км

▲ Fig. 3. Graph of the probability of an accident initiation for 432–435 km section of the oil pipeline

которого балльная оценка определяется с учетом фактической глубины заложения трубопровода и глубины водоема. По участку 435–453 км нет данных по группе 5, поэтому оценка по данной группе — 10 баллов.

Вероятность возникновения гидравлических ударов	Балл по группе 4	Вероятность возникновения аварий, год ⁻¹		
		403–432 км	432–435 км	435–452 км
Низкая	6,2	2,74·10 ⁻⁷	2,55·10 ⁻⁷	3,46·10 ⁻⁷
Средняя	6,8	2,79·10 ⁻⁷	2,60·10 ⁻⁷	3,51·10 ⁻⁷
Высокая	7,4	2,85·10 ⁻⁷	2,66·10 ⁻⁷	3,57·10 ⁻⁷

По графикам вероятности возникновения аварии (при отсутствии данных или для проектируемых ОПО МН и МНПП среднюю балльную оценку рекомендуют принимать равной 3) видно, что они имеют похожую форму. Следовательно, амплитуда нагрузки и число циклов нагружения имеют одинаковое влияние на вероятность возникновения аварии (при $B_{cp} = 3$). Для некоторых вариантов получены одинаковые результаты, так как в методике балльной оценки представлена таблица зависимости амплитуды нагрузки от числа циклов и есть повторяющиеся баллы для разных нагрузок и числа циклов.

Рассматриваемый нефтепровод эксплуатируется более 40 лет, и балльная оценка выше средней. Поэтому целесообразно спроектировать новый участок нефтепровода.

Заключение

Разработанное программное приложение является эффективным средством для решения учебных и научно-исследовательских задач, например исследования влияния различных факторов на вероятность возникновения аварий на эксплуатируемых и проектируемых трубопроводах.

Список литературы

1. *The influence of rubber material on sealing performance of packing element in compression packer/* G. Hu, P. Zhang, G. Wang et al.// *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2017. — Vol. 38. — P. 120–138. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.12.027
2. *Effect of addition of biogas slurry for anaerobic fermentation of deer manure on biogas production/* H. Wang, J. Xu, L. Sheng, X. Liu// *Energy*. — 2018. — Vol. 38. — № 15. — P. 411–418. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.196
3. *Liu H., Cheng Y.F. Mechanism of microbially influenced corrosion of X52 pipeline steel in a wet soil containing sulfate-reduced bacteria//* *Electrochimica Acta*. — 2017. — Vol. 253. — P. 368–378. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.09.089
4. *Cunha S.B. A review of quantitative risk assessment of onshore pipelines//* *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2016. — Vol. 44. — P. 282–298. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.016
5. *Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа: рук. по безопасности*. — Сер. 08. — Вып. 42. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 204 с.
6. *Методика оценки риска при прогнозировании последствий аварий на объектах трубопроводного транспорта/* В.Н. Слепнев, А.Ф. Максименко, Е.В. Глебова, А.Т. Волохина// *Наука и технологии трубопроводного транспорта*

нефти и нефтепродуктов. — 2020. — № 6. — С. 663–673. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-6-663-673

7. *Сверчков А.М. Учет нестационарности в развитии аварийных ситуаций при количественной оценке риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефте- и продуктопроводов//* *Безопасность*

труда в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 89–96. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-89-96

8. *Сверчков А.М., Сумской С.И. Учет кавитационных явлений при моделировании течений в магистральных трубопроводах//* *Безопасность труда в промышленности*. — 2020. — № 11. — С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-7-14

9. *Об утверждении* Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов»: приказ Ростехнадзора от 17 июня 2016 г. № 228. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71328132/> (дата обращения: 29.04.2021).

10. *Det Norske Veritas (DNV)*. URL: <https://www.dnv.com/> (дата обращения: 29.04.2021).

11. *ALOHA Software*. URL: <https://www.epa.gov/cameo/alo-ha-software> (дата обращения: 29.04.2021).

12. *ТОХИ+Гидроудар*. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnoe-sredstvo-toxidroudardar> (дата обращения: 29.04.2021).

13. *Программный комплекс Русь*. URL: <https://www.aieso.ru/index.html> (дата обращения: 29.04.2021).

14. *Свидетельство № 2021617442 о государственной регистрации программы для ЭВМ*. Программное приложение для задач оценки факторов влияния состояния магистральных нефтепроводов и магистральных нефтепродуктопроводов на степень риска аварий/ В.В. Жарков, А.М. Сверчков, Т.В. Савицкая; заявл. 22.04.2021; опубл. 14.05.2021, Реестр программ для ЭВМ.

15. *Электрэнергетика*. Нефть и газ. URL: <https://energybase.ru/pipeline/kuybyshev-lisichansk> (дата обращения: 08.02.2021).

191641@muctr.ru

Материал поступил в редакцию 11 июля 2021 г.

Доработанная версия — 31 августа 2021 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2021, № 10, pp. 71–76.
DOI: 10.24000/0409-2961-2021-10-71-76

Study of the Influence of Factors of the State of Oil Trunk Pipelines on the Degree of Accident Risk

V.V. Zharkov, Candidate, 191641@muctr.ru

T.V. Savitskaya, Dr. Sci. (Eng.), Prof.

Mendelev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

A.M. Sverchikov, Lead Researcher

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

Abstract

The article examines the current state of the oil industry in Russia. The main reasons for depressurization of the main oil pipelines and oil product pipelines are analyzed, domestic and foreign methods for assessing the pipeline accidents risk are considered. Review of domestic and foreign software products is carried out allowing to assess the accidents risk.

The software application was developed for solving the problems of scoring the factors of influence of the state of the main oil pipelines and main oil product pipelines on the degree of accidents risk. The software application is based on the methodology of the same name. Five groups of factors are considered: external anthropogenic impacts, corrosion, natural influences, structural and technological factors, defects of the pipe body and welds.

In order to test the software application, the article presents a calculation for three different sections of the main oil pipeline, one of which passes through the river. The influence of various factors on the final value of the score was investigated. The largest number of options was studied in the group of constructive and technological factors. For clarity, the calculation results are presented in the form of graphs. Based on the data obtained, it is concluded that the underwater area is the safest. The analysis of the dependence of the load amplitude on the number of cycles is carried out. Repetitive scores were identified for different loads and number of cycles. It is established that the operation of a pipeline with a multiple small excess of the load poses the same risk of accident as the operation with a high amplitude of the load with a small number of cycles.

The developed software application is an efficient software product, the main purpose of which is not only to obtain the final result, but, also, to study the influence of various factors on the degree of accidents risk for operating and projected pipelines.

Key words: accident risk assessment, score assessment, hazardous production facility, main oil pipeline, main oil product pipeline, software application.

References

1. Hu G., Zhang P., Wang G., Zhang M., Li M. The influence of rubber material on sealing performance of packing element in compression packer. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 38. pp. 120–138. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.12.027
2. Wang H., Xu J., Sheng L., Liu X. Effect of addition of biogas slurry for anaerobic fermentation of deer manure on biogas production. *Energy*. 2018. Vol. 38. № 15. pp. 411–418. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.196
3. Liu H., Cheng Y.F. Mechanism of microbiologically influenced corrosion of X52 pipeline steel in a wet soil containing sulfate-reduced bacteria. *Electrochimica Acta*. 2017. Vol. 253. pp. 368–378. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.09.089

4. Cunha S.B. A review of quantitative risk assessment of on-shore pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 44. pp. 282–298. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.09.016

5. Methodology for assessing the risk of accidents at hazardous production facilities of gas trunk pipeline transport: Safety guide. Ser. 08. Iss. 42. Moscow: ZAO NTTs PB. 2019. 204 p. (In Russ.).

6. Slepnev V.N., Maksimenko A.F., Glebova E.V., Volokhina A.T. Methods of risk assessment in forecasting the consequences of accidents at pipeline transport facilities. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov = Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020. № 6. pp. 663–673. (In Russ.). DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-6-663-673

7. Sverchkov A.M. Consideration of Non-stationarity in the Development of Emergency Situations for the Quantitative Risk Assessment of Accidents at Hazardous Production Facilities of Oil and Product Pipelines. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2021. № 2. pp. 89–96. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-89-96

8. Sverchkov A.M., Sumskey S.I. Recording of the cavitation phenomena when modeling flows in the trunk pipelines. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2020. № 11. pp. 7–14. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-7-14

9. On the approval of the Safety guide «Methodological recommendations for conducting quantitative risk analysis of accidents at hazardous production facilities of the trunk oil pipelines and oil product pipelines»: Rostekhnadzor Order № 228 dated June 17, 2016. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71328132/> (accessed: April 29, 2021). (In Russ.).

10. Det Norske Veritas (DNV). Available at: <https://www.dnv.com/> (accessed: April 29, 2021).

11. ALOHA Software. Available at: <https://www.epa.gov/comeo/aloha-software> (accessed: April 29, 2021).

12. TOXI+Water-Hammer. Available at: <https://toxi.ru/produkty/programmnoe-sredstvo-toxidroudard> (accessed: April 29, 2021).

13. Rus software complex. Available at: <https://www.aieco.ru/index.html> (accessed: April 29, 2021). (In Russ.).

14. Zharkov V.V., Sverchkov A.M., Savitskaya T.V. Certificate № 2021617442 on the state registration of a computer program. Software application for the tasks of assessing the factors of influence of the state of oil trunk pipelines and oil product trunk pipelines on the degree of accidents risk. Applied: April 22, 2021. Published: May 14, 2021. Register of computer programs. (In Russ.).

15. Power engineering. Oil and gas. Available at: <https://energybase.ru/pipeline/kuybyshev-lisichansk> (accessed: February 02, 2021). (In Russ.).

*Received July 11, 2021
In final form — August 31, 2021*

