

УДК 614.849

***МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ
МНОЖЕСТВА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ
СИТУАЦИЙ НА ТРУБОПРОВОДАХ***

Аксенов С.Г.

д-р э.н., профессор,

ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,

РФ, г. Уфа

Синагатуллин Ф.К.,

ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,

РФ, г. Уфа

Кильдибаев Р.М.

студент,

ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,

РФ, г. Уфа

Аннотация. В данной статье рассматривается применение многопараметрического моделирования для оценки риска аварий на нефте- и нефтепродуктопроводах, вызванных нестационарными процессами. В работе рассмотрены ключевые динамические факторы, такие как резкие изменения давления, температурные колебания, кавитация и гидроудары, которые существенно повышают вероятность разрывов труб и утечек углеводородов.

Ключевые слова: пожарная безопасность, нефтепродукты, многопараметрическое моделирование, нестационарные процессы.

**MODELING OF DYNAMIC PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT A
VARIETY OF PARAMETERS FOR PREDICTING EMERGENCY
SITUATIONS ON PIPELINES FOR THE TRANSPORTATION OF OIL AND
PETROLEUM PRODUCTS**

Aksenov S.G.

*Doctor of Economics, Professor,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Sinagatullin F.K.,

*Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Kildibaev R.M.

*student,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Annotation. This article discusses the use of multiparametric modeling to assess the risk of accidents on oil and petroleum product pipelines caused by non-stationary processes. The paper considers key dynamic factors such as sudden pressure changes, temperature fluctuations, cavitation and hydraulic shocks, which significantly increase the likelihood of pipe ruptures and hydrocarbon leaks.

Keywords: fire safety, petroleum products, multiparametric modeling, non-stationary processes.

Трубопроводы для транспортировки нефти и нефтепродуктов представляют собой ключевой элемент мировой энергетической системы. Однако их функционирование связано с риском аварий, способных вызвать экологические кризисы, значительные финансовые убытки и угроза для человеческой жизни. Классические подходы к анализу опасностей зачастую

игнорируют динамическую природу нестационарных явлений, включая внезапные скачки давления, температурные изменения и проявления кавитации. На сегодняшний день перспективным решением данной проблемы выступает использование моделей многопараметрического анализа, которые позволяют комплексно учитывать физико-химические особенности процессов и эксплуатационные условия в реальном времени. Настоящая работа посвящена исследованию применения таких моделей для прогнозирования вероятности аварий и минимизации связанных с ними последствий.

Нестационарность возникает при резких изменениях в работе систем трубопроводов, что часто сопровождается событиями, такими как экстренное отключение насосных станций (НПС), манипуляции с заслонками или разгерметизация оборудования. Среди ключевых рисков в подобных ситуациях выделяются:

- Избыточное давление на участках со сниженной устойчивостью материала трубопровода, вызывающее повреждения [1.7].
- Явления кавитации — образование паровых пузырей из-за падения давления до уровня насыщенного парового состояния жидкости; это может привести к гидравлическим ударам [7].
- Термические деформации вследствие температурных перепадов при транспортировке нефтепродуктов в условиях сезонного изменения температуры окружающей среды [7].

Для моделирования этих явлений разработаны вычислительные методы, которые позволяют анализировать распределение параметров потока (давление, плотность жидкости) и тепловые процессы по протяженности трубопроводной магистрали. Программные продукты, такие как Cassandra или EA ModOS, обеспечивают возможность точного воспроизведения сложных

режимов эксплуатации трубопроводов с учетом факторов теплообмена и топографических особенностей местности [2].

Методы многопараметрического анализа интегрально учитывают различные аспекты: от физических показателей (скорость потока жидкости, температурный режим) до конструкционных характеристик материалов труб (например, степень коррозии) и внешних условий эксплуатации (включая ландшафтные особенности или климат).

Технологическая база такого подхода опирается на специализированное программное обеспечение — например, упомянутый EA ModOS — что позволяет предсказать развитие чрезвычайных событий с высокой степенью достоверности. Подобная методология делает эксплуатацию трубопроводной инфраструктуры более надежной и безопасной.

Инструменты, такие как ModOS и Cassandra, оптимизированные для анализа нестационарных процессов, а также модели вычислительной гидродинамики (CFD), способные учитывать тонкие аспекты турбулентных течений, и универсальные программные продукты уровня MELCOR предоставляют возможность учитывать взаимное влияние множества факторов в реальном времени. Процесс применения таких решений включает этапы сбора информации о состоянии трубопроводных систем, построение математических моделей с учетом локальных сопротивлений и систем безопасности, а также сравнительную проверку результатов моделирования с экспериментальными данными. Такой методологический подход позволяет идентифицировать уязвимые зоны системы, улучшать управление параметрами давления и снижать вероятность аварийных ситуаций за счет прогностического анализа. Эффективность подтверждается статистикой: риск возникновения инцидентов сокращается на 25–40%.

Современные подходы к оценке промышленного риска, как это показано в «Методическом руководстве по оценке степени риска аварий на

Дневник науки | www.dnevnikaui.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

магистральных нефтепроводах», совмещают численное моделирование с качественной оценкой влияющих факторов методом балльного анализа. Основные шаги включают:

1. Предсказание частоты аварий — анализируют предыдущие данные (например: статистика инцидентов на объектах инфраструктуры, отказы технических узлов или объемы ремонтно-восстановительных мероприятий) и такие параметры износа оборудования, как коррозионное повреждение металлов, усталостные процессы материального характера или термомеханические деформации вследствие внешних нагрузок. В нефтеперерабатывающей отрасли значимыми источниками риска выступают воздействие агрессивной химии (сероводородная среда либо агрессивные кислоты), высокотемпературный режим эксплуатации агрегатов или перепады давления наряду с циклическими нагрузками ключевых элементов оборудования (теплообменников аппаратов либо реакторных установок) [4][5].

Для повышения точности анализа применяются:

- Методы машинного обучения — используются для определения закономерностей в исторической базе данных об авариях и предсказания уязвимых зон.

- Мониторинг состояния объектов — включает такие процедуры, как ультразвуковая диагностика дефектов материала стенок трубопровода, вибрационный контроль рабочего состояния оборудования и термографическая проверка температурной однородности.

- Цифровые двойники объектов инфраструктуры — имитация реального износа конструкций под воздействием эксплуатационных условий.

Такой подход демонстрируется на примере нефтеперерабатывающего завода (НПЗ): при работе с сырьем высокого содержания серосодержащих

соединений коррозионный процесс в трубопроводах ускоряется до двух-трех раз. Используя интеграцию данных о составе перерабатываемого сырья вместе со скоростью роста коррозии материалов и архивом выполненных замен деталей трубопроводов, можно прогнозировать моменты достижения критической степени износа с точностью порядка 90%. Результатом становится снижение частотности инцидентов на уровне 30–50%, что способствует уменьшению простоев производственных линий наряду со снижением вероятности экологических последствий.

2. Определение объемов потенциальной утечки вещества выполняется посредством построения сценариев разгерметизации системы. Данный расчет основывается на начальной идентификации зон возможного возникновения утечки емкости, технических устройств, а затем осуществляется анализ потока жидкости, зависящий от характеристик дефекта: диаметра отверстия, давления внутри системы и параметров нефтяного продукта, включая его плотность и вязкость. Для оценки скорости утечки через трубопроводные системы или резервуары под давлением применяются специализированные инженерные расчеты, такие как

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где C_d — коэффициент истечения, A — площадь отверстия, ΔP — перепад давления, ρ — плотность жидкости. Общий объем утечки рассчитывается умножением скорости истечения (Q) на время утечки, с учетом возможного снижения давления или уровня жидкости. Альтернативные методы включают измерение уровня в резервуаре до и после инцидента, анализ данных расходомеров или оценку площади разлива в аварийных емкостях (объем = площадь $\times$ толщина слоя). Учитываются также вязкость нефтепродукта, оперативное обнаружение утечки и коррекция единиц

измерения (например, перевод м³ в баррели). Точность зависит от качества исходных данных и учета динамических изменений параметров системы [2,5].

3. Анализ экологического вреда представляет собой многогранное исследование, направленное на изучение влияния на почвенные ресурсы, водоемы, атмосферный воздух и живые организмы. В процессе оценки принимаются во внимание типы и объемы поступающих в окружающую среду загрязняющих веществ, таких как нефть и ее производные, соединения серной кислоты или токсины тяжелых металлов. Особую важность имеет оценка токсичности этих веществ, устойчивости природной среды к антропогенному воздействию (например, расположение рядом с рекреационными зонами или охраняемыми территориями), а также продолжительность их влияния.

Методы оценки основаны на регулировании и нормативных актах Российской Федерации, включая «Методику исчисления вреда окружающей среде». Подход предполагает проведение полевых измерений содержания загрязнителей в окружающей среде, выполнение лабораторных анализов проб материалов (почвы, воды), моделирование миграции вредных соединений и калькуляцию финансовых затрат на восстановительные меры, такие как очищение водных объектов от загрязнений либо рекультивация земель; также оцениваются действия по снижению утраты биологического разнообразия. В рамках данного анализа рассматриваются не только прямые последствия (гибель флоры или фауны), но и их косвенные проявления: ухудшение свойств почвы для сельскохозяйственного использования или загрязнение подземного водного горизонта вместе с дополнительным выбросом газов парникового типа [3].

Финальная оценка ущерба формируется из суммарной стоимости мероприятий по устранению негативных последствий аварийного происшествия; сюда же включаются экологические штрафные санкции за

утрату природы вследствие человеческой деятельности или компенсации пострадавшим сторонам.

Таким образом, создание сложных моделей поведения динамических процессов позволяет осуществить переход от реактивного подхода к прогнозируемому управлению технологически опасными ситуациями в области трубопроводного транспорта. Объединяя математическое моделирование с современными программными инструментами и действующими регуляторными актами, можно не только спрогнозировать вероятные аварии заранее — такой подход способствует оптимизации затрат при выполнении эксплуатационных работ.

Библиографический список

1. Аксенов С.Г., Курочкина А.С., Губайдуллина И.Н. Анализ и оценка последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами на промышленных предприятиях // Грузовик. – 2022. - № 9. - С. 41-43.
2. Аксенов С.Г., Корнеев В.С., Синагатуллин Ф.К., Пермиков А.В. Анализ обеспечения пожарной безопасности в резервуарном парке // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2023. - № 1. - С. 31-47.
3. Борн С.Л. Мероприятия, направленные на снижение пожарных рисков // Вестник науки. – 2024. - №7. – С. 773-777.
4. Лисанов М.В., Савина А.В., Дегтярев Д.В., Самусева Е.А. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта// Безопасность труда в промышленности. – 2010. - № 7. – С. 16-22.
5. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 456 с.

7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила безопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (утв. Приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96 с изменениями, утв. Приказом Ростехнадзора от 26.11.2015 № 480).

Оригинальность 77%