

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Днекешев А.А., Кушников О.В., Кушников В.А.

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия
dnekeshev1991@gmail.com, oksuch9@gmail.com, kushnikoff@yandex.ru

Резчиков А.Ф.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
rw4cy@mail.ru

Аннотация. В статье разработаны математические модели и методы, позволяющие осуществить управление нефтеперерабатывающим предприятием по критерию безопасности функционирования. Определены релевантные характеристики объекта управления непосредственно влияющие на критерий эффективности так как между этими характеристиками существует большое количество преимущественно нелинейных обратных связей, то модель объекта строится с использованием системно-динамического подхода. Разработана математическая модель в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, внутренние функции которой определены в основном с использованием аппарата регрессионного анализа, а также нейронных сетей. Разработан алгоритм коррекции математической модели, что позволило значительно уменьшить погрешность вычислений за счет снижения величины интервала прогнозирования. Разработанное математическое обеспечение может быть использовано при модернизации нефтеперерабатывающих предприятий.

Ключевые слова: промышленная безопасность, системная динамика, нефтеперерабатывающий завод, поддержка принятия решений, программный комплекс.

Введение

Нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) представляют собой сложные промышленные объекты, функционирование которых связано с высокой степенью опасности. На этих предприятиях обрабатывается большое количество химически опасных веществ, таких как нефть, бензин, дизельное топливо и различные нефтепродукты, что делает процессы на НПЗ потенциально рискованными для здоровья людей, окружающей среды и экономики в случае возникновения аварийных ситуаций. Повышение уровня автоматизации и усложнение технологических процессов требуют надежных средств мониторинга, диагностики и оперативного реагирования для обеспечения промышленной безопасности.

Основными рисками на НПЗ являются пожары, взрывы, утечки токсичных и горючих веществ, которые могут привести к значительным человеческим жертвам, экологическим катастрофам и крупным экономическим потерям. Системы традиционного мониторинга и управления безопасностью на предприятиях не всегда способны своевременно идентифицировать угрозу и эффективно управлять аварийной ситуацией в динамично изменяющихся условиях.

В связи с этим появляется необходимость разработки современных методов и инструментов, таких как цифровой двойник [1]. Цифровой двойник позволяет в режиме реального времени анализировать текущее состояние технологических процессов и прогнозировать развитие событий, оперативно принимать решения по предупреждению аварийных ситуаций и минимизации их последствий. Это обеспечивает существенное повышение надежности и эффективности систем промышленной безопасности [2-8].

Технологическая основа современных цифровых двойников строится на интеграции системно-динамических моделей с методами машинного обучения и интеллектуального анализа данных. Такой подход позволяет учитывать сложные нелинейные взаимосвязи между параметрами производства и внешними факторами, а также оперативно корректировать модель по мере поступления новых данных. Благодаря этому достигается высокая точность прогнозов и возможность адаптации системы к изменяющимся условиям эксплуатации [2-8].

Применение цифрового двойника открывает новые возможности в области поддержки принятия решений и подготовки персонала. Виртуальное моделирование аварийных процессов позволяет отрабатывать сценарии реагирования и оценивать их эффективность ещё до возникновения реальных событий. Одновременно с этим создаются предпосылки для использования обучающих тренажеров, что повышает квалификацию инженерно-технических работников и снижает вероятность ошибок при управлении производственными процессами [2-8].

1. Постановка задачи

Разработать программное обеспечение с элементами обучения, предназначенное для мониторинга и анализа динамики параметров, возникающих при аварийных выбросах химически опасных веществ на нефтеперерабатывающем предприятии. Система должна базироваться на модели системной динамики [9-12] и обеспечивать интеграцию существующих математических зависимостей между ключевыми показателями. В рамках работы приложения требуется реализовать функционал для оперативного расчёта и визуализации изменения параметров аварийной ситуации, прогнозирования последствий, выдачи рекомендаций по управлению и включения специализированных обучающих модулей для подготовки и повышения квалификации технического персонала. Реализация задачи предусматривает создание удобного web-интерфейса для ввода исходных данных, автоматизированного построения сценариев развития аварий и представления результатов анализа в форме наглядных графических отчётов для использования операторским и инженерно-техническим составом.

2. Математическая модель

Математическая модель, представленная в данной работе, была разработана автором в рамках предыдущих исследований [11, 12] и легла в основу создаваемого программного обеспечения для прогнозирования и анализа последствий аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях. Она построена на принципах системной динамики и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику ключевых показателей промышленной безопасности во времени.

В модели учитываются два типа переменных:

- входные параметры изображенные на рис. 1, характеризующие текущее состояние объекта и производственных процессов (интенсивность выбросов химически опасных веществ, техническое состояние оборудования, эффективность систем оповещения и реагирования, уровень обеспеченности силами и средствами);

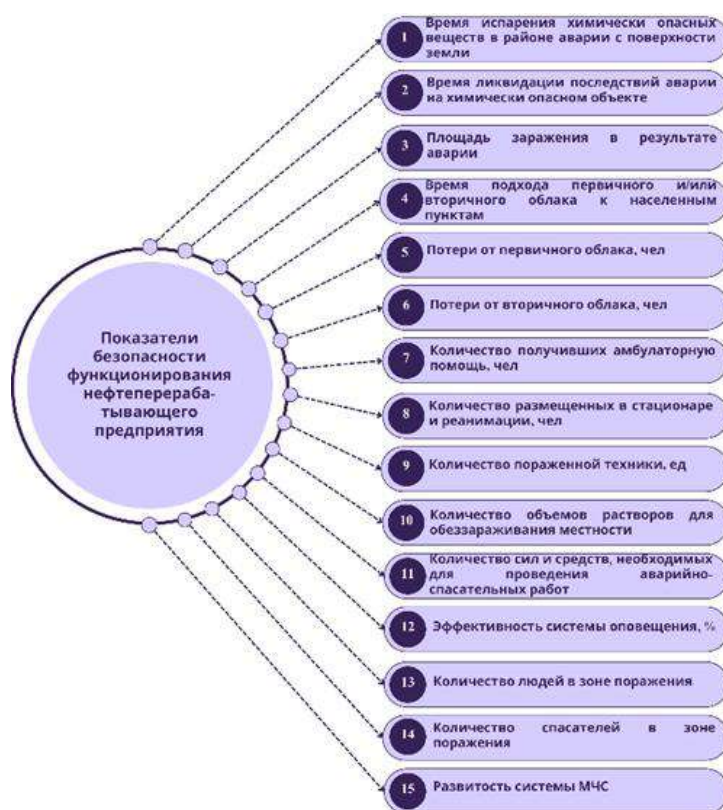


Рис. 1. Входные параметры, характеризующие текущее состояние объекта производственных процессов нефтеперерабатывающего предприятия

- внешние факторы изображенные на рис. 2, влияющие на развитие и масштаб последствий аварий (метеорологические условия – скорость и направление ветра, температура, атмосферное давление, а также готовность и оперативность внешних служб реагирования).



Рис. 2. Внешние факторы влияющие на развитие и масштаб последствий аварий

Функциональные зависимости между переменными были установлены на основе регрессионного анализа и аппроксимированы полиномами первой и второй степени, что позволило отразить нелинейные взаимодействия между параметрами и сохранить их физическую интерпретируемость. Коэффициенты этих зависимостей определялись методом наименьших квадратов на основе статистических данных и экспертных оценок.

Для численного решения системы использовался метод Рунге–Кутты четвертого порядка, обеспечивающий устойчивость и высокую точность расчетов. Начальные условия формировались исходя из фактических характеристик рассматриваемого объекта.

Для практического применения разработанной модели была создана специализированная программная система, реализующая соответствующие методы вычислений и анализа. Программное обеспечение автоматизирует ввод данных, учитывает влияние внешних факторов, выполняет расчет динамики показателей и визуализирует результаты. Интеграция модели в программную среду обеспечивает оперативность расчетов, возможность работы в режиме, близком к реальному времени, и поддержку принятия решений инженерно-техническим персоналом и службами промышленной безопасности.

3. Структура программного комплекса

Программный комплекс был создан для реализации разработанной математической модели и автоматизации вычислений, необходимых для анализа и прогнозирования последствий аварийных ситуаций. При его разработке использовались современные технологии: для реализации расчетной логики применялся язык программирования Java, обеспечивающий высокую производительность и надежность вычислений, а для создания веб-интерфейса – стандартные технологии HTML, CSS и JavaScript, что позволило обеспечить удобный и интуитивно понятный доступ к функционалу системы через браузер.

Программа выполняет автоматизированный ввод исходных данных, включает средства для задания начальных и минимальных значений параметров, коэффициентов внешних возмущений и функциональных зависимостей изображенных на рис. 3. На основе этих данных производится расчет динамики ключевых показателей безопасности с использованием встроенной математической модели.

Рис. 3. Интерфейс ввода данных

Результаты работы программы отображаются в виде наглядных диаграмм и графиков изображённых на рис. 4, которые позволяют анализировать состояние системы в различные моменты времени, выявлять критические отклонения и прогнозировать развитие аварийных ситуаций. Программный комплекс ориентирован на поддержку инженерно-технического персонала и специалистов по промышленной безопасности, обеспечивая их инструментом для анализа и оперативного принятия решений.

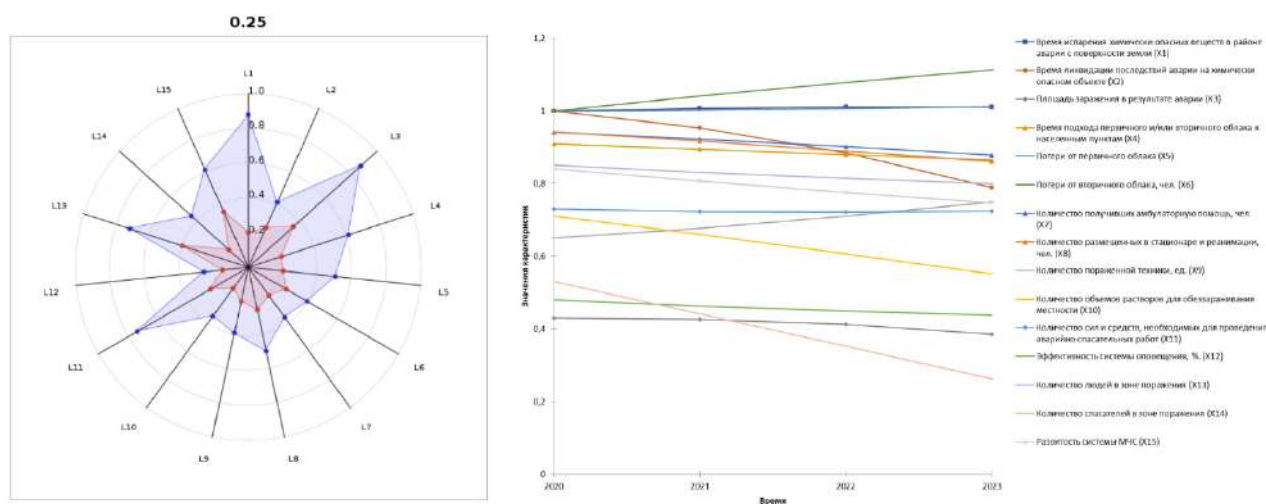


Рис. 4. Результаты моделирования

4. Результаты вычислительного эксперимента

В результате вычислительного эксперимента с использованием программного комплекса цифрового двойника нефтеперерабатывающего предприятия было выявлено, что при моменте времени $t=0,25$ распределение ключевых параметров промышленной безопасности характеризуется значительной неравномерностью, что отражено в виде полярной диаграммы на рис. 4. Установлено, что отдельные переменные оказывают различное влияние на интегральный критерий функционирования системы, что позволяет идентифицировать потенциальные отклонения в динамике аварийных процессов на ранних этапах моделирования.

Дополнительно на рис. 4 представлены результаты прогнозирования значений основных переменных за период 2020–2023 гг. Сравнительный анализ расчетных и статистических данных показал высокую степень соответствия модели фактической динамике исследуемых процессов. Совпадение тенденций временных рядов и близость прогнозных значений к эмпирическим данным подтверждают адекватность построенной модели и корректность используемых методов, что

обеспечивает достоверность прогнозных оценок и практическую применимость разработанного программного комплекса для задач управления промышленной безопасностью.

5. Заключение

В ходе работы был реализован программный комплекс, основанный на ранее разработанной математической модели, предназначенной для анализа и прогнозирования последствий аварийных выбросов химически опасных веществ на нефтеперерабатывающих предприятиях. Интеграция готовой модели в программную среду позволила автоматизировать вычислительные процедуры, обеспечить удобный ввод данных и представить результаты в наглядной форме.

Использование веб-интерфейса сделало систему доступной и интуитивно понятной для инженерно-технического персонала и специалистов по промышленной безопасности. Программный комплекс позволяет оперативно оценивать динамику параметров аварийной ситуации, учитывать влияние внешних факторов и поддерживать принятие решений в условиях ограниченного времени.

Особое внимание в работе уделено проведению вычислительного эксперимента, результаты которого подтвердили корректность построенной модели и её прикладную ценность. Анализ полярной диаграммы в момент времени $t = 0,25$ выявил различную степень влияния отдельных переменных на интегральный показатель промышленной безопасности, что даёт возможность более точно определять критические направления воздействия. Сопоставление прогнозных данных с фактическими временными рядами за 2020–2023 гг. показало согласованность тенденций и минимальные расхождения значений, что свидетельствует о высокой точности и адекватности модели. Таким образом, экспериментальная проверка подтвердила достоверность прогнозных расчётов и возможность их практического применения в условиях реального производства.

Итогом проведённого исследования является создание инструмента, обладающего высокой практической значимостью для задач мониторинга и повышения промышленной безопасности. Его применение способствует снижению рисков аварийных ситуаций, повышению эффективности управления и улучшению качества подготовки персонала за счёт возможности проведения анализа сценариев, отработки управленческих решений и обучающих симуляций.

Литература

1. *Разумовский А.И.* Цифровые двойники в контексте индустрии 5.0 // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024): Труды Семнадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1044-1049.
2. *Liao Qi, Liu Chunying, Du Jian, et al.* Application and prospect of artificial intelligence in empowering the operation and management of oil and gas pipelines // *Oil & Gas Storage and Transportation*. – 2024. – Vol. 43, № 6. – P. 601-613.
3. *Sharma P., Hamedifar H., Brown A., Green R.* The dawn of the new age of the industrial internet and how it can radically transform the offshore oil and gas industry // *Offshore Technology Conference: Proc. of the Conf.* – Houston, USA, May 2017.
4. *Junya Q., Li Z., Yang Z., Hou P., Wang Z., Li F., Xu H., Kang H., Shang F.* Research and enlightenment on decision management mechanism of risk exploration projects of international oil companies // *China Petroleum Exploration*. – 2025. – Vol. 30, № 3. – P. 36–46.
5. *Wishnow D., Azar H.R., Rad M.P.* A deep dive into disruptive technologies in the oil and gas industry // *Offshore Technology Conference Brasil 2019 (OTCB 2019): Proc. of the Conf.* – Rio de Janeiro, 29–31 October 2019.
6. *Dedousis P., Stergiopoulos G., Arampatzis G., Gritzalis D.* Enhancing operational resilience of critical infrastructure processes through chaos engineering // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 106172–106189.
7. *Daher E.* Top 8 digital safety trends in oil and gas in 2023 // *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition: Proc. of the Conf.* – Jakarta, Indonesia, October 2023.
8. *Cui Y., Li Y., Li W., Huang Y., Wei B.* Research progress and prospect of the application of digital twins in oil and gas field ground systems // *Huagong Jinzhan / Chemical Industry and Engineering Progress*. – 2025. – Vol. 44, № 3. – P. 1194–1205.
9. *Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Кушелева Е.В., Кушникова Е.В.* Моделирование последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу на основе аппарата системной динамики // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2019. – №3 (177). – С. 40–47.
10. *Дурнев Р.А., Котосонова А.С., Галиуллина Р.Л.* Результаты системно-динамического моделирования процесса информирования населения при химической аварии // *Проблемы анализа риска*. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 46–52.
11. *Днекешев А.А., Резчиков А.Ф., Степановская И.А., Кушников В.А., Кушникова Е.В.* Модель и методы поддержки принятия решений для анализа последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ

- на нефтеперерабатывающем предприятии // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): Труды Шестнадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2023. – С. 474-480.
12. *Днекешев А.А., Кушиников В.А., Богомолов А.С. Резчиков А.Ф.* Системно-динамическая модель для анализа и прогнозирования аварийных ситуаций нефтеперерабатывающих предприятий // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024): Труды Семнадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1174-1182.