

## Тематический выпуск<sup>1</sup>

© 2026 г. А.Ф. РЕЗЧИКОВ, чл.-корр. РАН (rw4cy@mail.ru),

О.И. ДРАНКО, д-р техн. наук (olegdranko@gmail.com)

(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва),

О.В. КУШНИКОВ (kushnikoff@iptmuran.ru)

(ФИЦ «Саратовский научный центр РАН»),

А.С. БОГОМОЛОВ, д-р техн. наук (alexbogomolov@ya.ru)

(ФИЦ «Саратовский научный центр РАН»;

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»),

А.А. ДНЕКЕШЕВ (dnekeshev1991@gmail.com)

(ФИЦ «Саратовский научный центр РАН»),

И.А. СТЕПАНОВСКАЯ, канд. техн. наук (irstepan@ipu.ru)

(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

### МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛИКВИДАЦИЕЙ ПОСЛЕДСТВИЙ КРИТИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Статья посвящена разработке и применению системно-динамических моделей для управления процессом ликвидации аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях. Разработан комплекс гетерогенных моделей системной динамики, позволяющий осуществить управление предприятием по критерию, минимизирующему отклонение релевантных индикаторов безопасного функционирования от рекомендованных лицом принимающим решения (ЛПР) значений. Приведена постановка задачи управления процессом ликвидации аварийных ситуаций, представлена комплексная методология, включающая построение графов причинно-следственных связей, регрессионный анализ функциональных зависимостей, численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений, а также процедура коррекции системно-динамической модели. Комплекс моделей позволяет учитывать ключевые показатели безопасности, внешние факторы и нелинейные эффекты, обеспечивая высокую точность прогнозирования и анализа рисков. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем управления процессом ликвидации последствий аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях страны, а также в тренажерных системах объектового звена МЧС.

*Ключевые слова:* нефтеперерабатывающие, химические предприятия, системная динамика, системы управления, химически опасные вещества, критические ситуации, нелинейные дифференциальные уравнения, тренажерные системы.

DOI: 10.7868/S2413977726050015

<sup>1</sup> Статьи с 3 по 67 стр. являются окончанием тематического выпуска № 4, 2026.

## 1. Введение

В настоящее время в связи с развитием новых технологий и усложнением производственных процессов вопросы повышения безопасности функционирования нефтеперерабатывающих предприятий становятся одной из приоритетных задач. Аварии на таких предприятиях могут привести к серьезным последствиям для здоровья людей, окружающей среды и экономики, что делает вопросы повышения уровня промышленной безопасности нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) весьма актуальными (см. рис. 1).

Промышленная безопасность на нефтеперерабатывающих предприятиях – важнейший аспект, определяющий устойчивость производства, предотвращение аварий и снижение экономических и экологических последствий возможных инцидентов. В последние десятилетия различные исследователи изучают методы оценки и управления рисками на таких предприятиях, применяя как традиционные статистические методы, так и современные подходы, включающие машинное обучение и интеллектуальный анализ данных. Анализ существующей литературы позволяет выделить несколько основных направлений исследований в области безопасности нефтеперерабатывающих предприятий, включая количественную оценку рисков, моделирование аварийных ситуаций, прогнозирование отказов оборудования и анализ исторических данных об авариях.

Одним из эффективных методов оценки рисков является анализ дерева отказов (Fault Tree Analysis, FTA), который используется для изучения возможных сценариев отказов оборудования и их последствий. В [2] рассматривается применение метода нечеткого анализа дерева отказов (Fuzzy Fault Tree Analysis, FFTA) для оценки рисков возникновения пожаров и взрывов в резервуарах для хранения нефти. Авторы отмечают, что традиционные методы количественного анализа рисков предполагают наличие точных данных о вероятности отказов различных элементов системы, однако на практике такие данные могут быть неполными или неточными из-за недостаточной



Рис. 1. Состояние Ачинского НПЗ после пожара [1].

статистической информации. В данной работе предложена комбинированная методика, сочетающая традиционный анализ дерева отказов с теорией нечетких множеств, что позволяет учитывать неопределенности при оценке вероятности аварий.

Исторический анализ аварий также играет важную роль в разработке методов предотвращения инцидентов. В [3] проведен детальный анализ 44 аварий на НПЗ в Скикде (Алжир) за период с 2002 по 2013 гг. Авторы рассмотрели различные инциденты, включая пожары, взрывы и утечки токсичных веществ, и выявили ключевые факторы, способствующие возникновению аварий. На основе анализа данных было установлено, что значительная часть аварий была вызвана отказами оборудования, обусловленными устаревшей инфраструктурой и недостаточным техническим обслуживанием.

Другим важным аспектом обеспечения безопасности на нефтехимических предприятиях является анализ рисков пожаров и взрывов. В [4] рассматриваются методы оценки и моделирования рисков, связанных с пожарами и взрывами на нефтехимических объектах. В исследовании используется комплексный подход, включающий методику HAZID для идентификации опасностей, индекс пожарной и взрывной опасности Dow's Fire & Explosion Index (DOW's F&EI) для количественной оценки рисков, а также программное моделирование аварийных ситуаций с применением Process Hazard Analysis Software Tool (PHASt).

Прогнозирование отказов оборудования является еще одним важным направлением исследований в области промышленной безопасности. В [5] предложена методология прогнозирования отказов трубопроводов на основе методов машинного обучения. Авторы используют три модели – многослойную перцептронную нейронную сеть (MLP), радиально-базисную функцию нейронной сети (RBF) и мультиномиальную логистическую регрессию (MNL) – для анализа исторических данных о повреждениях трубопроводов.

Современные технологии обработки текстовой информации также находят применение в области промышленной безопасности. В [6] предложена система автоматизированного анализа рисков НПЗ на основе обработки естественного языка (NLP) и модели Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT).

Управление надежностью оборудования и планирование технического обслуживания также играют важную роль в обеспечении промышленной безопасности. В [7] представлена методология Risk-Based Inspection and Maintenance (RBI&M), включающая шесть этапов: идентификацию области применения, функциональный анализ, оценку риска, его количественное выражение, планирование мероприятий и реализацию работ.

Особое внимание уделяется изучению эффекта домино – эскалации аварийных ситуаций из-за первичного происшествия. В [8] проведен детальный анализ методов оценки домино-эффекта на промышленных объектах за последние 30 лет.

Таким образом, современные исследования в области промышленной безопасности демонстрируют широкий спектр методов оценки и управления рисками, от классических вероятностных моделей до интеллектуального анализа данных. Комплексное применение этих подходов позволяет значительно повысить безопасность нефтеперерабатывающих предприятий, снижая вероятность возникновения аварийных ситуаций и уменьшая их последствия.

Многие исследователи и инженеры занимаются созданием инновационных решений для снижения рисков и повышения надежности производственных процессов. Разработанные системы и методы, включая контрольные и диагностические средства, проходят тщательную проверку и демонстрируют высокую эффективность на практике.

Тем не менее, несмотря на многолетние исследования и достигнутые результаты, существующие модели и методы не всегда позволяют учитывать сложную систему взаимосвязей между внутренними и внешними факторами, влияющими на безопасность процессов, что может негативно сказываться на их надежности. Данное обстоятельство делает целесообразным применение математического аппарата системной динамики для повышения безопасности функционирования нефтеперерабатывающих предприятий.

Системная динамика представляет собой метод компьютерного моделирования и анализа сложных систем, позволяющий изучать их поведение во времени под воздействием различных факторов. Этот подход основан на использовании дифференциальных уравнений и обратных связей, чтобы описать взаимосвязи между элементами системы.

Исторически системная динамика была разработана Дж. Форрестером и его коллегами в середине XX в. для анализа промышленных и социальных систем [9].

В настоящее время она применяется в разнообразных областях, включая производство, управление аварийными ситуациями, здравоохранение, анализ природных катастроф и многое другое. В производстве она используется для оптимизации процессов, повышения эффективности работы оборудования и управления ресурсами, что позволяет минимизировать издержки и прогнозировать возможные сбои.

В области управления аварийными ситуациями системная динамика помогает моделировать развитие событий, оценивать последствия техногенных катастроф и разрабатывать эффективные планы реагирования, что существенно повышает уровень безопасности. В здравоохранении она находит применение в диагностике, планировании лечения и управлении ресурсами, а также в борьбе с эпидемиями, где модели прогнозируют распространение инфекций и оценивают эффективность профилактических мер.

Кроме того, системная динамика активно используется для анализа и управления последствиями стихийных бедствий, таких как наводнения, позволяя разрабатывать стратегии минимизации ущерба и восстановления инфраструктуры. Этот подход незаменим в ситуациях, где необходимо учиты-

вать множество взаимосвязанных факторов и прогнозировать развитие сложных систем.

Как показано в [10], данный подход позволяет учитывать нелинейные взаимодействия, обратные связи и временные задержки, которые характерны для промышленных систем. Авторы провели анализ 63 исследований, в которых системная динамика применялась для оценки внешних факторов, организационных воздействий и внутренних причин аварий.

В случае с нефтеперерабатывающей отраслью классическим примером является анализ аварии в Бхопале, где системная динамика использовалась для построения моделей, описывающих влияние человеческого фактора, технических неисправностей и организационных решений на безопасность функционирования химического предприятия Union Carbide [11]. В работе рассматривались причинно-следственные связи между ключевыми переменными, влияющими на безопасность функционирования, такими как отказ оборудования, ошибки оператора и недостаточное техническое обслуживание.

В [12] подчеркиваются основные недостатки традиционных методов, включая их ограниченность в моделировании нелинейных процессов и временных задержек. Авторы анализируют применение системной динамики в контексте анализа рисков для нефтеперерабатывающей отрасли. Они также выделяют необходимость интеграции этой методологии в процесс принятия решений, что позволяет лучше прогнозировать аварийные ситуации и повышать устойчивость к критическим ситуациям в процессе функционирования нефтеперерабатывающего предприятия. В данном исследовании представлена модель действий населения при аварии на химически опасном объекте с учетом уровня информированности персонала предприятия.

В [13] представлена системно-динамическая модель, используемая в системе управления процессами информирования населения в условиях чрезвычайных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях. Авторы разработали потоко-уровневую модель, которая анализирует влияние частоты рассылки сообщений и качества информации на поведение людей при химических авариях.

Данная статья посвящена разработке новых системно-динамических моделей, предназначенных для использования при управлении процессом ликвидации аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях. Эти модели позволяют комплексно оценивать возможные факторы риска, которые могут привести к нарушению нормального хода технологических процессов, своевременно предпринимать необходимые меры для предотвращения аварийных ситуаций и уменьшить ущерб от их возникновения.

## 2. Постановка задачи

Разработать математические модели и методы для управления процессом ликвидации аварийных ситуаций нефтеперерабатывающего предприятия по критерию эффективности, позволяющему на временном интервале  $t \in [t_0; t_N]$

определить управляющие воздействия в виде плана мероприятий  $p(t) \in P$  и минимизировать при допустимых значениях возмущений среды  $\mathbf{R}(t) \in \mathbf{R}$  целевую функцию

$$(1) \quad Z(p(t)) = \int_{t_0}^{t_N} \sum_{i=1}^n (K_i^* - K_i(t, \mathbf{R}(t), p(t)))^2 \gamma_i dt \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$(2) \quad \frac{dK_i(t, \mathbf{R}(t), p(t))}{dt} = f_i(t, K_1(t), \dots, K_n(t), \mathbf{R}(t), p(t)), \quad i = \overline{1, n},$$

$$K_i(t_0) = K_{i0}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$t > 0, \quad K_i > 0, \quad i = \overline{1, n},$$

$$(3) \quad K_i^{\min} \leq K_i(t, p(t)) \leq K_i^{\max}, \quad i = \overline{1, n}$$

и граничных условиях:

$$F_i^{t_0}(K, K', p) = 0, \quad F_j^{t_N}(K, K', p) = 0, \quad i = \overline{1, k_1}, \quad j = \overline{1, k_2}$$

( $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, n}$  и  $K_i^*$  – релевантные показатели эффективности ликвидации критической ситуации и их рекомендованные ЛПР значения соответственно;  $\gamma_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го показателя;  $K_i^{\min}$ ,  $K_i^{\max}$  – минимальное и максимальное значения показателя эффективности ликвидации аварийной ситуации).

Разработать математические модели и алгоритмы для прогнозирования на временном интервале  $[t_0; t_N]$  изменений релевантных показателей эффективности ликвидации аварийной ситуации  $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, n}$  с целью определения таких моментов времени  $t_j \in [t_0; t_N]$ ,  $j = \overline{1, m}$ , когда они выходят за пределы рекомендованных ЛПР значений  $K_i^*$ .

### 3. Математическая модель

Для решения задачи (1)–(3) целесообразным является использование системно-динамического подхода и метода системной динамики [5, 9, 12, 13, 16–19]. В рамках этого подхода разработан комплекс взаимосвязанных математических моделей, построение которых предусматривает выполнение следующих этапов:

1. Выбор входных переменных модели, влияющих на безопасность работы нефтеперерабатывающих и химических предприятий согласно [14, 15].

2. Разработка графа причинно-следственных связей между переменными системы и внешними воздействиями.

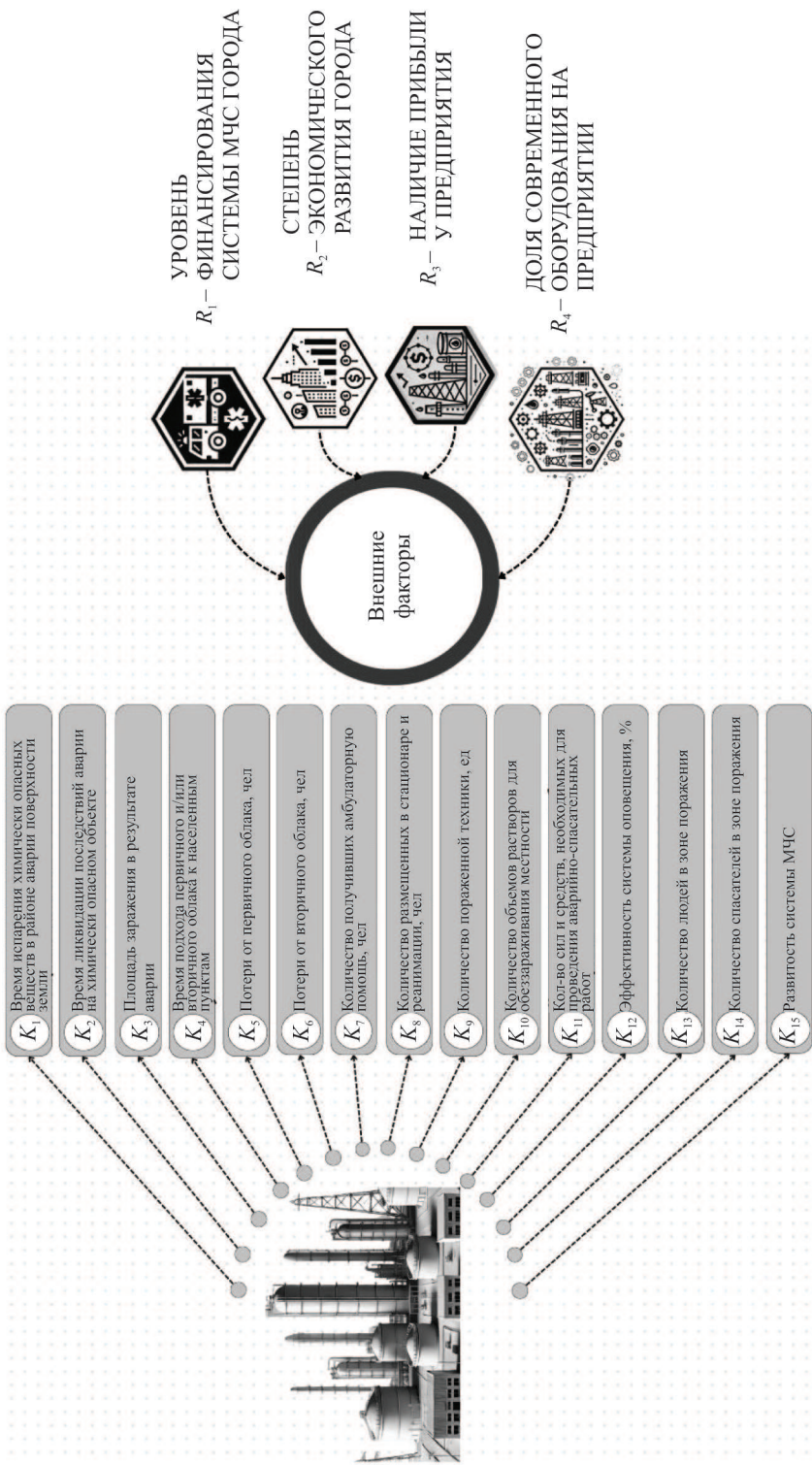


Рис. 2. Входные переменные модели.

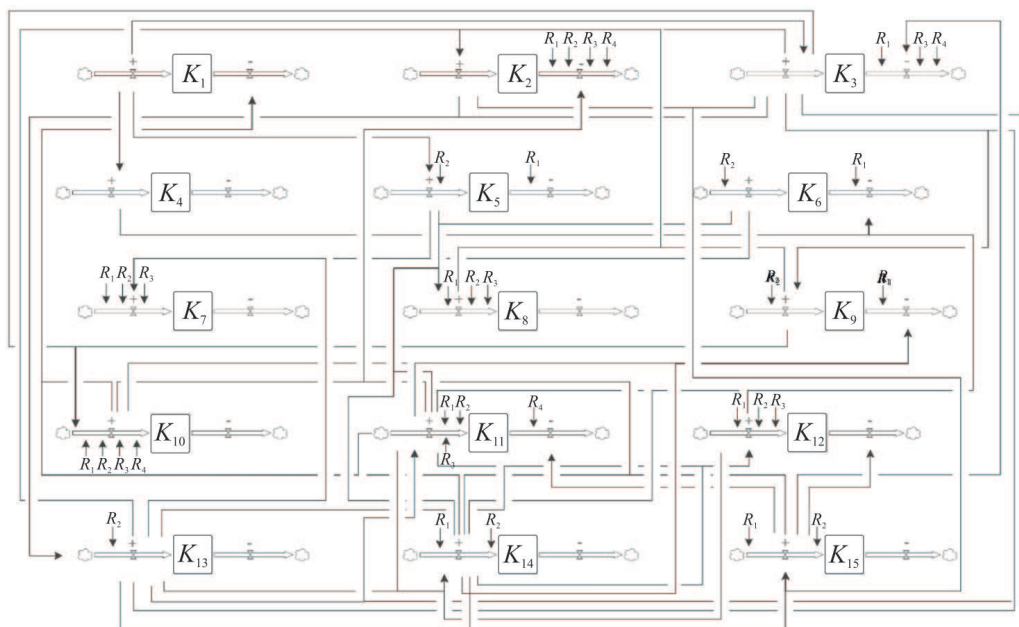


Рис. 3. Граф причинно-следственных связей.

3. Построение системы уравнений системной динамики в общем виде, решение которой позволит прогнозировать значение переменных, связанных с безопасностью функционирования нефтеперерабатывающего предприятия на различных временных интервалах.

4. Определение функциональных зависимостей между переменными модели с помощью аппарата регрессионного анализа.

5. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений численным методом.

6. При необходимости коррекция математической модели для достижения требуемой точности вычислений.

**Выбор входных переменных.** Оценка безопасности работы нефтеперерабатывающих и химических предприятий определяется в соответствии с требованиями федерального закона «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [14] и ГОСТ Р 22.1.10-2002 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг химически опасных объектов» [15].

**Граф причинно-следственных связей между переменными системы и внешними воздействиями.** Граф причинно-следственных связей построен по методике, разработанной в [16–21, 25] (см. рис. 3).

**Построение системы уравнений системной динамики в общем виде.** Ниже приведена часть системы дифференциальных уравнений (4), описывающих изменение переменных  $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, n}$  во времени с учетом существующих



сложных системах. Кроме того, такие полиномы могут быть хорошо интерпретированы с точки зрения физического смысла, что делает их удобным инструментом для анализа и представления результатов.

**Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений.** Решается система (5), полученная после подстановки в (4) зависимостей  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$ , определенных на предыдущем этапе разработки модели

$$(5) \left\{ \begin{array}{l} \frac{dK_1(t)}{dt} = -(0,14K_{10}^2 - 0,86K_{10} + 1,54)(0,6K_{11}^5 - 1,64K_{11} + 1,87) \times \\ \quad \times (0,03K_{14}^2 - 0,03K_{14} + 0,92), \\ \frac{dK_2(t)}{dt} = (-0,53K_3^2 + 0,34K_3 + 0,75)(-5,75K_7^2 + 3,98K_7 + 2,36) \times \\ \quad \times (-7,87K_8^2 + 8K_{14} + 0,45)(-3,17K_9^2 + 5,01K_9 - 1,2) \times \\ \quad \times (-14,03K_{13}^2 + 25,61K_{13} - 10,89)(-4,77K_{10}^2 - 9,69K_{10} - 5,5) \times \\ \quad \times (6,47K_{11}^2 - 12,68K_{11} + 6,81)(-0,41K_{14}^2 + 0,47K_{14} + 0,64) \times \\ \quad \times (13,28K_{15}^2 - 27,1K_{15} + 14,41)(0,1R_1(t) + 2) \times \\ \quad \times (0,2R_2(t) + 2,5)(2 \sin R_3(t) + \varphi)(4R_4(t) + 4), \\ \frac{dK_3(t)}{dt} = (18,06K_1^2 - 35,01K_1 + 17,45)(22,81K_{15}^2 - 39,91K_{15} + 17,94) \times \\ \quad \times (0,1R_1(t) + 2) + (2 \sin R_3(t) + \varphi) + (4R_4(t) + 4) \\ \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \frac{dK_{13}(t)}{dt} = (-1,34K_2^2 + 2,13K_2 + 0,07)(-0,02K_3^2 - 0,06K_3 + 0,94) \times \\ \quad \times (0,2R_2(t) + 2,5), \\ \frac{dK_{14}(t)}{dt} = (-12,24K_{11}^2 + 21,08K_{11} - 8,38)(-3,5K_{12}^2 + 5,21K_{12} - 1,23) \times \\ \quad \times (3,21K_{13}^2 - 5,21K_{13} + 2,67)(0,1R_1(t) + 2)(0,2R_2(t) + 2,5), \\ \frac{dK_{15}(t)}{dt} = (0,67K_2^2 - 1,42K_2 + 1,6)(0,41K_3^2 - 0,4K_3 + 1) \times \\ \quad \times (5,63K_{13}^2 - 10,37K_{13} + 5,67) \times \\ \quad \times (0,03K_{14}^2 - 0,05K_{14} + 0,93)(0,1R_1(t) + 2)(0,2R_2(t) + 2,5). \end{array} \right.$$

Начальные условия, использованные для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Начальные условия

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{14}$	$K_{15}$
1	1	0,43	0,91	1	1	0,94	0,94	0,65	0,71	0,73	0,48	0,85	0,53	0,84

На рис. 4 приведен график нормированных переменных модели  $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, n}$ , полученный в результате решения системы (5).

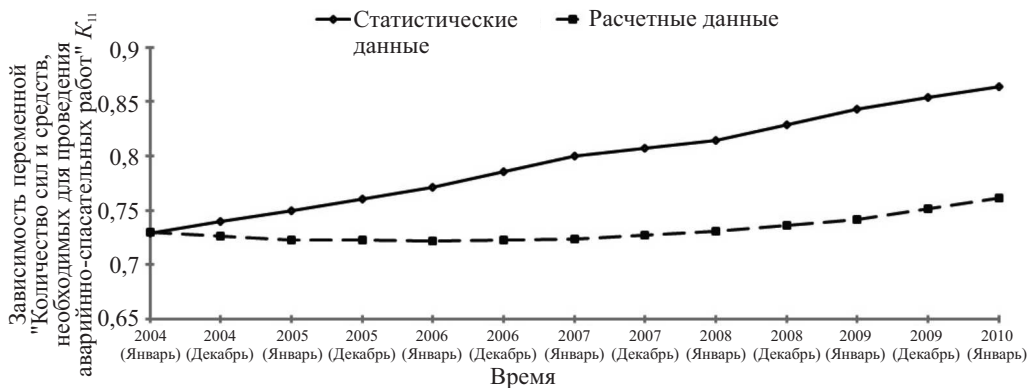


Рис. 5. Сравнение статистических и расчетных данных для характеристики  $K_{11}(t)$ .

Для оценки погрешности модели на рис. 5 приведено сравнение расчетных данных, характеризующих изменение нормированной переменной  $K_{11}(t)$  на интервале машинного времени  $[0; 1, 2]$ , со статистическими данными, полученными из анализа материалов расследования причин взрыва на нефтеперерабатывающем заводе в Техас-Сити [26]. Из рис. 5 следует, что максимальное отклонение  $K_{11}(t)$  от статистических данных составляет 11,98%.

#### 4. Коррекция модели системной динамики

Необходимость периодической коррекции модели системной динамики объясняется следующими соображениями.

Современные нефтеперерабатывающие и химические предприятия являются сложными крупномасштабными системами большой размерности, процесс функционирования которых зависит от многих сотен и тысяч параметров, многие из которых носят качественный характер.

Разработка полной математической модели, характеризующей эффективность функционирования НПЗ или химического предприятия, едва ли возможна из-за высокой размерности решаемой задачи. Кроме того, такая модель будет иметь невысокую точность из-за систематического накопления погрешностей определения всех ее многочисленных входных переменных, и величина погрешности моделирования станет со временем только увеличиваться.

Из сказанного следует, что практически любая математическая модель сложной системы с течением времени становится менее точной без проведения периодической коррекции.

Ниже приведен алгоритм коррекции математической модели системной динамики, используемый при решении задачи управления ликвидацией последствий критических ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях.

Алгоритм позволяет поддерживать погрешность математической модели на заданном уровне, так чтобы она не сказалась на достоверности формируемых для ЛПР заключений и рекомендаций. Алгоритм основан на том допущении, что точность прогнозирования поведения сложной крупномасштабной системы часто может быть увеличена за счет уменьшения интервала прогнозирования.

Проверку справедливости данного допущения необходимо осуществить на этапе адаптации разработанного математического обеспечения к особенностям функционирования в составе системы управления конкретного предприятия.

На этом же этапе необходимо определить, с какой периодичностью экономически целесообразно и организационно-технически возможно осуществлять коррекцию математической модели.

Если продолжительность выбранного интервала прогнозирования не позволяет обеспечить требуемую точность математического моделирования, то разработанный алгоритм коррекции не может быть использован на данном НПЗ или химическом предприятии.

Наличие значительной инерционности у многих сложных крупномасштабных систем позволяет сделать вывод, что алгоритм коррекции модели системной динамики может оказаться эффективным для многих предприятий.

Опыт реализации процедуры коррекции моделей системной динамики крупномасштабных систем позволяет сделать вывод, что для многих НПЗ и химических предприятий погрешность математической модели удастся сохранить на уровне не более 10% при уменьшении интервала прогнозирования до 12–14 месяцев реального времени, что является приемлемым при решении задачи (1)–(3) в составе тренажерного комплекса.

#### *Алгоритм.*

Шаг 1. Выбрать план мероприятий  $p_i(t) \in \{\overrightarrow{P(t)}\}$ , реализуемый при ликвидации последствий критических ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях.

Шаг 2. Выбрать релевантные возмущения, которые необходимо учесть при решении задачи (1)–(3).

Шаг 3. Определить функции, аппроксимирующие изменение выбранных возмущений на единичном временном интервале машинного времени.

Шаг 4. Построить системно-динамическую модель (1) в общем виде.

Шаг 5. Определить внутренние функции модели, аппроксимировав их полиномами невысоких степеней  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$ .

Шаг 6. Представить математическую модель в виде, пригодном для проведения численных расчетов, подставив  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$  в математическую модель (4).

Шаг 7. На основе статистической информации построить зависимости  $K_i(t, p(t))^{\text{Stat}}$ ,  $i = \overline{1, 15}$ , характеризующие изменение характеристик

$K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, 15}$  на временном интервале, используемом при моделировании в тренажерной системе.

Шаг 8. Решить систему (5) и определить расчетные значения характеристик  $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, 15}$ .

Шаг 9. Задать значение счетчика характеристик  $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, 15}$  равным единице, т.е.  $i = 1$ .

Шаг 10. Сравнить расчетное значение характеристики  $K_i(t, p(t))$  со значением  $K_i(t, p(t))^{\text{Stat}}$ , полученным из анализа статистики.

Шаг 11. При выполнении условия

$$\forall t \in [t_0; t_N] |K_i(t, p(t))^{\text{Stat}} - K_i(t, p(t))| \leq 0,1K_i(t, p(t)),$$

т.е. когда модуль разности сравниваемых характеристик превышает 10%, запустить процедуру коррекции, перейдя к следующему Шагу. В противном случае перейти к Шагу 15.

Шаг 12. Определить величину поправочного коэффициента

$$K^{\text{Kor}}(K_i(t, p(t))) = K_i(t, p(t))^{\text{Stat}} / K_i(t, p(t))$$

для характеристики  $K_i(t, p(t))$  как величину, на которую необходимо умножить расчетное значение характеристики  $K_i(t, p(t))$ , чтобы получить значение этой характеристики, полученное из анализа статистики  $K_i(t, p(t))^{\text{Stat}}$ .

Шаг 13. Изменить граф причинно-следственных связей  $G_{PSS}$ , степень или коэффициенты полиномов  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$  таким образом, чтобы выполнилось

$$\forall t \in [t_0; t_N] |K_i(t, p(t))^{\text{Stat}} - K_i(t, p(t))| < 0,1K_i(t, p(t)).$$

Шаг 14. Выдать сообщение ЛПП о завершении операции коррекции основной характеристики  $K_i(t, p(t))$  и занести в базу данных значение коэффициента коррекции этой характеристики  $K^{\text{Kor}}(K_i(t, p(t)))$ .

Шаг 15. Увеличить значение счетчика характеристик на единицу, т.е. присвоить  $i = i + 1$ .

Шаг 16. Если выполняется условие  $i \leq 15$ , то перейти к Шагу 9.

Шаг 17. Выдать сообщение ЛПП о завершении операции коррекции всех характеристик  $K_i(t, p(t))$   $i = \overline{1, 15}$  и занесении в базу данных значения коэффициентов коррекции этих характеристик  $K^{\text{Kor}}(K_i(t, p(t)))$ ,  $i = \overline{1, 15}$ .

Шаг 18. Заменить математическую модель, использованную до коррекции, на модель с измененными причинно-следственными связями и коэффициентами полиномов  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$ .

Конец алгоритма.

Пример коррекции переменной модели  $K_{12}$  на интервале машинного времени  $[0; 1, 3]$  тренажерной системы приведен на рис. 6.

В соответствии с разработанным алгоритмом коррекция математической модели проводится, если расхождение между результатами моделирования и

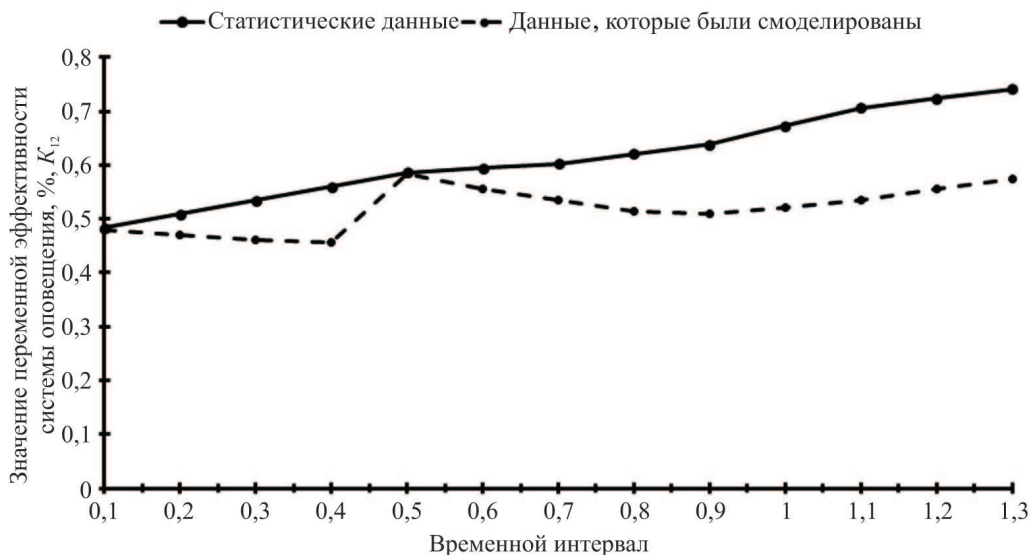


Рис. 6. Коррекция переменной модели  $K_{12}$  на интервале машинного времени  $[0; 1,3]$  тренажерной системы.

статистическими данными превышает 10%. На основе данных рис. 6 можно заключить, что на интервале машинного времени  $[0; 1,3]$  коррекция модели проводилась только один раз в момент  $t = 0,5$ .

## 5. Модельный пример

Рассмотрим пример использования разработанных моделей в составе тренажерной системы, предназначенной для приобретения и совершенствования навыков управления процессами ликвидации последствий критических ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях.

**Постановка задачи.** Допустим, что на НПЗ крупного города и расположенном неподалеку от него химическом комбинате в результате внешнего воздействия произошли аварии. На тренажерной системе объектового звена МЧС необходимо проверить выполнимость трех планов локализации и ликвидации возникшей аварийной ситуации (ПЛЮС) и выбрать тот из них, который позволит минимизировать целевую функцию (1) при соблюдении ограничений (2) и (3).

**Описание аварии и ее последствий.** 23 марта 2005 г. облако углеводородных паров воспламенилось и взорвалось на установке изомеризации НПЗ в городе Техас-Сити (см. рис. 7). В результате погибли 15 рабочих, 180 получили ранения, а заводу был нанесен серьезный ущерб в размере 322 миллионов долларов в ценах 2024 г. С учетом компенсаций 2,1 миллиарда долларов, расходов на ремонт, отсрочки производства и штрафов, этот взрыв стал самой дорогостоящей аварией на НПЗ в мире.



Рис. 7. Последствия взрыва на НПЗ в городе Техас-Сити.

**Решение задачи.** При проведении модельных расчетов использована система дифференциальных уравнений (5), начальные условия, приведенные в табл. 1, и зависимости между переменными модели  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$ , определенные по результатам расследований крупнейшей аварии НПЗ в Техас-Сити, США, а также ряда аварий, происшедших на отечественных и зарубежных нефтеперерабатывающих и химических предприятиях [1, 8, 10, 26].

В модельном примере для планов  $p_1$ – $p_3$  ряд зависимостей модели  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$  аппроксимированы полиномами второй степени:

$$\begin{aligned}
 f_{21}(K_5) &= -0,144K_5^2 + 0,108K_5 + 0,98, \\
 f_{22}(K_6) &= -0,158K_6^2 + 0,128K_6 + 0,97, \\
 f_{23}(K_{13}) &= -1,85K_{13}^2 - 3,39K_{13} + 2,52, \\
 f_{24}(K_{15}) &= -1,54K_{15}^2 + 3,19K_{15} - 0,65.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Для оценки точности аппроксимации определенные расчетным путем зависимости  $f_7(K_B)$  и  $f_{12}(K_{15})$  сравнены с данными статистики.

На рис. 8 и 9 красная линия представляет аппроксимационную кривую, полученную на основе полиномиальной модели, а черная линия показывает реальные статистические данные. Результаты сравнения свидетельствуют о хорошем совпадении рассматриваемых кривых.

Подставим  $f_1, f_2, \dots, f_{55}$  в систему уравнений (5), решим эту систему численным методом при заданных начальных условиях (табл. 1), подставим

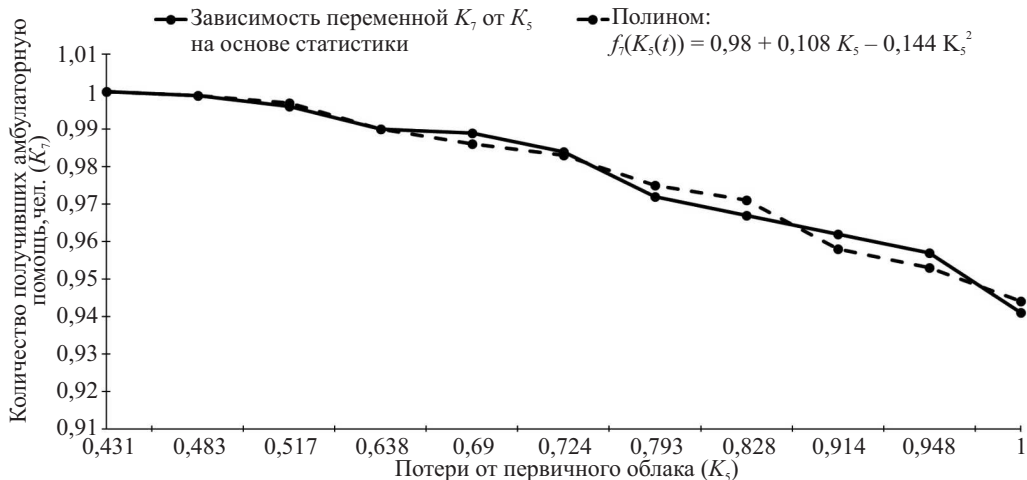


Рис. 8. Зависимость количества людей, получивших амбулаторную помощь (переменная  $K_7$ ), от потерь, вызванных первичным облаком  $K_5$ .

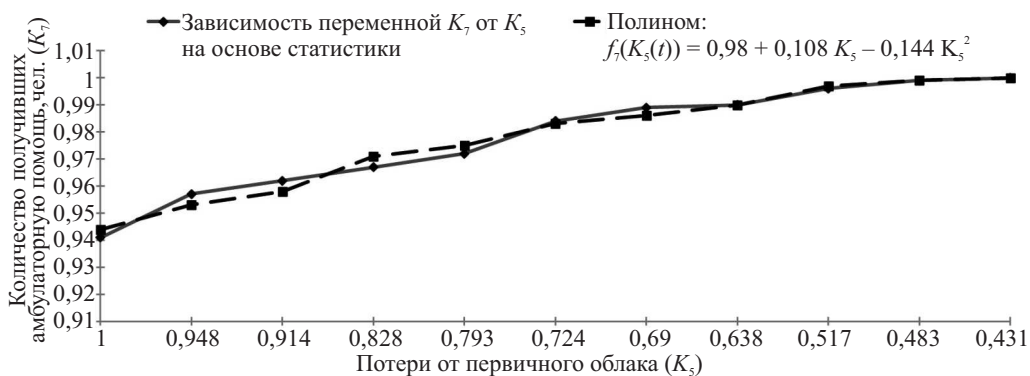


Рис. 9. Зависимость количества людей, получивших амбулаторную помощь (показатель  $K_7$ ), от развитости системы МЧС  $K_{15}$ .

в (1) результаты решения системы (5), имеющие вид зависимостей  $K_i(t, p(t))$ ,  $i = \overline{1, 15}$ , и вычислим величину целевой функции  $Z(p_1(t))$ , которой соответствует план  $p_1(t)$ . Значения целевой функции  $Z(p_2(t))$  и  $Z(p_3(t))$ , которым соответствуют планы  $p_2(t)$  и  $p_3(t)$ , определим аналогично (табл. 2).

**Таблица 2.** Результаты решения задачи

Планы ликвидации последствий критических ситуаций	$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$
Значение целевой функции	1,356	1,678	1,935

Проведенные вычисления показывают, что решением задачи (1)–(3) является план  $p_1(t)$ .

## 6. Информационно-логическая схема решения задачи

Процедура решения задачи (1)–(3) на временных интервалах [минимально возможный; месяц], [квартал; год] представлена на рис. 10 в виде информационно-логической схемы (ИЛС). Схема характеризует основные этапы минимизации ущерба при ликвидации последствий критических ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях, производственные процессы которых связаны с получением, хранением и переработкой ядовитых и потенциально опасных веществ.

На рис. 10 сделаны следующие обозначения: 1 – технологическое оборудование для подготовки сырья НПЗ; 2 – оборудование для перегонки сырья НПЗ; 3 – оборудование для вторичной переработки сырья НПЗ; 4 – оборудование для гидроочистки НПЗ; 5 – смешение компонентов готовых продуктов НПЗ; 6 – устройства локальной автоматики; 7 – запись информации в базы данных (БД) и базу знаний (БЗ); 8 – экспертная оценка опасности возникшей ситуации; 9 – ситуация аварийная?; 10 – занесение информации о штатной производственной ситуации в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 11 – определение мероприятий по парированию возник-

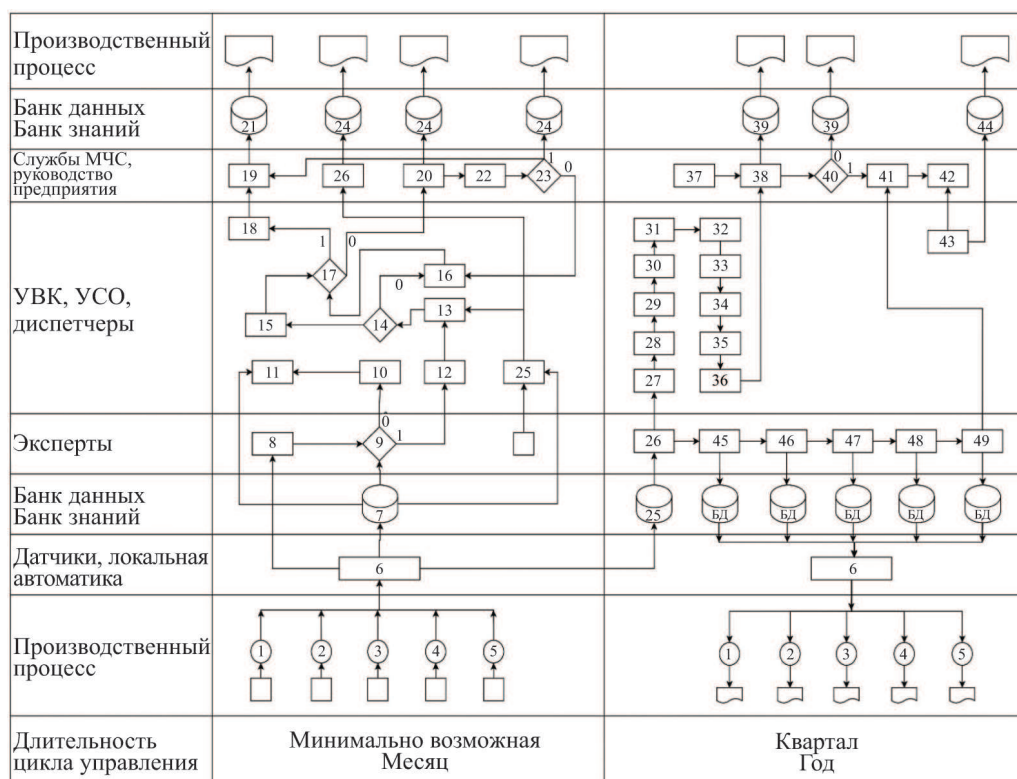


Рис. 10. Информационно-логическая схема [22–24] решения задачи в системе объектового звена МЧС, развернутого на предприятии.

шей штатной ситуации; 12 – сбор информации об аварийной ситуации; 13 – идентификация аварийной ситуации; 14 – для аварийной ситуации составлены планы ПЛОС?; 15 – проверка планов на выполнимость; 16 – составление плана ПЛОС; 17 – план выполним?; 18 – сообщение о выполнимости плана  $p_i$ ; 19 – руководство выполнением плана  $p_i$ ; 20 – информирование руководства предприятия о невозможности выполнить план  $p_i$ ; 21 – занесение информации в БД о результатах выполнении плана  $p_i$ ; 22 – коррекция плана  $p_i$ ; 23 – скорректированный план  $p_i$  выполним?; 24 – занесение информации в БД о реализуемом плане  $p_i$ ; 25 – выбор из базы данных предприятия информации о происшедшем в результате аварии выбросе ядовитых веществ; 26 – экспертная оценка степени тяжести возникшей ситуации [20, 21]; 27 – определение массы ядовитого вещества, поступившего в атмосферу в первичном и вторичном облаке; 28 – определение концентрации ядовитого вещества в зоне поражения; 29 – определение высоты подъема ядовитого вещества; 30 – определение зоны распространения ядовитого вещества; 31 – определение продолжительности атмосферного выброса; 32 – определение ущерба от повышения заболеваемости населения; 33 – определение потерь сельского хозяйства; 34 – определение ущерба от изменения окружающей природной среды; 35 – определение ущерба из-за ухудшения качества жизни; 36 – определение ущерба предприятию; 37 – оценка эффективности деятельности персонала; 38 – информирование руководства предприятия и службы МЧС объектового звена о расчетной оценке величины ущерба и эффективности деятельности персонала, соответственно; 39 – занесение информации о величине ущерба, причиненного в результате атмосферного выброса ядовитого вещества, в базу данных предприятия; 40 – есть ли необходимость корректировки ПЛОС?; 41 – изменение ПЛОС; 42 – утверждение новых ПЛОС руководством предприятия; 43 – обучение персонала действиям по локализации и ликвидации аварии на тренажерной системе; 45–49 – рекомендации по уменьшению потерь, указанных в п.п. 3236 ИЛС; ПЛОС – план локализации и ликвидации аварийных ситуаций.

Из рис. 10 следует, что задача управления ликвидацией последствий критических ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях решается на двух временных интервалах различной длины: [минимально возможный; месяц], [квартал; год].

В процессе решения задачи на первом интервале определяется степень опасности возникшей критической ситуации, которая привела к атмосферным выбросам загрязняющих веществ. Определяется максимальный размер зоны загрязнения ядовитыми или потенциально опасными веществами, проводятся мероприятия по ее ограничению и эвакуации персонала. Определяется реализуемость существующих планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций, при необходимости выполняется их коррекция. Информация о происшедшем доводится до руководства предприятия и службы МЧС объектового звена, а также заносится в базу данных предприятия. При необходимости информация передается в Единую государственную си-

стему предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. На втором временном интервале производится оценка ущерба от атмосферного выброса поллютантов, соответствующая информация заносится в базу данных информационной системы, поступает руководству предприятия и, по согласованию с ним, доводится до сведения всех заинтересованных сторонних организаций.

## 7. Заключение

Разработанный комплекс моделей системной динамики представляет собой инструмент для анализа, прогнозирования и управления в условиях аварийных ситуаций, предназначенный для использования в составе информационно-управляющих и тренажерных систем нефтеперерабатывающих и химических предприятий. Математическая модель, учитывающая значительное количество релевантных обратных связей между переменными системы, а также внешние возмущающие факторы, позволяет комплексно оценивать безопасность технологических процессов и минимизировать ущерб при ликвидации последствий критических ситуаций на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях.

Использование аппарата регрессионного анализа для формирования функциональных зависимостей между внутренними переменными модели позволяет учесть нелинейные эффекты и повысить точность расчетов. Полиномы второй степени, примененные для аппроксимации данных, позволили получить требуемый уровень точности расчетов, а численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений обеспечило достоверные результаты моделирования. Основой для расчетов послужили реальные статистические данные, их использование позволило подтвердить соответствие между результатами модельных расчетов и статистической информацией.

Разработка оригинального алгоритма корректировки модели системной динамики и оперативного принятия решений при отклонении переменных от допустимых значений позволило обеспечить требуемую погрешность моделирования в размере примерно 10%.

Сравнение результатов моделирования с фактическими данными, полученными на различных промышленных предприятиях [3], подтвердило достоверность и требуемый уровень точности математического моделирования. Результаты проведенного исследования могут стать основой для дальнейшего совершенствования систем управления безопасностью и минимизации рисков на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Авария на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе [Электронный ресурс]. 2014. Режим доступа: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2014>

2. Wang D., Zhang P., Chen L. Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. V. 26(6). P. 1390–1398. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.022>
3. Chettouh S., Hamzi R., Benaroua K. Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002-2013 // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. V. 41. P. 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.03.014>
4. Saloua B., Mounira R., Salah M. Fire and Explosion Risks in Petrochemical Plant: Assessment, Modeling and Consequences Analysis // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2019. V. 19. P. 903–916. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00732-6>
5. Elshaboury N., Al-Sakkaf A., Alfalah G., Abdelkader E. Data-Driven Models for Forecasting Failure Modes in Oil and Gas Pipes // Processes. 2022. V. 10. P. 400. <https://doi.org/10.3390/pr10020400>
6. Macedo J.B., Moura M.C., Aichele D., Lins I.D. Identification of risk features using text mining and BERT-based models: Application to an oil refinery // Process Safety and Environmental Protection. 2022. V. 158. P. 382–399. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.12.025>
7. Bertolini M., Bevilacqua M., Ciarpica F.E., Giacchetta G. Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2009. V. 22(2). P. 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.01.003>
8. Necci A., Cozzani V., Spadoni G., Khan F. Assessment of domino effect: State of the art and research needs // Reliability Engineering & System Safety. 2015. V. 143. P. 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.017>
9. ФОРРЕСТЕР Д. Мировая динамика: пер. с англ. / Д. Форрестер. М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. 379 с.
10. Shirea M.I., Jun G.T., Robinson S. The Application of System Dynamics Modelling to System Safety Improvement: Present Use and Future Potential.
11. Di Nardo M., Madonna M., Murino T., Castagna F. Modelling a Safety Management System Using System Dynamics at the Bhopal Incident // Applied Sciences. 2020. V. 10. No. 3. <https://doi.org/10.3390/app10030903>
12. Дурнев Р.А., Котосонова А.С., Галиуллина Р.Л. Системно-динамическая модель информирования населения при аварии на химически опасном объекте // Проблемы анализа риска. 2015. Т. 12. № 2. С. 44–47.
13. 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.
14. Федеральный закон “О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера” от 21.12.1994. N 68-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс]. 1994. Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5295/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/) (дата обращения: 13.03.2025).
15. Государственный стандарт Российской Федерации. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг химически опасных объектов. Общие требования от 01.07.2003 [Электронный ресурс]. 2003. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200030864> (дата обращения: 13.03.2025).

16. *Dnekeshev A., Kushnikov V., Tsvirkun A.* “System-Dynamic Model for Analysis and Forecasting Emergency Situations of Oil Refinery Enterprises,” 2024 // 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2024. P. 1–4.
17. *Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Дранко И.О. и др.* Оптимизационно-имитационный подход к определению критических комбинаций параметров компаний // *АиТ.* 2024. № 10. С. 53–64.
18. *Цвиркун А.Д., Богомоллов А.С., Дранко О.И. и др.* Модели системной динамики для управления дорожно-транспортной системой мегаполиса // *АиТ.* 2024. № 10. С. 65–79.
19. *Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. и др.* Модели и методы проверки достижимости целей и выполнимости планов в крупномасштабных системах на примере целей и планов ликвидации последствий наводнения // *АиТ.* 2023. № 12. С. 49–63.
20. *Kusheleva E., Rezchikov A., Kushnikov V., et al.* Mathematical model for prediction of the main characteristics of emissions of chemically hazardous substances into the atmosphere // *Studies in Systems, Decision and Control.* 2019. V. 199. P. 594–607.
21. *Kushnikova E., Kulakova E., Alipchenko S., et al.* Models and Methods for Determining Damage from Atmospheric Emissions of Industrial Enterprises // *Studies in Systems, Decision and Control.* 2019. V. 199. P. 256–267.
22. *Zhmud V., Dimitrov L.* Using the Fractional Differential Equation for the Control of Objects with Delay // *Symmetry.* 2022. V. 14. No. 4. P. 635.
23. *Kushnikova E., Ivaschenko V., Dvoryashina M.,* “Coordination of the Functional Structure of the Decision Support and Management System,” 2021 // 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2021. P. 1–5.
24. *Rezchikov A., Kushnikova E., Kushnikov O., Baryshnikova E.,* “Analysis of the Goals Achievement Degree and Plans Implementation in Large-Scale Systems,” 2023 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2023. P. 1–4.
25. *Fominykh D., Kushnikov V., Rezchikov A.* “Control of the Welding Process in Robotic Technological Complexes Using the System Dynamics Model,” 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019. P. 1–6.
26. *Ramos B., Lopez Droguett E., Mosleh A., et al.* Revisiting Past Refinery Accidents from a Human Reliability Analysis Perspective: The BP Texas City and the Chevron Richmond Accidents // *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* 2017. V. 95. No. 12. P. 2293–2305. <https://doi.org/10.1002/cjce.22996>

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галяевым.*

Поступила в редакцию 08.07.2025

После доработки 16.11.2025

Принята к публикации 20.11.2025