

# СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Днекешев А.А., Кушников В.А., Богомолов А.С.,  
Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия  
dnekeshev1991@gmail.com, kushnikoff@yandex.ru, lkushnikova@gmail.com

Резчиков А.Ф.

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

*Аннотация.* Разработана системно-динамическая модель для анализа и прогнозирования аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях. Модель учитывает ключевые показатели безопасности и внешние факторы, повышая точность прогнозов и улучшая системы управления безопасностью функционирования предприятия, снижая вероятность аварий и их последствий.

*Ключевые слова:* нефтеперерабатывающее предприятие, системная динамика, химически опасные вещества, авария.

## Введение

В настоящее время нефтеперерабатывающие предприятия представляют собой объекты промышленности с повышенным уровнем опасности в мировом масштабе. Увеличение численности населения в мире приводит к повышенному спросу на нефтепродукты, что ставит перед нефтеперерабатывающими предприятиями задачу модернизации производственных установок. Модернизация и увеличение производства нефтеперерабатывающих предприятий повышают риск возникновения аварийных ситуаций по следующим причинам:

- Изменение технологических процессов. При модернизации производства внедряются новые технологии и оборудование, которые требуют адаптации и обучение персонала. Недостаточная подготовка повышает риск возникновения ошибки персонала, что ведет к аварийной ситуации.
- Увеличение объемов производства нефтепереработки. Повышение объемов переработки нефти приводит к увеличению нагрузки на оборудование и инфраструктуру нефтеперерабатывающих предприятий, что увеличивает вероятность износа оборудования, снижения эффективности работы предприятия и повышения вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Возникновение аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающем предприятии может привести к серьезным последствиям. Остановка оборудования снижает объемы производства и доходы. Повреждение оборудования требует дорогостоящего ремонта, что влияет на прибыльность предприятия. Аварии могут привести к травмам или гибели работников, а также угрожать их здоровью. Риск пожаров, выбросов опасных веществ или взрывов могут привести к разливу нефтепродуктов и загрязнению окружающей среды, нанося ущерб экосистеме и водным ресурсам.

Анализ и прогнозирование аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях является сложной задачей, требующей интеграции множества данных и факторов. Как показал анализ исследований для решения данной задачи необходимо использовать метод системной динамики, который позволяет осуществить анализ и прогнозирование аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающем предприятии [1-9].

## 1. Постановка задачи

Разработать комплексную математическую модель для анализа и прогнозирования аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях. Основой для определения ключевых показателей безопасности должны служить стандарты, такие как ГОСТ Р 22.1.10-2002.

Для реализации модели требуется построение графов причинно-следственных связей между элементами системы, что позволит визуализировать и анализировать их взаимное влияние. Определение функциональных зависимостей между переменными должно быть выполнено с использованием регрессионного анализа для повышения точности моделирования. Система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику безопасности, будет решаться методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности, что обеспечит надежные результаты, валидированные на основе реальных статистических данных.

## 2. Математическая модель

Как было установлено ранее, для решения поставленной задачи наиболее целесообразным является использование метода системной динамики [1-9]. В рамках этого подхода будет разработан комплекс взаимосвязанных математических моделей, включающий выполнение ряда шагов, представленных на рис. 1.

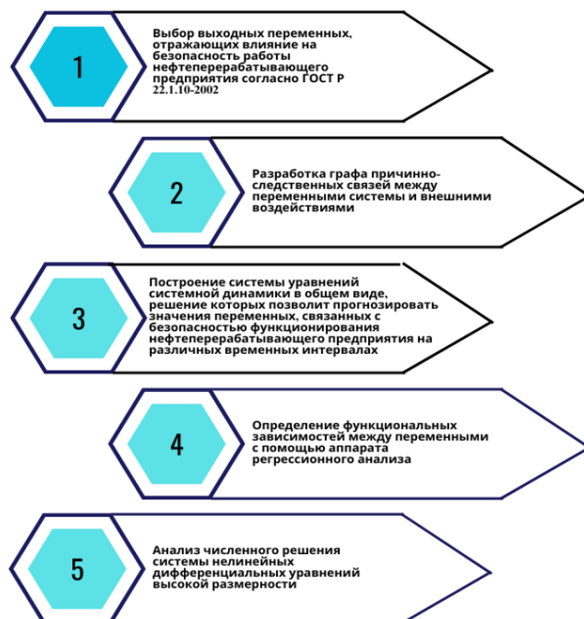


Рис. 1. Процедура решения задачи

В предыдущем исследовании [1] были выполнены первые 3 пункта процедуры решения задачи. В данном исследовании мы кратко их рассмотрим, чтобы обеспечить контекст и связность для дальнейшего анализа и разработки модели. Эти пункты включают:

- Для оценки безопасности работы нефтеперерабатывающего предприятия на основании стандарта ГОСТ Р 22.1.10-2002, были определены следующие показатели и внешние факторы, изображенные на рис. 2,3.

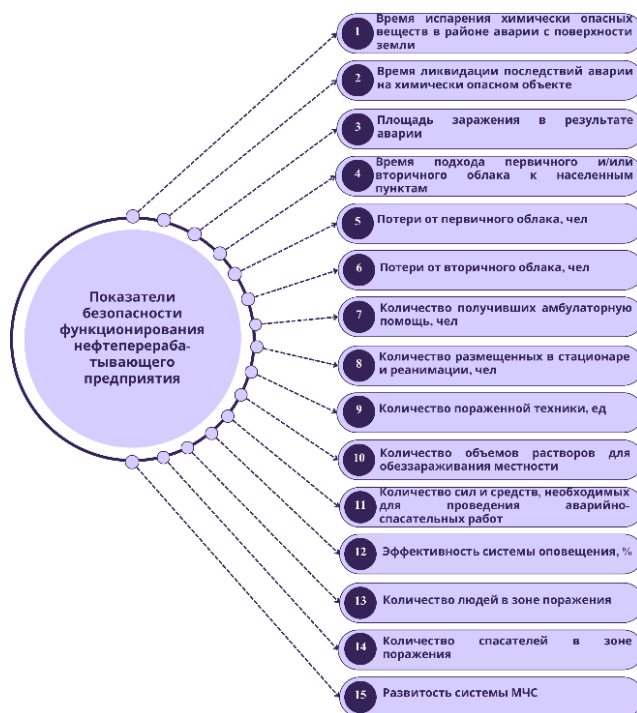


Рис. 2. Основные индикаторы безопасности производственных процессов нефтеперерабатывающего предприятия

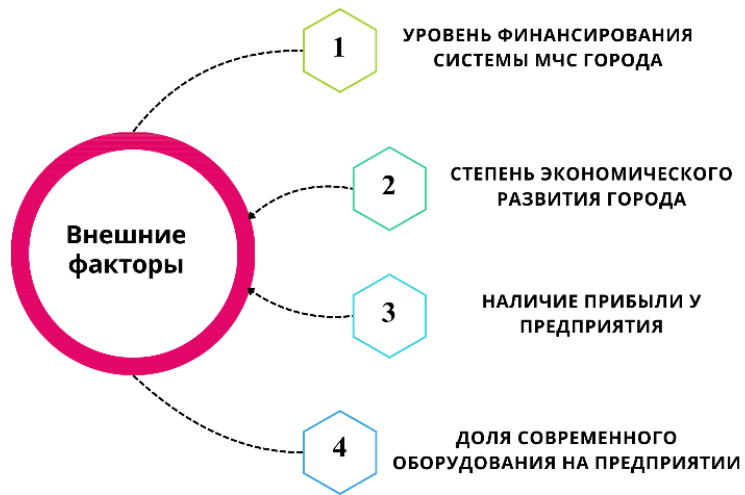


Рис. 3. Внешние факторы, влияющие на безопасность производственного процесса нефтеперерабатывающего предприятия

- Используя выбранные показатели безопасности нефтеперерабатывающего предприятия и внешние факторы, на основе матрицы инцидентности с помощью программного комплекса Anylogic был сформирован граф причинно-следственных связей представленный на рис. 4.

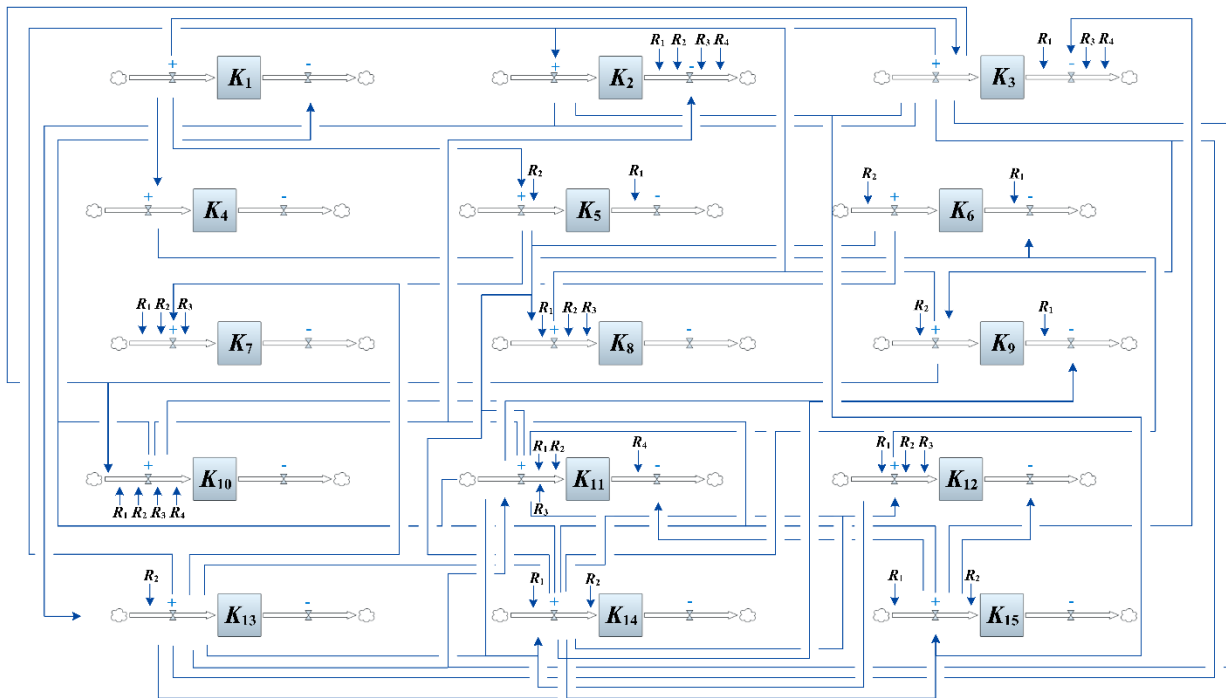


Рис. 4. Граф причинно-следственных связей

- На основе графа причинно-следственных связей были составлены дифференциальные уравнения [1-10], которые описывают динамику изменения уровня безопасности во времени. Эти уравнения включают положительные и отрицательные темпы изменения переменной безопасности, зависящие от различных факторов

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dK_1(t)}{dt} = -f_1(K_{10}(t))f_2(K_{11}(t))f_3(K_{14}(t)) \\
\frac{dK_2(t)}{dt} = f_4(K_3(t))f_5(K_7(t))f_6(K_8(t))f_7(K_9(t))f_8(K_{13}(t)) - f_9(K_{10}(t))f_{10}(K_{11}(t)) \\
\quad f_{11}(K_{14}(t))f_{12}(K_{15}(t)) \times R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) \\
\frac{dK_3(t)}{dt} = f_{13}(K_1(t)) - f_{14}(K_{15}(t)) \times R_1(t) + R_3(t) + R_4(t) \\
\quad \frac{dK_4(t)}{dt} = f_{15}(K_1(t)) \\
\quad \frac{dK_5(t)}{dt} = f_{16}(K_1(t)) \times R_2(t) - R_1(t) \\
\frac{dK_6(t)}{dt} = R_2(t) - f_{17}(K_4(t))f_{18}(K_{11}(t))f_{19}(K_{12}(t))f_{20}(K_{14}(t)) \times R_1(t) \\
\frac{dK_7(t)}{dt} = f_{21}(K_5(t))f_{22}(K_6(t))f_{23}(K_{13}(t))f_{24}(K_{15}(t)) \times R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) \\
\frac{dK_8(t)}{dt} = f_{25}(K_5(t))f_{26}(K_6(t))f_{27}(K_{11}(t))f_{28}(K_{13}(t))f_{29}(K_{14}(t))f_{30}(K_{15}(t)) \times \\
\quad R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) \\
\frac{dK_9(t)}{dt} = f_{31}(K_3(t))f_{32}(K_{13}(t)) \times R_2(t) - f_{33}(K_{10}(t))f_{34}(K_{11}(t))f_{35}(K_{14}(t)) \times R_1(t) \\
\frac{dK_{10}(t)}{dt} = f_{36}(K_3(t))f_{37}(K_9(t))f_{38}(K_{15}(t)) \times R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) \\
\frac{dK_{11}(t)}{dt} = f_{39}(K_3(t))f_{40}(K_{13}(t))f_{41}(K_{14}(t)) \times R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) - \\
\quad f_{42}(K_{15}(t)) \times R_4(t) \\
\frac{dK_{12}(t)}{dt} = f_{43}(K_{11}(t))f_{44}(K_{13}(t))f_{45}(K_{14}(t)) \times R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) - f_{46}(K_{15}(t)) \\
\quad \frac{dK_{13}(t)}{dt} = f_{47}(K_2(t))f_{48}(K_3(t)) \times R_2(t) \\
\quad \frac{dK_{14}(t)}{dt} = f_{49}(K_{11}(t))f_{50}(K_{12}(t))f_{51}(K_{13}(t)) \times R_1(t) + R_2(t) \\
\frac{dK_{15}(t)}{dt} = f_{52}(K_2(t))f_{53}(K_3(t))f_{54}(K_{13}(t))f_{55}(K_{14}(t)) \times R_1(t) + R_2(t)
\end{array} \right. \quad (1)$$

## 2.1. Построение функциональных зависимостей между внутренними переменными модели

В полученной системе нелинейных дифференциальных уравнений необходимо установить зависимости между переменными посредством регрессионного анализа. Один из наиболее эффективных и широко используемых методов статистического анализа в данном контексте – это метод наименьших квадратов. Этот метод минимизирует сумму квадратов отклонений наблюдаемых значений от предсказанных, что позволяет построить наилучшую подходящую модель.

В данном случае в качестве функциональных зависимостей будут использоваться полиномы второй степени. Полиномы второй степени обладают достаточной гибкостью для моделирования нелинейных эффектов, которые часто присутствуют в сложных системах. Кроме того, такие полиномы могут быть легко интерпретированы с точки зрения физического смысла, что делает их удобным инструментом для анализа и представления результатов.

Рассмотрим конкретный пример: аппроксимацию выражений для  $f_7(K_B)$ . Эти выражения представляют собой зависимости количества людей, получивших амбулаторную помощь от потерь из-за первичного облака, потерь от вторичного облака, количества людей в зоне поражения, развитости системы МЧС.

$$\left[ \begin{array}{l}
f_{7,5}(K_5) = -0,144K_5^2 + 0,108K_5 + 0,98 \\
f_{7,6}(K_6) = -0,158K_6^2 + 0,128K_6 + 0,974 \\
f_{7,13}(K_{13}) = -1,85K_{13}^2 - 3,39K_{13} + 2,52 \\
f_{7,15}(K_{15}) = -1,54K_{15}^2 + 3,19K_{15} - 0,65
\end{array} \right. \quad (2)$$

В качестве примера проиллюстрируем зависимость количества людей, получивших амбулаторную помощь  $K_7$  от потерь из-за первичного облака  $K_5$  (рис.5) и развитости системы МЧС  $K_{15}$  (рис.6).

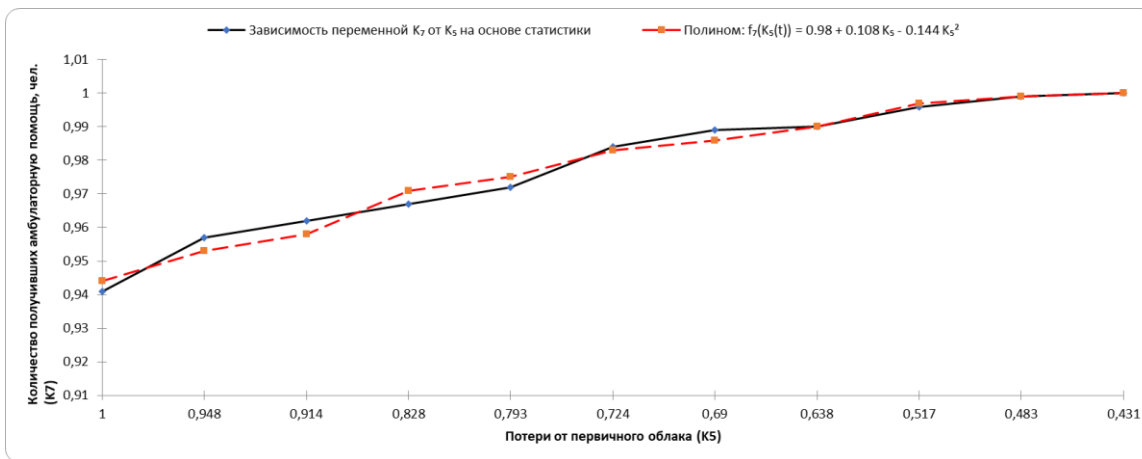


Рис. 5. Зависимость количества людей, получивших амбулаторную помощь (показатель  $K_7$ ) от потерь, вызванных первичным облаком  $K_5$

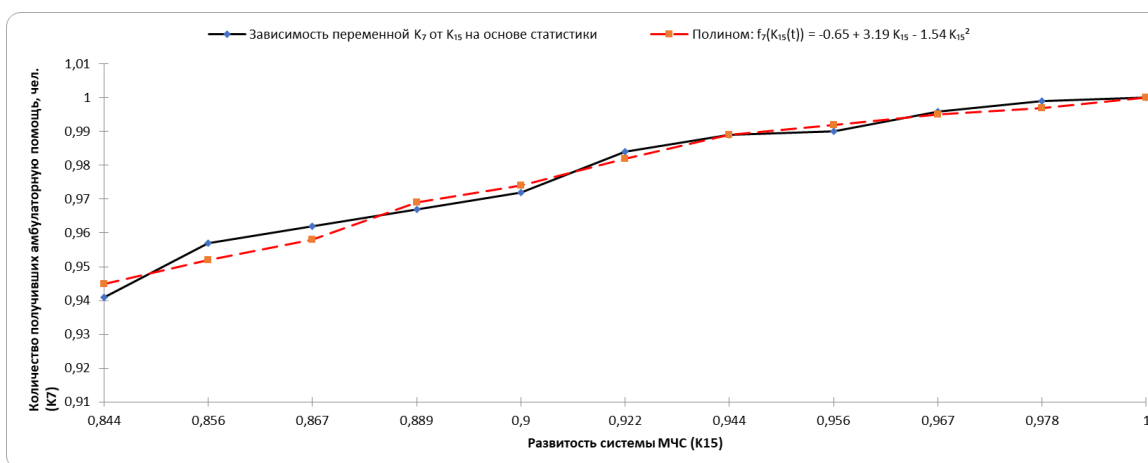


Рис. 6. Зависимость количества людей, получивших амбулаторную помощь (показатель  $K_7$ ) от развитости системы МЧС  $K_{15}$

На рисунках 5 и 6 приведены графики изменения данных зависимостей (красная линия), а также соответствующие данные статистики (черная линия). К примеру: график на рисунке 5 иллюстрирует, как количество получивших амбулаторную помощь изменяется в зависимости от потерь из-за первичного облака. Красная линия представляет аппроксимационную кривую, полученную на основе полиномиальной модели, а черная линия показывает реальные статистические данные.

### 3. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений

На пятом шаге процедуры решения задачи, необходимо уточнить переменные составляющих систему уравнений, на основании имеющихся статистических данных по различным факторам и основным переменным системы. После того как функциональные зависимости и коэффициенты в уравнениях, а также внешние влияния определены, проводится анализ численного вычисления системы нелинейных дифференциальных уравнений с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка. Этот метод отличается высокой точностью, что крайне важно при моделировании сложных систем. Данная система нелинейных дифференциальных уравнений представлена в формуле (3).

Помимо этого, применение метода Рунге-Кутты позволяет эффективно учитывать нелинейные эффекты и взаимодействия между различными компонентами системы, обеспечивая тем самым более реалистичное и точное предсказание поведения системы. Высокая точность вычисления также позволяет снизить вероятность накопления ошибок на каждом шаге интегрирования, что особенно критично при длительных расчетах. Важно отметить, что для успешного применения данного метода необходимо тщательно подготовить исходные данные и параметры модели, а также провести их верификацию и валидацию на основе исторических данных и экспериментов.

Начальные условия, использованные для получения результатов решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Начальные условия для численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{14}$	$K_{15}$
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

График на рис. 7 позволяет выявить, насколько точно модель воспроизводит реальные процессы, наблюдаемые в системе. Важно отметить, что сравнение расчетных и статистических данных показывает степень адекватности модели. Анализ временного ряда за период 2020-2023 годы демонстрирует соответствие тенденций и значений, что указывает на высокую точность моделирования.

Графики на рис. 8 и 9 предоставляют дополнительную информацию, позволяя проанализировать поведение отдельных переменных в более длительном временном интервале. Для переменной  $K_{11}$  (рис. 8) наблюдается высокая корреляция между расчетными и статистическими данными, что подтверждает правильность выбранных параметров и структурных особенностей модели. Переменная  $K_1$  (рис. 9) также показывает хорошее совпадение с реальными данными, что свидетельствует о надежности модели при долгосрочных прогнозах.

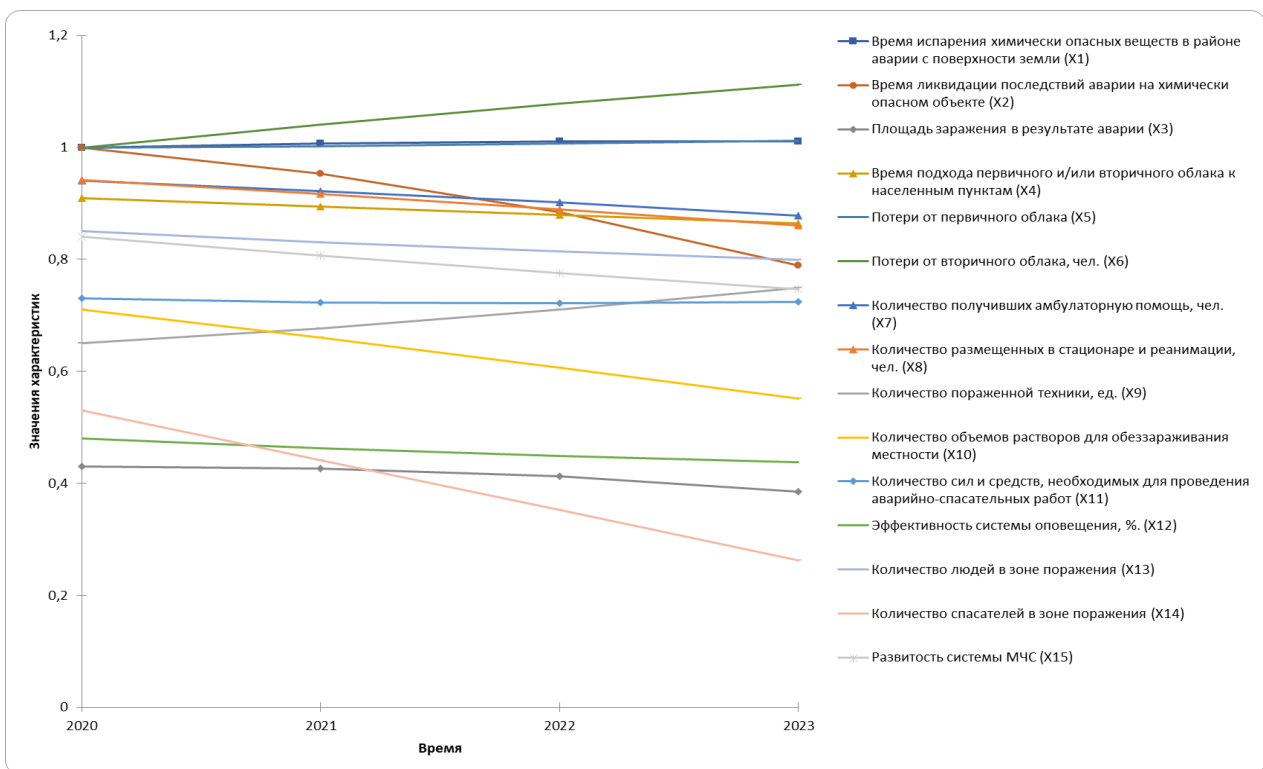


Рис. 7. Результаты прогнозирования по каждой переменной за 2020-2023 годы

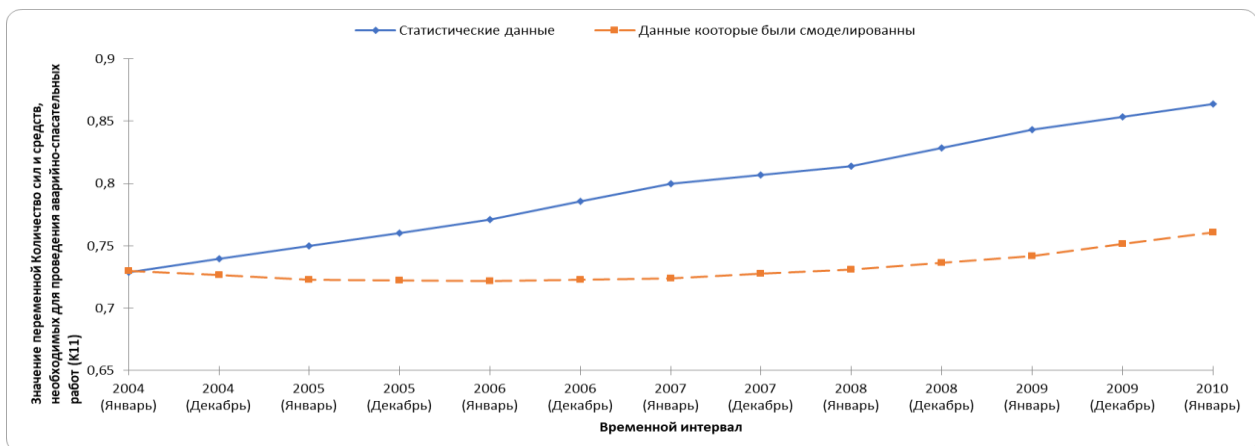


Рис. 8. Сравнение статистических и смоделированных данных для переменной  $K_{11}$

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dK_1(t)}{dt} &= -(0,14K_{10}^2 - 0,86K_{10} + 1,54)(0,6K_{11}^2 - 1,64K_{11} + 1,87)(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)(-7,87K_8^2 + 8K_{14} + 0,45) \times \\
&\quad \times (-3,17K_9^2 + 5,01K_9 - 1,2)(-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)(-0,4K_{14}^2 + 0,47K_{14} + 0,64)(13,28K_{15}^2 - 27,1K_{15} + 14,41) \times \\
&\quad \times (0,1R_1(t) + 2) + (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 (0,1R_1(t) + 2) + \\
&\quad + (2\sin R_3(t) + \varphi) + (4R_4(t) + 4) \\
\frac{dK_4(t)}{dt} &= (-6,95K_1^2 - 14,47K_1 - 6,67) \\
\frac{dK_5(t)}{dt} &= (-0,08K_1^2 + 3,57K_1 - 2,47) \times (0,2R_2(t) + 2,5) - (0,1R_1(t) + 2) \\
\frac{dK_6(t)}{dt} &= (0,2R_2(t) + 2,5) - (-3,44K_4^2 + 5,26K_4 - 1,14)(0,92K_{11}^2 - 3,68K_{11} + 3,19) \times \\
&\quad \times (0,55K_{12}^2 - 1,92K_{12} + 1,81)(0,19K_{14}^2 - 0,21K_{14} + 0,77) \times (0,1R_1(t) + 2) \\
\frac{dK_7(t)}{dt} &= (-0,14K_5^2 + 0,1K_5 + 0,98)(-0,15K_6^2 + 0,12K_6 - 0,97)(1,85K_{13}^2 - 3,38K_{13} + 2,52) \times \\
&\quad \times (-1,53K_{15}^2 + 3,18K_{15} - 0,65) \times (0,1R_1(t) + 2) + (0,2R_2(t) + 2,5) + (2\sin R_3(t) + \varphi) \\
\frac{dK_8(t)}{dt} &= (-0,14K_5^2 + 0,11K_5 + 0,97)(-0,16K_6^2 + 0,13K_6 + 0,97)(-0,82K_{11}^2 + 1,62K_{11} + 0,2) \times \\
&\quad \times (1,88K_{13}^2 - 3,44K_{13} + 2,54)(0,07K_{14}^2 - 0,08K_{14} + 1) \times (0,1R_1(t) + 2) + (0,2R_2(t) + 2,5) + \\
&\quad + (2\sin R_3(t) + \varphi) \\
\frac{dK_9(t)}{dt} &= (-0,87K_3^2 + 1,31K_3 + 0,34)(21,68K_{13}^2 - 39,68K_{13} + 18,89) \times (0,2R_2(t) + 2,5) - \\
&\quad - (-2,33K_{10}^2 + 4,28K_{10} - 1,15)(1,64K_{11}^2 + 3,14K_{11} - 0,69)(1,28K_{14}^2 - 1,53K_{14} + 1,17) \times \\
&\quad \times (0,1R_1(t) + 2) \\
\frac{dK_{10}(t)}{dt} &= (0,81K_3^2 - 0,81K_3 + 1,06)(1,73K_9^2 - 2,73K_9 + 1,91)(3,13K_{15}^2 - 4,07K_{15} + 1,93) \times \\
&\quad \times (0,1R_1(t) + 2) + (0,2R_2(t) + 2,5) + (2\sin R_3(t) + \varphi) + (4R_4(t) + 4) \\
\frac{dK_{11}(t)}{dt} &= (0,89K_3^2 - 0,92K_3 + 1,06)(11,04K_{13}^2 - 20,48K_{13} + 10,32)(-0,14K_{14}^2 + 0,15K_{14} + 0,82) \times \\
&\quad \times (0,1R_1(t) + 2) + (0,2R_2(t) + 2,5) + (2\sin R_3(t) + \varphi) - (4,45K_{15}^2 - 6,43K_{15} + 12,99) \times \\
&\quad \times (4R_4(t) + 4) \\
\frac{dK_{12}(t)}{dt} &= (0,92K_{11}^2 + 0,28K_{11} - 0,2)(16,59K_{13}^2 - 31,18K_{13} + 15,3)(-0,32K_{14}^2 + 0,35K_{14} + 0,64) \times \\
&\quad \times (0,1R_1(t) + 2) + (0,2R_2(t) + 2,5) + (2\sin R_3(t) + \varphi) - (10,52K_{15}^2 - 16,06K_{15} + 6,57) \\
\frac{dK_{13}(t)}{dt} &= (-1,34K_2^2 + 2,13K_2 + 0,07)(-0,02K_3^2 - 0,06K_3 + 0,94) \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) \times (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)(5,63K_{13}^2 - 10,37K_{13} + 5,67) \times \\
&\quad \times (0,03K_{14}^2 - 0,05K_{14} + 0,93) \times (0,1R_1(t) + 2) + (0,2R_2(t) + 2,5)
\end{aligned} \right\} \quad (3)$$

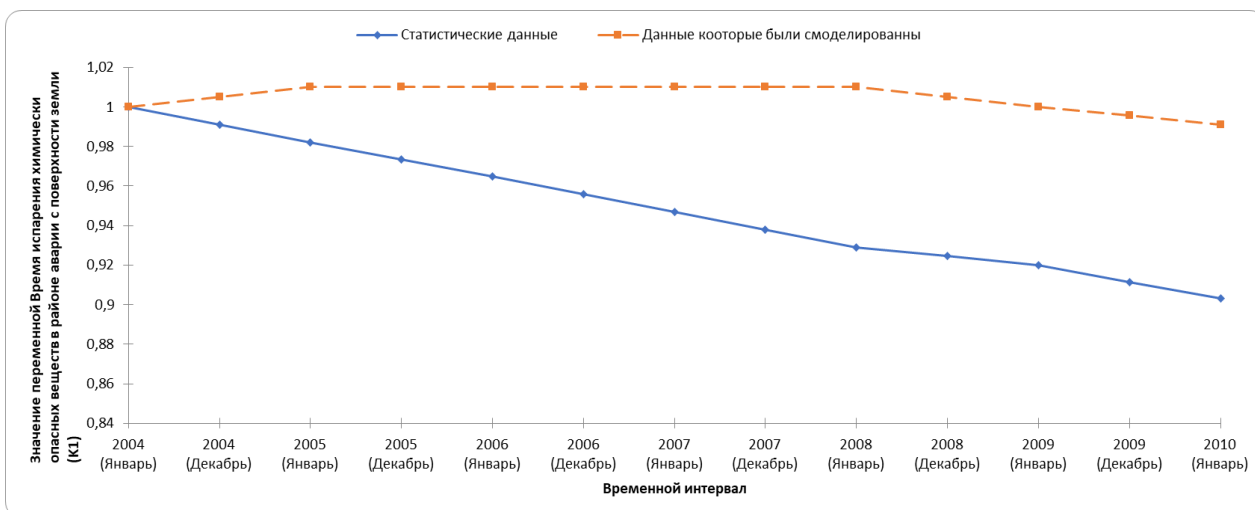


Рис. 9. Сравнение статистических и смоделированных данных для переменной  $K_1$

На рис. 8 максимальное отклонение от статистических данных наблюдается в 2009 году и составляет 11,98 процента, а на рис. 9 максимальное отклонение от статистики зафиксировано в 2010 году и составляет 9,74 процента.

#### 4. Заключение

Разработан комплекс моделей системной динамики, который представляет собой мощный инструмент для анализа и прогнозирования аварийных ситуаций на нефтеперерабатывающих предприятиях. В рамках данного исследования удалось создать математическую модель, учитывающую широкий спектр положительных и отрицательных обратных связей между переменными системы, а также внешние возмущения, существенно влияющие на безопасность функционирования нефтеперерабатывающего предприятия и размер ущерба от последствий атмосферных выбросов.

В ходе исследования были сформированы функциональные зависимости между внутренними переменными модели с использованием регрессионного анализа, что позволило учесть нелинейные эффекты и повысить точность результатов моделирования. Полиномы второй степени, использованные для аппроксимации, показали высокую степень достоверности.

Система нелинейных дифференциальных уравнений была решена методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности, что обеспечило высокую точность моделирования. Начальные условия для численного решения были установлены на основе реальных статистических данных, что позволило получить результаты, соответствующие реальной динамике системы. Сравнение результатов моделирования с реальными статистическими данными за период с 2020 по 2023 годы подтвердило высокую степень соответствия и надежность разработанных моделей.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований и разработки более совершенных моделей, а также для практического применения в системах управления безопасностью производственных процессов нефтеперерабатывающих предприятий.

#### Литература

1. 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.
2. Новожилков Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Кушников В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Шоломов К.И. Управление авиационно-транспортными системами на основе причинно-следственных деревьев событий // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2015. – № 6. – С. 13–17.
3. Кушников В.А., Яндыбаева Н.В. Модель Форрестера в управлении качеством образовательного процесса вуза // Прикладная информатика. – 2011. – №3 (33). – С. 65–73.
4. Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Яндыбаева Н.В. Математические модели для контроля, диагностики и прогнозирования состояния национальной безопасности России // Контроль. Диагностика. – 2016. – №3. – С. 43–51.



5. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю. Модели и алгоритмы минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. – №57. – С. 158–190.
6. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф. Математическая модель для определения массового и валового выброса атмосферных поллютантов промышленного предприятия // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – №4. – С. 134–140.
7. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю. Модели минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий при неопределенности характеристик состояния окружающей среды // Экология промышленного производства. – 2015. – №4 (92). – С. 60–65.
8. Kushheleva E., Rezchikov A., Kushnikov V., Ivaschenko V., Kushnikova E., Samartsev A. Mathematical model for prediction of the main characteristics of emissions of chemically hazardous substances into the atmosphere // Studies in Systems, Decision and Control. – 2019. – Т. 199. – Рр. 594–607.
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.