

# МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОЖАРА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА УЩЕРБА

Путилов Д.И., Кушников В.А., Богомолов А.С.,  
Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия  
putilov.dania@ya.ru, bogomolov@iptmuran.ru, kushnikoff@iptmuran.ru

Резчиков А.Ф.

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

*Аннотация.* Разработан комплекс математических моделей, позволяющий прогнозировать динамику характеристик последствий пожаров на производстве. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании математического обеспечения систем минимизации ущерба от последствий пожаров на промышленных предприятиях страны.

*Ключевые слова:* пожары, минимизация ущерба, модели системной динамики.

## Введение

Пожары на промышленном предприятии могут приводить к значительным экономическим, экологическим и социальным потерям. Задача минимизации ущерба от пожаров требует разработки моделей и методов, которые могут эффективно предсказывать последствия и предлагать оптимальные планы мероприятий для их ликвидации. Эти инструменты позволяют минимизировать функцию ущерба на заданном временном интервале при допустимых значениях вектора входных переменных.

Величину и динамику этих показателей учитывают при развитии промышленной инфраструктуры, планировании деятельности федеральных и региональных органов власти, разработке мероприятий по снижению рисков возникновения пожаров и связанных с ними убытков, анализе причин возникновения пожаров, разработке и обосновании технологических решений, планировании деятельности компаний, занимающихся промышленным страхованием, и др.

Важной проблемой, затрудняющей развитие промышленного сектора России и сдерживающей внедрение современных систем управления безопасностью на предприятиях, является высокий уровень пожарной опасности и связанные с ним значительные материальные и человеческие потери. Так, согласно официальной статистике МЧС России, за 2022 год произошло около 5000 пожаров на промышленных предприятиях, в результате которых погибло более 100 человек и было причинено ущерба на сумму более миллиона рублей [1].

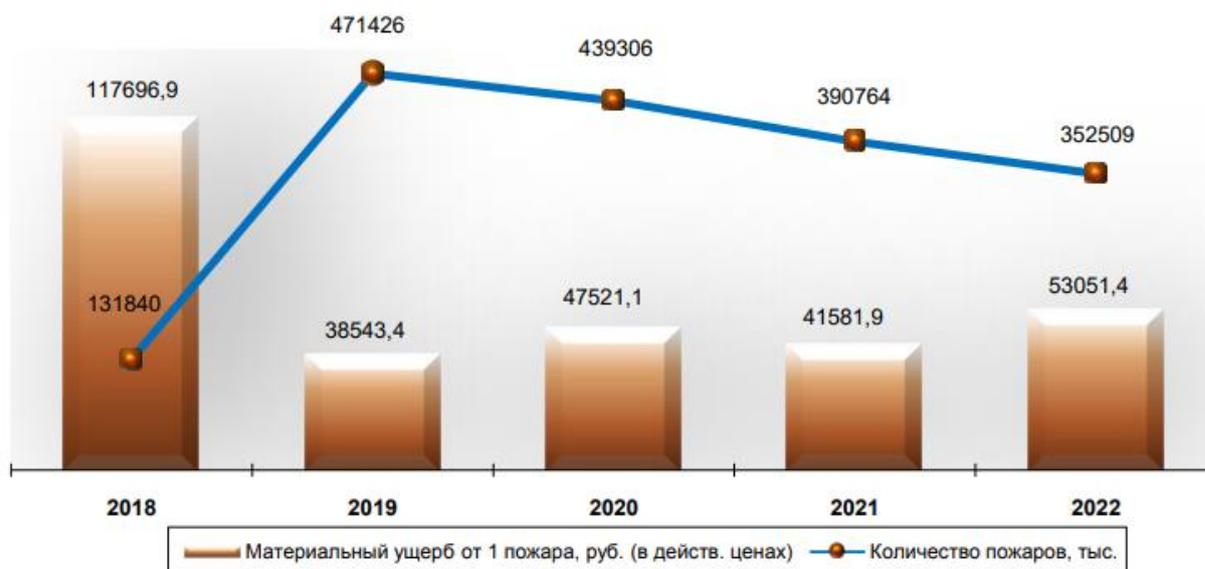


Рис. 1. Материальный ущерб от одного пожара за 2018 – 2022 гг.

Одним из путей повышения безопасности промышленных предприятий является совершенствование математического обеспечения используемых для этой цели интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

## 1. Постановка задачи ликвидации последствий пожара

Необходимо разработать комплекс математических моделей для анализа и прогнозирования основных характеристик последствий пожара на промышленных предприятиях.

Разработка и внедрение автоматизированных систем, использующих методы системной динамики, способны существенно улучшить управление безопасностью на промышленных предприятиях [2]. Эти системы позволят более точно прогнозировать потенциальные риски и оперативно принимать решения для минимизации ущерба от возможных пожаров, что повышает общую устойчивость и безопасность промышленных объектов [3–8].

Данные обстоятельства подчеркивают актуальность и значимость темы исследования. Управление показателями безопасности промышленных предприятий на различных временных интервалах с использованием системной динамики позволяет учесть множество взаимосвязей между основными показателями безопасности, обеспечивая более эффективное управление и снижение рисков.

Рассматриваются часто повторяющиеся ситуации, влияющие на безопасность объектов: перегрузки сети, подбор и монтаж электрооборудования без учета категории производства, неправильная прокладка проводов и кабелей, оставление без присмотра включенных электрических установок и др. Учитывая высокую стоимость покупки и использования технических установок для повышения пожарной безопасности промышленных предприятий, система ориентирована прежде всего на минимизацию ущерба за счет конкретных планов мероприятий.

В соответствии с информационно-аналитическими сборниками «Пожары и пожарная безопасность» ежегодно составляемым МЧС России [9–11], и, содержащим статистический учет и государственную статистическую отчетность по пожарам и их последствиям, были выбраны следующие характеристики, измеряемые в тыс. рублей, если не указано иное (таблица 1).

Таблица 1. Таблица основных характеристик системы ликвидации последствий пожара

| Переменная | Наименование характеристики   |
|------------|---|
| $X_1(t)$   | Кол-во погибших людей   |
| $X_2(t)$   | Кол-во травмированных людей   |
| $X_3(t)$   | Прямой ущерб  |
| $X_4(t)$   | Ущерб от неисправности оборудования, нарушение тех. процесса производства |
| $X_5(t)$   | Ущерб от НПУ и эксплуатации электрооборудования                           |
| $X_6(t)$   | Ущерб от нарушения правил устройства и эксплуатации газового оборудования |
| $X_7(t)$   | Ущерб от НППБ при проведении электрогазосварочных работ                   |
| $X_8(t)$   | Ущерб от нарушения правил устройства и эксплуатации печей                 |
| $X_9(t)$   | Ущерб от грозových разрядов   |

## 2. Математическая модель

На основе статистической информации и экспертных данных между характеристиками системы были установлены связи, обозначающие влияние характеристик и возмущений на характеристики. Эти связи могут быть представлены матрицей, элементы  $U_{i,j}$  которой описываются как

$$U_{i,j} = \begin{cases} -1, \text{ характеристика } X_j \text{ имеет отрицательное влияние на } X_i, \\ 0, \text{ характеристика } X_j \text{ не имеет влияния на } X_i, \\ +1, \text{ характеристика } X_j \text{ имеет положительное влияние на } X_i, \end{cases} \quad (1)$$

Матрица инцидентности для характеристик системы изображена в таблице 2.

Таблица 2. Таблица инцидентности для характеристик системы ликвидации последствий пожара

|          | $X_1(t)$ | $X_2(t)$ | $X_3(t)$ | $X_4(t)$ | $X_5(t)$ | $X_6(t)$ | $X_7(t)$ | $X_8(t)$ | $X_9(t)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $X_1(t)$ | 0        | 0        | 0        | 0        | +1       | +1       | 0        | +1       | 0        |
| $X_2(t)$ | 0        | 0        | 0        | 0        | +1       | 0        | 0        | +1       | 0        |
| $X_3(t)$ | 0        | 0        | 0        | +1       | +1       | +1       | +1       | 0        | +1       |
| $X_4(t)$ | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | +1       |
| $X_5(t)$ | 0        | 0        | 0        | +1       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| $X_6(t)$ | 0        | 0        | 0        | +1       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

|          |   |   |   |    |   |    |   |   |   |
|----------|---|---|---|----|---|----|---|---|---|
| $X_7(t)$ | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 |
| $X_8(t)$ | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |
| $X_9(t)$ | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 |

Построение моделей системной динамики происходит на основе выбранных моделируемых переменных (уровней), которые характеризуют системные функции. На их основе строятся дифференциальные уравнения вида:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{1}{X_i^{norm}} (\prod_{i,j} f_{i,j}(X_j^+) - \prod_{i,j} f_{i,j}(X_j^-)), \quad i = \overline{1,9}, j = \overline{1,9}, \quad (2)$$

где  $X_i^+$  – переменная, положительно влияющая на  $X_i$ ,  $X_i^-$  – переменная, отрицательно влияющая на  $X_i$ ,  $X_i^{norm}$  – переменная  $X_i$  нормированная относительно начального показателя.

Система дифференциальных уравнений в общем виде представлена формулой 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial X_1}{\partial t} = f_1(X_5)f_2(X_6)f_3(X_8) \\ \frac{\partial X_2}{\partial t} = f_4(X_5)f_5(X_8) \\ \frac{\partial X_3}{\partial t} = f_6(X_4)f_7(X_5)f_8(X_6)f_9(X_7)f_{10}(X_8) \\ \frac{\partial X_4}{\partial t} = f_{11}(X_9) \\ \frac{dX_5}{dt} = f_{12}(X_4) \\ \frac{\partial X_6}{\partial t} = f_{13}(X_4) \\ \frac{\partial X_7}{\partial t} = f_{14}(X_6) \\ \frac{\partial X_8}{\partial t} = f_{15}(X_4) \\ \frac{\partial X_9}{\partial t} = f_{16}(X_5) \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $f_i$  – зависимости, количественно описывающие причинно-следственные связи между переменными модели. Практика применения моделей системной динамики показывает [12], что такие зависимости могут быть точно аппроксимированы полиномами низких степеней. Далее при построении модели системной динамики следует конкретизация множителей и слагаемых, входящих в данную систему уравнений на основе имеющейся статистики по факторам и основным переменным системы. Выполним для этого аппроксимацию выражений  $F_i(t)$  методом наименьших квадратов, чтобы определить зависимости между переменными.

Зависимость переменной  $X_1(t)$  (Прямой ущерб) от  $X_4(t)$  (Неисправность оборудования, нарушения тех. процесса производства) представлена на рисунке 3.

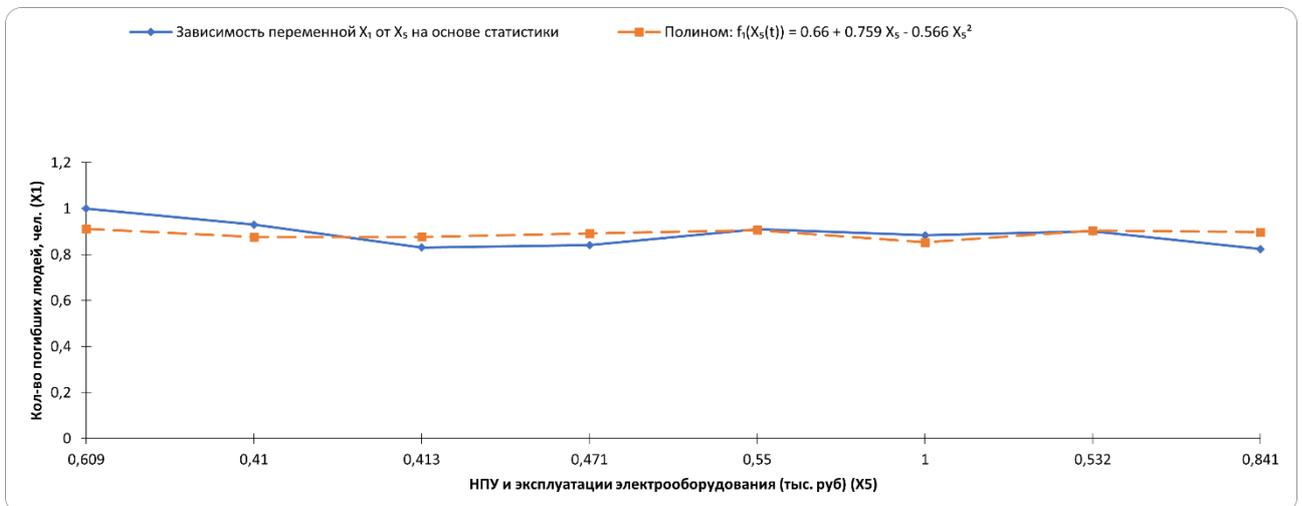


Рис. 2. График зависимости переменной  $X_1(t)$  от переменной  $X_4(t)$

Зависимость переменной  $X_3(t)$  (Прямой ущерб.) от переменной  $X_5(t)$  (НПУ и эксплуатации оборудования) представлена на рисунке 3.

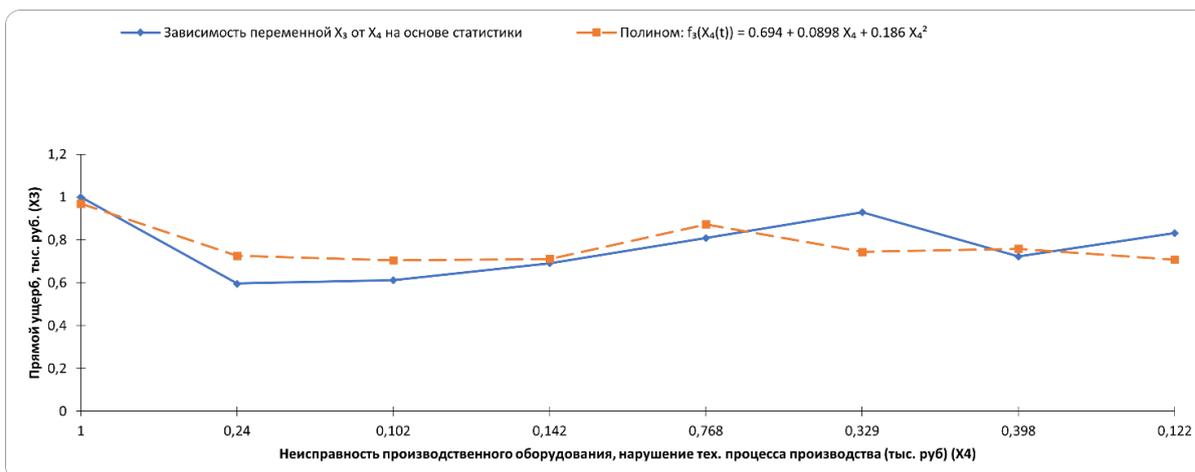


Рис. 3. График зависимости переменной  $X_3(t)$  от переменной  $X_4(t)$

После определения функциональных зависимостей и коэффициентов в уравнениях, полученная система уравнений решается методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности.

### 3. Решение

Начальные условия, при которых получено решение системы, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Таблица значений системы уравнений

| Переменные | Значения |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | $t$      | 0    | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  |
| $X_1(t)$   | 1        | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,77 | 0,77 |
| $X_2(t)$   | 1        | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,85 | 0,8  | 0,76 | 0,76 |
| $X_3(t)$   | 1        | 0,93 | 0,85 | 0,77 | 0,68 | 0,6  | 0,51 | 0,51 |
| $X_4(t)$   | 1        | 0,92 | 0,84 | 0,76 | 0,68 | 0,6  | 0,53 | 0,53 |
| $X_5(t)$   | 0,61     | 0,57 | 0,53 | 0,49 | 0,46 | 0,42 | 0,39 | 0,39 |
| $X_6(t)$   | 0,85     | 0,8  | 0,74 | 0,69 | 0,63 | 0,57 | 0,51 | 0,51 |
| $X_7(t)$   | 1        | 0,93 | 0,88 | 0,85 | 0,83 | 0,84 | 0,86 | 0,86 |
| $X_8(t)$   | 0,83     | 0,81 | 0,8  | 0,8  | 0,79 | 0,79 | 0,78 | 0,78 |
| $X_9(t)$   | 0,6      | 0,56 | 0,52 | 0,48 | 0,44 | 0,4  | 0,37 | 0,37 |

На рисунке 4 представлен график, показывающий изменение во времени расчетных значений для всех расчетных значений переменных модели на интервале с 2015–2022 гг. Результаты расчета сравнены со статистическими данными по каждой переменной за 2015–2021 гг. Максимальная погрешность составила 15%.

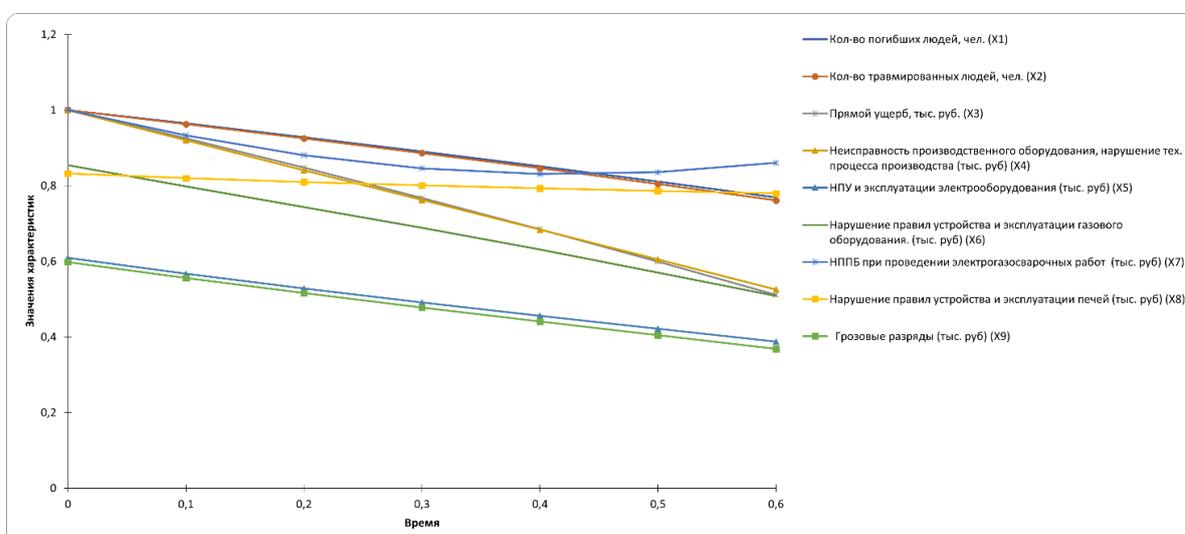


Рис. 4. График результатов прогнозирования переменных за 2015–2022 годы

#### 4. Заключение

Разработанный комплекс математических моделей обеспечивает прогнозирование динамики характеристик последствий пожаров на производственных предприятиях. Полученные результаты могут быть применены для улучшения математического обеспечения систем минимизации ущерба от пожаров на промышленных предприятиях страны.

#### Литература

1. *Гончаренко В.С., Четчина Т.А., Сибирко В.И., Надточий О.В., Полехин П.В., Козлов А.А., Грибанов А.М.* Пожары и пожарная безопасность в 2022: информ.- аналитич. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – 80 с.
2. *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.
3. *Khatmitova M., Rezchikov A., Kushnikov V. et al:* Algorithms for the Management of Liquidation Process of Floods Consequences. Recent Research in Control Engineering and Decision Making, Vol.199, p. 540–551 (2019).
4. *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.
5. *Афанасьев Н.В., Ваганова Д.В.* Пожарная безопасность на промышленных предприятиях // Вестник промышленности. Наука и технологии. 2017.
6. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Предотвращение критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. N 4. – С. 60–71.
7. *Щербаков М.А., Кушников В.А.* Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2, N 1(55). – С. 196–200.
8. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. N 5. – С. 328–332.
9. *Полехин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко А.Г., Гончаренко В.С., Четчина Т.А.* Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: Статистический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2020. – 80 с.
10. *Андросова Т.А., Зуева Н.А., Лупанов С.А., Сибирко В.И., Фирсов А.Г., Чабан Н.Г., Четчина Т.А.* Пожары и пожарная безопасность в 2015 году: Статистический сборник. Под общей редакцией А.В. Матюшина. – М.: ВНИИПО, 2016. – 124 с.
11. *Полехин П.В., Козлов А.А., Чебуханов М.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Четчина Т.А., Гончаренко В.С.* Пожары и пожарная безопасность в 2017 году: Статистический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2018. – 125 с.
12. *Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Хамутова М.В.* Информационно-управляющая система для поддержки принятия решений по ликвидации последствий наводнений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. N 11(149). – С. 39–45
13. *Степанова М. Н.* Анализ пожарной безопасности на объектах промышленности в России / *Степанова М. Н., Шульженко В. Н., Ветрова Ю. В.* // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2019. – № 2(50). – С. 47–52.