

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Немолякин Кирилл Андреевич

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРАБОТКИ  
МЕРОПРИЯТИЙ ГО И ЧС ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ»  
(НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ КОМПОНОВОЧНЫХ  
РЕШЕНИЙ ГЛАВНЫХ КОРПУСОВ ТЭС)**

Направление подготовки  
Направление: 08.04.01 – «Строительство»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Сысоев Олег Евгеньевич

Рецензент кандидат технических наук, доцент  
Верещагина Александра Сергеевна

Защита состоится « 18 » июня 2026 г. в 09-00 часов на заседании  
Государственной аттестационной комиссии в ФГБОУ ВПО «КНАГУ» по  
адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ФГБОУ ВПО  
«КНАГУ», ауд. 124 - 2 корпус.

Автореферат разослан 11 июня 2025 г.

Секретарь ГЭК

А. Г. Серебrenникова

## Введение

**Актуальность.** Тепловые электростанции (ТЭС) обеспечивают более 60% установленной мощности энергосистемы РФ. Программы развития электроэнергетики до 2029 года предусматривают ввод новых и модернизацию существующих мощностей. Однако эксплуатация ТЭС сопряжена с риском крупных аварий, последствия которых выходят за пределы повреждённого оборудования.

Анализ аварийности показывает, что наиболее тяжёлые последствия возникают при каскадном развитии исходного события (разрушение котла, пожар маслосистемы, взрыв топливной пыли), когда оно распространяется на соседние энергоблоки. Ключевую роль в таком распространении играет **компоновочное решение главного корпуса** — степень заблокированности энергоблоков в едином строительном объёме.

Действующие нормы регламентируют отдельные аспекты (пожарные разрывы, огнестойкость), но не содержат методики количественного сравнения вариантов компоновки с учётом вероятностных характеристик аварий и полного спектра экономических, социальных и экологических последствий. Это определяет актуальность работы.

**Цель исследования.** разработка научно обоснованной методики сравнительной оценки компоновочных решений главных корпусов ТЭС, обеспечивающей выбор варианта с минимальными суммарными последствиями крупных аварий при сохранении экономической целесообразности.

### **Задачи исследования:**

1. Ретроспективный анализ крупных аварий в главных корпусах ТЭС для установления закономерностей влияния компоновки на масштаб последствий.

2. Разработка концептуальной и вероятностной моделей распространения аварийного воздействия.
3. Формирование системы критериев оценки компоновочных решений (экономические, социальные, экологические составляющие ущерба).
4. Разработка методики сравнительной оценки альтернативных вариантов компоновки на основе интегрального показателя эквивалентных затрат.
5. Апробация методики на примере конкретного объекта и формулировка практических рекомендаций.

**Объект исследования:** главные корпуса ТЭС как сложные производственно-строительные комплексы, объёмно-планировочные решения которых влияют на развитие и последствия крупных аварий.

**Предмет исследования:** закономерности влияния компоновочных решений (степени заблокированности энергоблоков) на вероятность распространения аварийного воздействия и величину совокупного ущерба.

**Научные гипотезы:**

1. Степень заблокированности количественно определяет вероятность каскадного распространения аварии.
2. Существует оптимальное число энергоблоков в одной строительной секции, при котором суммарные эквивалентные затраты минимальны.
3. Вероятность вовлечения блока, удалённого на  $j$  позиций, убывает экспоненциально, что определяет наибольшую эффективность разблокировки при переходе от крупных секций к секциям по 2–3 блока.

**Методология и методы.**

Работа базируется на системном подходе. Используются методы: теории вероятностей и математической статистики (регрессионный анализ), вероятностного анализа безопасности (деревья событий, отказов), технико-экономического

анализа (приведённые затраты, дисконтирование), экспертных оценок. Информационная база — данные Ростехнадзора, Минэнерго РФ, материалы расследования аварий, проектная документация.

**Научная новизна:**

1. Впервые систематизирована база данных 94 крупных аварий в главных корпусах ТЭС с классификацией по типу компоновочного решения, что позволило количественно подтвердить зависимость масштаба последствий от степени заблокированности.
2. Разработана вероятностная модель распространения аварии, учитывающая число энергоблоков в здании, их позицию и наличие конструктивных барьеров.
3. Предложена система критериев оценки на основе интегрального показателя эквивалентных затрат, объединяющего капиталовложения, ожидаемый ущерб у потребителей, потери на объекте генерации и социально-экологические последствия.

Разработана методика сравнительной оценки компоновочных решений, позволяющая на стадии проектирования выбрать вариант с минимальными последствиями крупных аварий.

**Теоретическая значимость** — развитие научных представлений о механизмах каскадного распространения аварий в крупных энергетических зданиях и формирование теоретических основ для количественной оценки влияния объёмно-планировочных решений на безопасность ТЭС.

**Практическая значимость** — возможность применения методики проектными организациями при обосновании выбора компоновочного решения главного корпуса ТЭС, а также органами технического регулирования при совершенствовании нормативной базы.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерность увеличения ожидаемого числа вовлечённых энергоблоков и совокупного ущерба при росте степени заблокированности главного корпуса ТЭС.
2. Вероятностная модель распространения аварии, прогнозирующая ожидаемое число аварий с вовлечением смежных энергоблоков.
3. Система критериев и интегральный показатель эквивалентных затрат для сравнительной оценки компоновочных решений.
4. Методика сравнительной оценки компоновочных решений и практические рекомендации по выбору оптимальной степени разблокировки.

## Основная часть работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации. Сформулирована цель и задачи работы, определены новизна и практическая значимость.

**В первой главе** выполнен анализ влияния компоновочных решений на масштаб последствий аварий.

Показано, что моноблочная компоновка (4–8 блоков в одном здании) минимизирует капиталовложения, но создаёт условия для каскадного развития аварий. Полиблочная (секции по 2–3 блока) — компромиссный вариант. Разблокированная (1–2 блока в отдельном здании) обеспечивает максимальную локализацию, но увеличивает затраты на 10–25%.

На основе сформированной базы данных (94 аварии за 2000–2023 гг.) установлено, что доля аварий с вовлечением более одного блока составляет 38% при моноблочной компоновке против 5% при разблокированной (различие в 7,6 раза). Выделены три характерных сценария каскадного развития: пожар маслосистемы турбины, разрушение элемента котла с обрушением конструкций, взрыв топливной пыли.

Выявлены ограничения существующих подходов: нормативные методы не позволяют сравнивать альтернативы; вероятностный анализ безопасности требует адаптации к ТЭС; оптимизационные модели разработаны для химических производств; экономические оценки не связаны с компоновкой. Обоснована необходимость комплексной методики.

**Во второй главе** разработаны теоретические основы оценки влияния компоновочных решений.

Предложена двухуровневая модель надёжности: микроуровень (отдельный блок, инициирующее событие) и макроуровень (распространение аварии между блоками). Выделены три типа межсистемных связей:

строительные (общий каркас), технологические (коммуникации), пространственные (общий объём).

Введена степень заблокированности  $S = n \max_{i \in \{1, \dots, n\}} \{f_i\} / N$ ,  $S = n \max / N$ . Показано, что ожидаемый ущерб  $U_{ож}(S)$  монотонно возрастает с  $S$ , капиталовложения  $K(S)$  монотонно убывают, а суммарные эквивалентные затраты  $Z_{эkv}(S) = K(S) + U_{ож}(S)$  имеют U-образную форму с оптимумом.

Построена вероятностная модель распространения аварии. Пусть  $\lambda_0$  — удельная частота крупных аварий на одном блоке (0,0112 авар./ (блок·год) по статистике);  $p_1$  — вероятность перехода на ближайший соседний блок;  $\alpha$  — коэффициент затухания. Вероятность вовлечения блока на удалении  $j$  позиций:

$$p_j = p_1 \cdot \alpha^{j-1}, j=1, 2, \dots, n-1$$

Математическое ожидание числа вовлечённых блоков при аварии на блоке позиции  $i$  (в ряду из  $n$  блоков):

$$k_i = 1 + p_1 (1 - \alpha)^{-1} (2 - \alpha^{n-i} - \alpha^{i-1})$$

На основе базы аварий определены параметры:  $\lambda_0 = 0,0112$ ,  $p_1 = 0,38$ ,  $\alpha = 0,47$ . Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,94$ , что подтверждает адекватность экспоненциальной модели.

Сформирована система критериев. Интегральный показатель эквивалентных затрат:

$$Z_{эkv}(n) = K(n) + N \cdot \lambda_0 \cdot T \cdot \varphi(r, T) \cdot \sum_{k=1}^n P(k, n) \cdot [U_{потр}(k) + U_{ген}(k) + U_{соц}(k) + U_{экол}(k)]$$

где  $\varphi(r, T)$  — коэффициент среднего дисконтирования;  $U_{потр}$  — ущерб потребителям;  $U_{ген}$  — потери генерации;  $U_{соц}$  — социальные потери;  $U_{экол}$  — экологический ущерб.

Показано, что из-за экспоненциального затухания ( $\alpha \approx 0,5$ ,  $\alpha \approx 0,5$ ) вклад удалённых блоков быстро убывает, поэтому наибольший эффект разблокировки достигается при переходе от 6–8 блоков к 2–3 блокам в секции.

**В третьей главе** изложена методика сравнительной оценки.

Детализирована база данных (94 аварии). Определены параметры:  $\lambda_0 = 0,0112$  (доверительный интервал  $[0,0090; 0,0137]$ ),  $p_1 = 0,38$ ,  $\alpha = 0,47$ . Коэффициент эффективности противопожарной стены REI 150  $\beta = 0,12$  (снижает вероятность перехода в 8 раз), REI 90 —  $\beta = 0,22$ .

Разработаны расчётные зависимости для составляющих ущерба:

- **Ущерб потребителям** (удельная стоимость недоотпуска  $снэ = 95$  руб./кВт·ч):

$$U_{\text{потр}}(k) = \gamma(k) \cdot k \cdot P_{\text{бл}} \cdot t_{\text{прост}}(k) \cdot 24 \cdot снэ \cdot \mu(k)$$

где  $\gamma(k)$  — коэффициент некомпенсированного дефицита;  $\mu(k) = 1 + 0,15(k-1)$  — мультипликативный эффект.

- **Ущерб на объекте генерации** (на примере блока 300 МВт, стоимость основного оборудования 4,2 млрд руб.):

$$U_{\text{ген}}(k) = (1 - \eta_{\text{страх}}) \cdot (U_{\text{безв}}(k) + U_{\text{восст}}(k)) + U_{\text{выг}}(k)$$

с дифференцированными коэффициентами повреждения в зависимости от удалённости  $j$  (аварийный блок:  $\delta_{\text{безвосн}} = 0,35$ ; ближайший сосед:  $0,08$  и  $0,20$  соответственно).

- **Социальные потери** (стоимость жизни  $С_{\text{жизнь}} = 72,0$  млн руб.):

$$U_{\text{соц}}(k) = 0,15 \cdot k \cdot 1,6 \cdot 72,0 + 1,8 \cdot k \cdot 1,3 \cdot 8,5 \text{ (млн руб.)}$$

- **Экологический ущерб** (объём маслосистемы 30 м<sup>3</sup>, удельный ущерб 850 тыс. руб./м<sup>3</sup>).

Определён прирост капиталовложений при разблокировке:  $\Delta K_{\text{секц}}=1180$  млн руб. на каждую дополнительную секцию (для блока 300 МВт). Полная разблокировка станции 8×300 МВт увеличивает капиталовложения на 22,8%, а вариант 2×4 — лишь на 3,7%.

**В четвертой главе** выполнена практическая апробация.

Разработан алгоритм из 7 этапов: 1) исходные данные (N, P\_бл, T); 2) допустимые варианты компоновки; 3) параметры модели; 4) вероятностные характеристики; 5) составляющие ущерба; 6) интегральный показатель; 7) анализ чувствительности.

Апробация выполнена для ГРЭС 8×300 МВт. Рассмотрены 4 варианта: А (1×8, моноблочная), Б (2×4, полиблочная), В (4×2), Г (8×1, разблокированная).

**Результаты расчёта:**

Вариант	Капвложения, млрд руб.	Ожидаемый ущерб, млрд руб.	З_эkv, млрд руб.	Ранг
А (1×8)	31,90	6,75	38,65	3
Б (2×4)	33,08	4,15	37,23	1
В (4×2)	35,44	3,11	38,55	2
Г (8×1)	39,16	1,44	40,60	4

**Оптимальным признан вариант Б (2×4).** Экономический эффект по сравнению с моноблочной компоновкой — 1,42 млрд руб. (3,7%) за счёт умеренного роста капвложений (+3,7%) и снижения ожидаемого ущерба на 38,5%. Переход к варианту Б снижает ожидаемое число пострадавших за 30 лет на 41% (с 0,82 до 0,48 погибших, с 8,4 до 5,1 травмированных).

Анализ чувствительности показал, что вариант Б остаётся оптимальным в широком диапазоне параметров. Моноблочная компоновка предпочтительна лишь при  $p_1 < 0,20$  (аномально низкая вероятность перехода). Полная разблокировка не оптимальна ни при каких рассмотренных условиях.

**Практические рекомендации:** для большинства крупных ТЭС (4 и более блоков мощностью свыше 150 МВт) рекомендуется полиблочная компоновка с секциями по 2–3 блока. Полная разблокировка экономически нецелесообразна.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы, указаны направления дальнейших исследований (расширение базы данных, переход к двумерной модели распространения, интеграция с BIM, учёт внешних воздействий, адаптация к модернизации).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. **Впервые** систематизирована база данных 94 крупных аварий в главных корпусах ТЭС с классификацией по типу компоновки. Установлено, что доля каскадных аварий при моноблочной компоновке составляет 38%, при разблокированной — 5% (различие в 7,6 раза). Это количественно подтверждает решающее влияние степени заблокированности на масштаб последствий.
2. Разработана **вероятностная модель распространения аварии**, устанавливающая аналитическую зависимость ожидаемого числа вовлечённых блоков от числа блоков в секции, вероятности перехода, коэффициента затухания и позиции блока. Параметры модели определены статистически:  $\lambda_0=0,0112$ ,  $\lambda_0=0,0112$  авар./ (блок·год),  $p_1=0,38$ ,  $p_1=0,38$ ,  $\alpha=0,47$ ,  $\alpha=0,47$ . Коэффициент детерминации  $R^2=0,94$ ,  $R^2=0,94$ .
3. Предложена **система критериев** на основе интегрального показателя эквивалентных затрат, объединяющего капиталовложения и ожидаемый приведённый ущерб (потери потребителей, генерации, социальные, экологические). Показано, что наибольший эффект разблокировки достигается при переходе от секций 6–8 блоков к секциям 2–3 блока.
4. Разработана **комплексная методика** сравнительной оценки компоновочных решений, включающая: формирование базы данных, вероятностное моделирование, расчёт составляющих ущерба (с конкретными коэффициентами:  $с_{нэ}=95$ ,  $с_{нэ}=95$  руб./ (кВт·ч),  $\Delta K_{секц}=1180$ ,  $\Delta K_{секц}=1180$  млн руб.), интегральный критерий и анализ чувствительности. Методика реализована в виде алгоритма и программного модуля в MS Excel.
5. **Апробация** на примере ГРЭС 8×300 МВт показала, что оптимальным является вариант полиблочной компоновки 2×4. Экономический эффект — 1,42 млрд руб. (3,7%) по сравнению с традиционной

моноблочной при снижении ожидаемого числа пострадавших на 41%. Анализ чувствительности подтвердил устойчивость результата.

**6. Практические рекомендации:** для ТЭС с числом блоков  $\geq 4$  и единичной мощностью  $>150$  МВт предпочтительна полиблочная компоновка (2–3 блока в секции). Полная разблокировка не рекомендуется. Методика может использоваться проектными организациями при обосновании инвестиций и разработке проектной документации.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанная методика позволяет на стадии проектирования количественно обосновать выбор компоновочного решения главного корпуса ТЭС, балансируя между капиталовложениями и риском каскадных аварий. Результаты работы могут быть использованы проектными организациями, органами экспертизы и при совершенствовании нормативно-технической базы в области промышленной и пожарной безопасности объектов тепловой энергетики.