

УДК 621.039.58

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.02>

Оригинальная статья / Original paper

Подход к оптимизации времени инициации мер по защите населения при авариях на АЭС

А.В. Любарский¹, А.В. Михалев^{1,2}, Г.В. Токмачев¹

¹ АО «Атомэнергoproект»,
105082 Россия, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1

² НИУ «МЭИ»,
111250 Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр.1

Реферат. Предложен подход, основанный на оптимизации времени для принятия решения об организации мер по защите населения (эвакуации) при авариях на АЭС. Обсуждена современная концепция эвакуации в случае аварии на АЭС, которая отталкивается от величин доз, измеренных на территории АЭС и за ее пределами. Показано, что сохранение устоявшейся практики определения момента начала реализации мер по защите населения неоптимально для энергоблоков поколения III+. Время, требуемое для эвакуации населения, является одним из наиболее значимых параметров в вопросе определения оптимального времени начала реализации мер по защите населения. Приведены ориентировочные коэффициенты, на которые может умножаться значение этого времени для упрощенной консервативной переоценки. Обсуждено возможное уточнение концепции эвакуации для ВВЭР-1200. Основным аспектом уточнения концепции эвакуации является определение оптимального момента начала эвакуации для сценария аварии, при котором возможен выход радиоактивных элементов за пределы герметичной оболочки. Показано, что для определения оптимального момента начала эвакуации следует учитывать ряд факторов, прямо или косвенно влияющих на необходимость принятия решения о начале эвакуации. Представлен подход к определению момента начала эвакуации для АЭС ВВЭР-1200. Предложены подходы к оценке ряда параметров, требуемых для реализации предлагаемой концепции.

Ключевые слова: атомная электростанция, авария, защита населения, начало эвакуации, требуемое время, оптимизация.

Для цитирования: Любарский А.В., Михалев А.В., Токмачев Г.В. Подход к оптимизации времени инициации мер по защите населения при авариях на АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:18–32. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.02>

Введение

Современные требования к безопасности объекта использования атомной энергии включают в себя пять уровней глубоко эшелонированной защиты (ГЭЗ), направленных на защиту персонала и населения, проживающего вблизи объекта. При этом уровнем пять ГЭЗ является противоаварийное планирование, в рамках которого определяются меры по защите населения и территорий, на которых они осуществляются. В [1] показаны зоны противоаварийного планирования и расстояния, принятые для этих зон в разных странах. Утверждается, что размеры зон противоаварийного планирования в разных странах существенно различаются, например, размер зоны планирования эвакуации находится в диапазоне от пяти до 50 км, а зона ограничения потребления загрязненных радионуклидами продуктов питания от 50 до 300 км.

Одной из ключевых мер по защите населения является его эвакуация. Современная концепция эвакуации в случае аварии на атомной электростанции (АЭС), в основном, отталкивается от величин доз, измеренных на территории АЭС и за ее пределами. Так в соответствии с НП-005-16 [2] состояния «Аварийная готовность» или «Аварийная обстановка» на АЭС объявляются, если

- превышаются установленные значения мощностей доз в помещениях и на территории АЭС, в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) и зоне наблюдения или
- происходит нарушение пределов и (или) условий безопасной эксплуатации из-за внешнего воздействия природного и (или) техногенного происхождения, нарушившего нормальную работу систем и (или) элементов, важных для безопасности или
- введены в действие административным руководством АЭС руководства по управлению запроектными авариями и (или) руководства по управлению тяжелыми авариями.

Однако объявление ситуаций «Аварийная готовность» и «Аварийная обстановка» не является сигналом для начала эвакуации населения. Требования НП-005-16 [2] относятся лишь к персоналу АЭС, но не к населению, проживающему в зоне планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ). Согласно п. 12 [2], после объявления на АЭС состояний «Аварийная готовность» и (или) «Аварийная обстановка» и введения в действие плана мероприятий по защите персонала информация об этом должна быть только доведена до соответствующих органов единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Также не реже одного раза в сутки должен информироваться Ростехнадзор РФ и уполномоченный орган управления использованием атомной энергии о радиационной обстановке, осуществляемых мерах по обеспечению безопасности и принимаемых мерах оказания помощи АЭС.

Фактически, в РФ вопрос о необходимости начала реализации мер по защите населения (например, эвакуации) решается уполномоченными лицами административного аппарата области (например, губернатором) при экспертной поддержке кризисных центров (ИБРАЭ, ВНИИАЭС), способных дать оценку ситуации на энергоблоке АЭС и прогнозировать дальнейшее изменение значений доз за пределами площадки АЭС. При этом четких критериев объявления той же эвакуации в нормативной документации РФ нет.

Схожий подход предлагает к использованию зарубежная нормативная документация, в частности, общие требования безопасности № GSR Part 7 [3] устанавливают однозначные значения доз, измеренные или прогнозируемые, при достижении которых предполагается осуществлять действия по защите населения, включающие в себя различные меры – от ограничения потребления продуктов питания в рассматриваемом регионе до полной эвакуации и переселения населения [3].

Концепция эвакуации населения

Существующая концепция мер по защите населения при аварии на АЭС предполагает, что начало реализации мер по защите населения (в том числе эвакуация как наиболее эффективная) объявляется после начала тяжелой аварии и после выхода продуктов деления в окружающую среду (за пределы герметичной оболочки (ГО)), как показано на рис. 1.

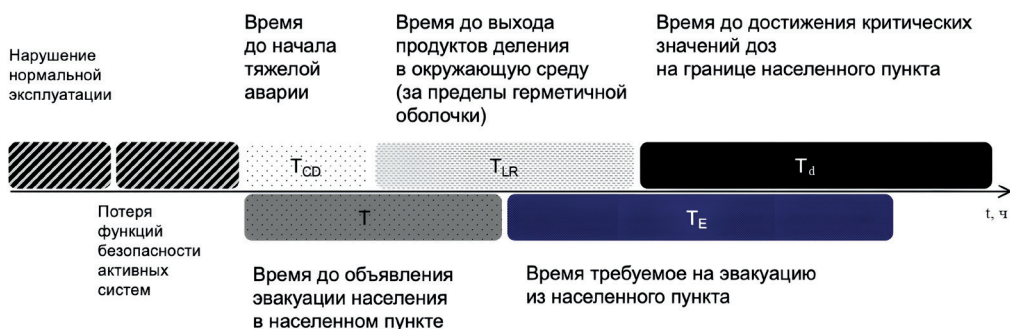


Рис. 1. Временные интервалы, важные для оценки располагаемого времени для организации мер по защите населения при тяжелой аварии

Такой подход непротиворечив для большинства действующих энергоблоков АЭС (как в России, так и за рубежом), поскольку отвод тепловыделений от активной зоны практически полностью основан на использовании активных систем безопасности (СБ) и задержка по времени между потерей функций безопасности, выполняемых активными СБ, и последующим повреждением ядерного топлива в активной зоне, приводящем к повышению радиационного фона до «триггерного» уровня, невелика (на реакторах ВВЭР-1000/320 тяжелая авария начинается уже через четыре часа после аварии с полным обесточиванием и через два часа при средней течи при потере активной части системы аварийного охлаждения активной зоны реактора (САОЗ), а реализация защитных мер начинается с незначительной задержкой после возникновения предпосылок для этого).

В отличие от большинства действующих энергоблоков АЭС с реакторами поколения III+ (например, ВВЭР-1200) имеют больший набор мер по управлению авариями, включая пассивные системы и больший запас теплоносителя:

- в авариях без течей теплоносителя 1-го контура запас времени до повреждения ядерного топлива за счет отвода тепла через систему пассивного отвода тепла (СПОТ) фактически ограничен только из-за проектных утечек теплоносителя; у операторов

имеется не менее 30-ти суток на восстановление отвода тепла штатными средствами и, тем более, у аварийно-спасательных служб имеется огромный запас времени на осуществление эвакуации (если такое решение будет принято – вопрос о необходимости эвакуации в этом случае может не возникнуть, если стабильно поддерживается запас теплоносителя в первом и втором контурах);

- в авариях с плотным первым контуром запас времени до повреждения топлива равен или существенно превышает 24 часа за счет залива воды из гидроемкостей (ГЕ) 1, 2 и 3 ступеней и работы СПОТ (в зависимости от диаметра течи и наличия или отсутствия ГЕ третьей ступени) даже при отказе активных систем САОЗ. У операторов имеется не менее суток на восстановление отвода тепла штатными средствами, а примерно тот же резерв времени имеют аварийно-спасательные службы на осуществление эвакуации (если такое решение будет принято – в этом случае вопрос о необходимости эвакуации может возникать как немедленно после возникновения исходного события (ИС), так и с существенной задержкой в зависимости от состояния СБ).

Очевидно, что сохранение существующей практики определения момента начала реализации мер по защите населения неоптимально для энергоблоков АЭС поколения III+, в первую очередь из-за того, что на этих энергоблоках АЭС время от момента возникновения предпосылок для реализации мер по защите населения до начала тяжелой аварии и выхода продуктов деления в окружающую среду значительно выше, чем на энергоблоках ВВЭР-1000/320 из-за наличия пассивных систем, соответственно, имеется потенциально существенно больший запас времени на осуществление мер по защите населения.

Своевременное объявление начала реализации мер по защите населения позволит более эффективно использовать ресурсы, избежать стрессовых ситуаций, пробок, паники и прочих негативных явлений, которые могут приводить к достаточно высокому количеству жертв среди населения, особенно, в случае его экстренной эвакуации.

В то же время преждевременное объявление начала реализации мер по защите населения и, особенно, эвакуация имеют существенные недостатки, так как эвакуация не только несет угрозу для жизни и здоровья населения¹, но и связана с большими экономическими потерями.

Для энергоблоков АЭС поколения III+ вероятность преждевременного объявления начала мер по защите населения особенно высока из-за широкого спектра доступных мер по восстановлению функций безопасности (ФБ), обеспеченных большим запасом времени. С одной стороны, если меры по восстановлению ФБ могут быть реализованы до наступления критических последствий для населения, то реализация мер по защите населения приведет к неоправданным рискам для здоровья населения и экономическим потерям. С другой стороны, отложенные меры по защите населения могут привести к недопустимому риску негативных радиационных последствий для населения, если вероятность реализации мер по восстановлению ФБ недостаточно обоснована.

Можно сделать вывод, что практикуемая концепция реализации мер по защите населения неоптимальна для АЭС нового поколения и требует существенной доработ-

¹ Опыт экстренной эвакуации при стихийных бедствиях и даже при экстренном перемещении в укрытия при военных конфликтах показывает значительное количество летальных исходов из-за возникающей стрессовой ситуации.

ки с целью оптимизации стратегии принятия решения как о самих мерах по защите населения от радиационного воздействия, так и о моменте начала реализации мер.

Эвакуация населения является наиболее эффективной мерой по защите населения с точки зрения минимизации радиационного риска, но при этом и наиболее сложно реализуемой, затратной и вносящей риск негативных последствий для жизни и здоровья населения. Поэтому ниже предложены подходы к формированию концепции именно эвакуации населения для аварий на АЭС нового поколения.

Оценка времени, требуемого для эвакуации

Время, требуемое для эвакуации населения при аварии из населенного пункта (T_E), является одним из наиболее значимых параметров в вопросе определения оптимального времени начала реализации мер по защите населения, т.е. эвакуации. Данный параметр фактически определяет самое позднее время объявления эвакуации при аварии, поскольку дальнейшее промедление приведет к неминуемому переоблучению населения и повысит вероятность невыполнения целевого ориентира по вероятности большого аварийного выброса (БАВ), установленного в п. 1.2.17 НП-001-15 [4]. T_E должно оцениваться исходя из разработанных планов эвакуации населения с учетом специфики конкретного сценария².

Так, если ИС и сама авария не влияют на пути эвакуации или готовность соответствующих служб организовать эвакуацию, то T_E оценивается без учета влияния специфики сценария (базовое значение T_E), в противном случае выполняется оценка такого влияния (например, влияние техногенного или природного воздействия).

Примеры возможного влияния специфики сценариев приведены в табл. 1. Там же приведены ориентировочные коэффициенты K , на которые может умножаться базовое значение T_E для упрощенной консервативной оценки. Коэффициенты определены экспертно и должны уточняться с учетом условий местности в районе населенных пунктов. В таблице 1 учитывается также влияние времени суток в момент начала эвакуации.

Следует отметить следующие аспекты.

1. На эффективность эвакуации влияют сезон и погодные условия в районе зоны эвакуации (в зимний период – снежные заносы на дорогах, в летнее время – перегрев оборудования, используемого при эвакуации из-за высокой температуры в условиях длительного его использования, в весенне-осенний периоды – наводнения, ураганы и т.п.). Во многом эти условия влияют на доступность дорожной сети, что является основой при оценке времени, требуемого для эвакуации. Подробно влияние погодных условий описано в NUREG/CR-7002 [5]. В частности, небольшой снег или дождь могут привести к снижению пропускной способности проезжих частей на 25%. Для реалистичной оценки времени эвакуации населения и при применении концепции эвакуации к конкретной площадке АЭС с определенными условиями следует детально учитывать влияние таких факторов. В рамках данного исследования с целью упроще-

² Под этим термином при оценке T_E понимаются условия, при которых развивается сценарий аварии, влияющий на эффективность выполнения плана эвакуации населения, в первую очередь ИС, вызвавшее аварию.

Таблица 1

Учет специфики сценариев при оценке T_E

Специфика сценария	Время выброса	Возможное влияние на эффективность эвакуации	Меры по компенсации влияния специфики сценария	K
Выброс вызван ИС, связанными: 1) с обесточиванием внешней сети с землетрясением 2) землетрясение интенсивностью, не приводящей к нарушению инфраструктуры и путей эвакуации (предполагается потеря энергосистемы)	Дневное время суток	Ухудшение работы системы оповещения	Меры не приняты	1,5
			Система оповещения запитана от независимого источника	1
	Ночное время суток	Ухудшение работы системы оповещения. Замедление движения транспорта	Меры не приняты	2
			Система оповещения запитана от независимого источника. Обеспечено сопровождение транспорта и аварийное освещение эвакуационных путей.	1,2
Выброс вызван ИС, которые связаны с землетрясением интенсивностью, приводящей к нарушению инфраструктуры и путей эвакуации (также предполагается потеря энергосистемы)	Дневное время суток	Ухудшение работы системы оповещения. Паника населения. Разрушение эвакуационных путей.	Меры не приняты	5–10 ⁽¹⁾
			Система оповещения запитана от независимого источника	4–8 ⁽¹⁾
			Система оповещения запитана от независимого источника. Эвакуационные пути рассчитаны на землетрясение соответствующей интенсивности	1,5
	Ночное время суток	Ухудшение работы системы оповещения. Паника населения. Разрушение эвакуационных путей	Меры не приняты	6–12 ⁽¹⁾
			Система оповещения запитана от независимого источника	5–10 ⁽¹⁾
			Система оповещения запитана от независимого источника. Обеспечено сопровождение транспорта и аварийное освещение эвакуационных путей.	3–7 ⁽¹⁾
			Система оповещения запитана от независимого источника. Обеспечено сопровождение транспорта и аварийное освещение эвакуационных путей. Эвакуационные пути рассчитаны на землетрясение соответствующей интенсивности	2
⁽¹⁾ – в зависимости от интенсивности землетрясения: нижнее значение для максимального расчетного землетрясения (МРЗ), верхнее – для 1,5 МРЗ.				

ния анализа в табл. 1 принято, что базовое значение T_E определено для наихудших годовых сезонных явлений, характерных для местности зоны эвакуации.

2. Внешние воздействия могут привести к авариям, приводящим к БАВ и требующим эвакуацию. Вероятностный анализ безопасности внешних воздействий для АЭС с ВВЭР-1200 в Российской Федерации показал, что вероятность тяжелых аварий при внешних воздействиях пренебрежимо мала по сравнению с внутренними ИС и ИС, вызванными сейсмическими воздействиями. Поэтому при учете специфики

сценария влияние внешних воздействий (кроме сейсмических) в данной статье не рассматривается³.

3. Опыт реальных аварий, потребовавших эвакуацию населения (авария на АЭС «Фукусима», Чернобыльская авария, аварии на химических производствах и т.п. [6]), показал, что после объявления эвакуации в населенных пунктах, в которых программа мероприятий по эвакуации населения разработана, T_E не превышает 24-х часов после объявления эвакуации. Поэтому для целей анализа используется 24 часа как базовое значение T_E для любого населенного пункта в районе АЭС.

Возможное уточнение концепции эвакуации для ВВЭР-1200

Основным аспектом уточнения концепции эвакуации является определение оптимального времени T от момента возникновения аварии до момента начала эвакуации из определенного населенного пункта для конкретного сценария аварии (при котором возможен выход радиоактивных элементов за пределы ГО, см. [7]).

Определение оптимального момента начала эвакуации сводится к задаче минимизации риска негативных потенциальных последствий тяжелых аварий:

П1. Риска негативных последствий населения из-за самого процесса эвакуации (смертельные случаи и тяжелые травмы).

П2. Риска увеличения числа смертей из-за переоблучения населения при несвоевременной эвакуации.

П3. Риска экономических потерь, связанных с самим процессом эвакуации (подготовка к организации и сам процесс эвакуации).

П4. Риска затрат на переселение населения (социальная помощь, обеспечение жильем, работой и т.п.).

П5. Риска долгосрочных экономических потерь, связанных с переоблучением населения (лечение заболеваний, выплата пособий, падение внутреннего валового продукта из-за более ранней потери трудоспособности или ранних смертей среди населения).

Для определения оптимального момента начала эвакуации следует также учитывать ряд факторов, прямо или косвенно влияющих на необходимость принятия решения о начале эвакуации:

Ф1: вероятность перехода нарушения нормальной эксплуатации в тяжелую аварию. Чем выше эта вероятность, тем более необходимо раннее принятие решения о начале эвакуации.

Ф2: запас времени на восстановление основных ФБ, в том числе системами, предназначенными для управления запроектными авариями, до перехода аварии в тяжелую стадию. Чем меньше это время, тем более необходимо раннее принятие решения о начале эвакуации.

Ф3: необходимое время на осуществление эвакуации (T_E). Чем больше времени требуется на эвакуацию, тем более необходимо раннее принятия решения о начале эвакуации.

³ Однако влияние таких воздействий на время эвакуации должно учитываться для тех мест размещения АЭС, в которых вероятны внешние воздействия, влияющие на инфраструктуру местности и условия эвакуации (например, внешние затопления, внешние пожары, ураганы, тайфуны, взрывы на газопроводах, выбросы токсичных и взрывоопасных веществ на предприятиях или с перевозимых грузов).

Указанные негативные последствия и некоторые факторы взаимосвязаны. Например, чем выше П2, тем более необходима эвакуация, что увеличивает П1 и П5. С другой стороны, чем выше П3 (т.е. по сути, чем больше средств вложено в организацию эвакуации), тем ниже П1, П2, П5. Также увеличение П3 может (но необязательно), приводить к снижению Ф3. (Базовое значение параметра Ф3 в рамках исследования предполагается постоянным, поскольку целью исследования не является оптимизация самого процесса эвакуации, тем не менее, благотворное влияние на эффективность эвакуации снижения времени, требуемого на ее проведение, очевидно).

Таким образом, оптимальная концепция эвакуации должна учитывать все перечисленные выше факторы Ф1–Ф3, но быть нацеленной на обеспечение максимально достижимого минимума негативных последствий П1–П5.

В таблице 2 приведен анализ влияния T на факторы Ф2–Ф3 и потенциальные последствия П1–П5 (T не влияет на фактор Ф1 и потери П3 и П4).

Из информации, приведенной в табл. 2, следует, что уменьшение T всегда снижает риск ранних смертей, но неоднозначно влияет на риск потерь как экономических, так и демографических.

Таблица 2

Влияние T на значения факторов

Изменение T	Влияние на Ф2	Влияние на Ф3	Влияние на П1	Влияние на П2	Влияние на П5
			Позитивное/ Негативное	Позитивное/ Негативное	Позитивное/ Негативное
Более раннее время начала эвакуации	Снижает запас времени на восстановление основных ФБ до начала эвакуации	Увеличивает запас времени для организации эвакуации	Снижает потери при эвакуации за счет разумной ее организации / Повышает вероятность преждевременной эвакуации	Снижает риск ранних смертей из-за возможности уменьшить дозовые нагрузки на население при успешной эвакуации / Нет	Снижает риск поздних заболеваний из-за возможности уменьшить дозовые нагрузки на население при успешной эвакуации / Нет
Более позднее время начала эвакуации	Увеличивает запас времени на восстановление основных ФБ до начала эвакуации	Снижает запас времени для организации эвакуации	Снижает вероятность необходимости эвакуации при успешном восстановлении ФБ / Повышает потери при эвакуации из-за ее усложнения в условиях дефицита времени	Нет/ Повышает риск ранних смертей из-за риска высоких дозовых нагрузок на население	Нет/ Повышает долгосрочные экономические потери, связанные с переоблучением населения

Качественно понятно, что если

1) $T < T_{CD}$, то вероятность того, что ФБ будут восстановлены до начала эвакуации, пренебрежимо мала, и эвакуация практически неизбежна. Однако потери, связанные с самой эвакуацией, минимизированы из-за выполнения ее в более благоприятных условиях ввиду ее начала еще до момента возникновения тяжелой аварии. Риск ранних смертей также будет мал, если $T_{CD} + T_{LR} + T_d > T_E + T$ или ФБ будут восстановлены до момента $T_{CD} + T_{LR}$ (предполагается, что восстановление ФБ предотвращает дальнейшую эскалацию аварии и ограничивает радиоактивные выбросы в окружающую среду).

$$2) T_{CD} + T_{LR} > T > T_{CD}$$

• существует вероятность, что ФБ будут восстановлены до начала эвакуации, соответственно, эвакуация не потребуется и потери, связанные как с самой эвакуацией, так и с облучением населения, будут исключены (или пренебрежимо малы);

• при невосстановлении ФБ до начала эвакуации потери, связанные с самой эвакуацией, будут велики, так как эвакуация будет выполняться в условиях ограниченного времени. При этом риск ранних смертей может быть мал, если T_E меньше T_d .

$$3) T_{CD} + T_{LR} + T_d > T > T_{CD} + T_{LR}$$

• вероятность, что ФБ будут восстановлены до начала эвакуации, велика, и в этом случае потери, связанные как с самой эвакуацией, так и с облучением населения, будут минимальны;

• при невосстановлении ФБ до начала эвакуации потери, связанные с самой эвакуацией, будут крайне велики, так как она будет выполняться в условиях крайне ограниченного времени. При этом риск ранних смертей также высок, так как запас времени до критических дозовых нагрузок мал или отсутствует.

4) $T > T_{CD} + T_{LR} + T_d$, эвакуация неизбежна, так как даже восстановление ФБ не снижает достигнутые критические значения дозовых нагрузок. Потери, связанные с эвакуацией, а также риск ранних смертей крайне высоки.

Из качественных соображений очевидно, что минимальные риски могут быть достигнуты только в первых двух рассмотренных случаях.

Существующая концепция эвакуации соответствует граничному значению случая 2), так как эвакуация начинается только после начала выхода продуктов деления за границы ГО (с некоторой задержкой на принятие решения и развертывание местных аварийно-спасательных служб). Тем не менее, эта концепция не обеспечивает минимизации риска негативных последствий, так как, по сути, полагается на возможность восстановления ФБ до достижения критических значений дозовых нагрузок (что может быть в ряде случаев избыточно оптимистичным).

Ниже представлен в виде примера для АЭС ВВЭР-1200 подход к определению момента начала эвакуации, основанный на экспертном качественном анализе, приведенном выше. В основе подхода лежит постулат, что вопрос о необходимости эвакуации рассматривается сразу и только после потери ФБ, выполняемых активными СБ. Следует отметить, что для упрощения рассматриваются не все критические ФБ, а только потеря отвода тепла от активной зоны реактора (как при герметичном, так и негерметичном 1-ом контуре). В таблице 3 приведена информация о составе активных систем, выполняющих эту ФБ для нескольких типов ИС в проекте ВВЭР-1200, систем, обеспечивающих запас времени для восстановления отказавшего оборудования, и T_{CD} – время до момента перехода аварии в тяжелую стадию при отказе активных СБ.

Логика самого подхода, реализованная в табл. 4, определяется простой формулой

$$T = \begin{cases} 0, & \text{если } T_{CD} + T_{LR} + T_d - T_E < T_b \text{ или } T_{CD} + T_{LR} + T_d - T_E < 0 \\ T_{CD} + T_{LR} + T_d - T_E, & \text{если } T_{CD} + T_{LR} + T_d - T_E > T_b. \end{cases} \quad (1)$$

Необходимо отметить, что

• таблицы 3, 4 не претендуют на полноту и иллюстрируют только подход к оценке времени начала эвакуации для нескольких категорий внутренних ИС и внешнего

Таблица 3

Системы, участвующие в выполнении ФБ

Категория ИС	Критерий потери ФБ (отказ активных СБ, выполняющих ФБ)	Системы, необходимые для обеспечения времени для восстановления	T_{CD} , ч
Большая течь первого контура (150–850 мм)	КП1: Отказ всех насосов СА03 низкого и высокого давления	Один канал системы аварийного расхолаживания или три канала СПОТ и 3/4 каналов ГЕ второй и третьей ступеней	72
Обесточивание	КП2: Отказ всех дизель-генераторов или отказ двух каналов системы аварийного расхолаживания	Три канала СПОТ в режиме поддержания давления	>720
Переходной процесс	КП3: Отказ двух каналов системы аварийного расхолаживания	Три канала СПОТ в режиме поддержания давления	>720

воздействия (землетрясение) только для реактора при работе энергоблока АЭС на мощности; аналогичный подход с небольшими модификациями может быть использован и для других категорий ИС, состояний энергоблока АЭС и источников радиоактивности;

- в таблицах 3, 4 все времена определены экспертно; при внедрении предложенного подхода в практику должна быть выполнена серия уточняющих расчетов с использованием кодов СОКРАТ-ВЗ и НОСТРАДАМУС [8, 9] для всех сценариев тяжелых аварий для оценки T_{CD} , T_{LR} и T_d .

По результатам оценки, приведенной в табл. 4, видно, что в ряде сценариев (когда $T_{CD} + T_{LR} + T_d - T_E < T_B$) принятие решения о немедленной эвакуации может быть в принципе отложено. Однако, учитывая его неизбежность, в связи с крайне низкой вероятностью восстановления ФБ, выполняемых активными системами, представляется разумным не откладывать начало эвакуации, но обеспечить менее стрессовые ситуации при ее реализации.

Подход к определению оптимального времени для инициации мер по защите населения

Время до инициации мер по защите населения при аварии в предлагаемом подходе, как показано в табл. 4 на примере эвакуации населения, существенно зависит от сценария аварии и определяется не только фактом наличия или отсутствия радиационного фона на площадке АЭС или внутри СЗЗ, но и требуемым временем на выполнение эвакуации, временем восстановления ФБ и т.п.

В общем случае, это время существенно меньше, чем время до инициации мер по защите населения при существующей концепции начала реализации этих мер (по сути, определяемой временем $T_{CD} + T_{LR}$, которое в большинстве случаев больше, чем T , приведенное в табл. 4), но гарантирует минимизацию как риска ранних смертей среди населения из-за переоблучения, так и риска негативных последствий из-за самой эвакуации.

Следует отметить, что пример реализации предлагаемого подхода, приведенный в табл. 4, не гарантирует получения оптимального значения T , но скорее консервативного его значения, позволяющего оптимизировать сам процесс эвакуации с целью повышения эффективности его результата.

Таблица 4

Пример применения концепции принятия решения
о начале эвакуации

ИС	Состояние критерия потери (КП)	Состояние систем	Среднее время восстановления активных СБ, ч	Время до радиоактивного выброса $T_{cd}+T_{LK}+T_d$, ч	T_E , ч	T , ч
Большая течь первого контура (150–850 мм)	Не достигнут КП1	–	–	–	–	– ⁽¹⁾
	Достигнут КП1	3/4 каналов ГЕ второй и третьей ступеней работоспособны	42,2	98	24	55,8
		Неработоспособны два и более каналов ГЕ второй и третьей ступеней	42,2	75	24	32,8
Обесточивание	Не достигнут КП2	–	–	–	–	– ⁽¹⁾
	Достигнут КП2	Работоспособны три канала СПОТ в режиме поддержания давления	36,7	720	24	683,3
		Неработоспособны два и более каналов СПОТ в режиме поддержания давления	36,7	24	24	$0^{(2)}$ $(T_{cd}+T_{LK}+T_d-T_E=0 \text{ ч} < T_B)$
Переходной процесс без отказа аварийной защиты реактора	Не достигнут КП3	–	–	–	–	– ⁽¹⁾
	Достигнут КП3	Работоспособны три канала СПОТ в режиме поддержания давления	46,1	720	24	673,9
		Неработоспособны два и более каналов СПОТ в режиме поддержания давления	46,1	24	24	$0^{(2)}$ $(T_{cd}+T_{LK}+T_d-T_E=0 \text{ ч} < T_B)$
Большая течь первого контура (150–800 мм), вызванная сейсмическим воздействием МРЗ в дневное время	Не достигнут КП1	–	–	–	–	– ⁽¹⁾
	Достигнут КП1	3/4 каналов ГЕ второй и третьей ступеней работоспособны	42,2	98	24	$0^{(2)}$ $(T_{cd}+T_{LK}+T_d-T_E=74 \text{ ч} < T_B)$
		Неработоспособны два и более каналов ГЕ второй и третьей ступеней	42,2	75	$24 \cdot 5^{(3)}=120$	$0^{(2)}$ $(T_{cd}+T_{LK}+T_d-T_E < 0)$
Обесточивание, вызванное сейсмическим воздействием 1,4 МРЗ в ночное время	Не достигнут КП2	–	–	–	–	– ⁽¹⁾
	Достигнут КП2	Работоспособны три канала СПОТ в режиме поддержания давления	36,7	720	$24 \cdot 12^{(4)}=288$	683,3
		Неработоспособны два и более каналов СПОТ в режиме поддержания давления	36,7	24	$24 \cdot 12^{(4)}=288$	$0^{(2)}$ $(T_{cd}+T_{LK}+T_d-T_E < 0)$
⁽¹⁾ – предполагается, что немедленная эвакуация не требуется, если КП не достигнут, так как в этом случае тяжелая авария и радиоактивный выброс предотвращаются; ⁽²⁾ – если $T_{cd}+T_{LK}+T_d-T_E$ равно или меньше 0, то предполагается необходимость немедленной эвакуации, так как в противном случен ее успешная реализация невозможна; ⁽³⁾ – см. табл. 1 для дневного времени в отсутствие принятия мер для сейсмического воздействия низкой интенсивности; ⁽⁴⁾ – см. табл. 1 для дневного времени в отсутствие принятия мер для сейсмического воздействия высокой интенсивности.						

В более точной формулировке должна быть разработана методология, позволяющая именно оптимизировать значения T (если ограничиться эвакуацией как основной мерой по защите населения), например, путем поиска T , при котором

- принимает минимальное значение функционал, интегрально описывающий потери, связанные со своевременной эвакуацией (или не эвакуацией) населения из определенного населенного пункта при конкретном сценарии аварии с учетом возможности восстановления ФБ до принятия решения об эвакуации⁴:

$$F [Pr(T_{CD}), Pr(T_{CD} + T_{LR}), T, T_{CD}, T_{LR}, T_d, T_E], \quad (2)$$

где $Pr(T_{CD})$ – вероятность восстановления ФБ за время до начала тяжелой аварии; $Pr(T_{CD} + T_{LR})$ – вероятность восстановления ФБ за время до начала выхода продуктов деления за пределы ГО;

- выполняется условие достижения целевого ориентира по вероятности раннего БАВ.

В формуле (2) присутствует ряд параметров, требующих оценки до того, как реализуется предлагаемая концепция. Ниже рассмотрены эти параметры и предложены подходы к их оценке.

T_E – подход к оценке приведен выше, а способ учета влияния внешних факторов проиллюстрирован в табл. 1. Более точное значение как функции распределения значения T_E , так и влияющих внешних факторов должно оцениваться для каждой конкретной площадки АЭС с учетом специфики работы местных органов управления, аварийно-спасательных служб, инфраструктуры, топологии, демографии и т.п. Эта работа представляется достаточно трудоемкой, но необходимой вне зависимости от того, какая концепция принятия решения о реализации мер по защите населения принята.

T_{CD}, T_{LR}, T_d – значения и их вероятностные распределения определяются по результатам детерминистических расчетов тяжелых аварий с использованием кодов типа СОКРАТ-ВЗ и НОСТРАДАМУС [8, 9].

$Pr(T_{CD}), Pr(T_{CD} + T_{LR})$ – значения определяются методами анализа надежности сложных систем для диапазона значений T_{CD} и T_{LR} .

Следует отметить, что ранний БАВ в настоящее время нормами РФ не определен и для него не установлен вероятностный целевой ориентир или критерий. Более того, само понятие «ранний БАВ» в нормах РФ не применяется. Тем не менее, предлагаемая концепция определения момента начала реализации мер по защите населения предназначена именно для минимизации вероятности раннего БАВ, определяемого как «выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду в количествах, потенциально приводящих к высокой вероятности быстрого летального исхода для наиболее уязвимого представителя населения, проживающего в районе АЭС, за время, недостаточное для организации защиты населения в условиях, при которых происходит рассматриваемый выброс». Само определение и критерии достижения раннего БАВ предложены авторами этой статьи в [10].

⁴ Опыт показывает, что быстрая эвакуация 100% населения практически не реализуема. В связи с этим, в качестве T_E корректнее рассматривать время, требуемое на эвакуацию 90% населения в населенном пункте в районе АЭС, в которых достигаются критические значения дозовых нагрузок, потенциально приводящих к быстрому летальному исходу для сценария тяжелой аварии i (в предположении, что 10% населения будут своевременно размещены в укрытиях и обеспечены другими мерами защиты).

Выводы

Предлагаемый подход, основанный на оптимизации времени для принятия решения об организации мер по защите населения (эвакуации), дополняет существующую концепцию эвакуации, но имеет ряд важных преимуществ:

- позволяет избежать эвакуации (и соответствующих рисков и затрат) в случае, когда удастся восстановить ФБ до достижения критических дозовых нагрузок;
- позволяет определить момент начала реализации мер по защите населения, повышающий эффективность их реализации, для каждого сценария тяжелой аварии с учетом его специфики;
- обеспечивает минимизацию риска быстрого летального исхода для наиболее уязвимого представителя населения, проживающего в районе АЭС.

Литература

1. О необходимости совершенствования подходов к установлению зон противоаварийного планирования объектов ядерной энергетики. Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/01/21/121197> (дата обращения: 20.05.2025).
2. НП-005-16. Положение о порядке объявления аварийной обстановки, оперативной передачи информации и организации экстренной помощи атомным станциям в случаях радиационно опасных ситуаций. Ростехнадзор РФ, Москва, 2016. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/2cd/4293755792.pdf?ysclid=m621g6otpr444075196> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Серия норм безопасности МАГАТЭ №. GSR Part 7. Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2016. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P_1708_web.pdf (дата обращения: 20.05.2025).
4. Итоговый доклад о совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности (INSAG-1). Международное агентство по атомной энергии. Вена, 1988. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/istoriya-atomnoy-energetiki_v4_2002/p145/ (дата обращения: 20.05.2025).
5. Criteria for Development of Evacuation Time Estimate Studies (NUREG/CR-7002. Rev.1). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2021. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2101/ML21013A504.pdf> (дата обращения: 20.05.2025).
6. Авария на АЭС «Фукусима-Дайити». Доклад генерального директора. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2015. URL: <https://m.eruditor.one/file/1775975/> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Любарский А.В., Токмачев Г.В., Михалев А.В., Кузьмина И.Б. К вопросу определения и практического применения вероятностных показателей безопасности, относящихся к большому аварийному выбросу. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;1:59–73. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.05>
8. Тяжелоаварийный расчетный код СОКРАТ. ИБРАЭ Российской академии наук. URL: <https://www.ibrae.ac.ru/contents/370/> (дата обращения: 20.05.2025).
9. Интегральный расчетный код (программный комплекс) НОСТРАДАМУС. ИБРАЭ Российской академии наук. URL: <https://www.ibrae.ac.ru/contents/950/> (дата обращения: 20.05.2025).
10. Любарский А.В., Токмачев Г.В., Михалев А.В. Большой ранний аварийный выброс – что это такое и нужен ли он в нормах РФ? *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;4:81–94. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.07>

Поступила в редакцию 17.02.2025

После доработки 20.05.2025

Принята к опубликованию 30.05.2025

АвторыЛюбарский Артур Вадимович, начальник управления, к.т.н.,

E-mail: Lyubarskiy_AV@aep.ru

Михалев Александр Витальевич, аспирант,

E-mail: Mikhalev_AV@aep.ru

Токмачев Геннадий Владимирович, главный специалист, к.т.н.,

E-mail: Tokmachev_GV@aep.ru

UDK 621.039.58

Approach to Optimizing the Time of Initiation of Measures to Protect the Population in the Event of Accidents at Nuclear Power Plants**Lyubarskiy A.V.¹, Mikhalev A.V.^{1, 2}, Tokmachev G.V.¹**¹ *Atomenergoproekt JSC,**7 Bld. 1 Bakuninskaya St., 105082 Moscow, Russia*² *МРЕИ,**14 Bld. 1 Krasnokazarmennaya St., 111250 Moscow, Russia***Abstract**

The article proposes an approach based on the optimization of time for making a decision on organizing measures to protect the population (evacuation) in case of accidents at NPPs. The existing concept of evacuation followed by an accident at a NPP, which is based on the dose values measured on the site of the NPP and beyond, is discussed. It is shown that maintaining the established practice of determining the moment to start implementing measures to protect the population is not optimal for power units of Generation III+. The time required to evacuate the population is one of the most significant parameters in determining the optimal time to start implementing measures to protect the population. The article provides approximate coefficients by which this time value can be multiplied for a simplified conservative reassessment. A possible clarification of the evacuation concept for WWER-1200 is discussed. The main aspect of clarifying the evacuation concept is to determine the optimal moment to start evacuation for an accident scenario in which radioactive elements may release beyond the containment. It is shown that in order to determine the optimal moment to start evacuation, a number of factors should be taken into account that directly or indirectly affect the need to make a decision to start evacuation. An approach to determining the moment of evacuation start for WWER-1200 NPPs within the framework of the existing concept is presented. An approach to determining the optimal time for initiating measures to protect the population for WWER-1200 NPPs is characterized. Approaches to assessing a number of parameters required to implement the proposed concept are considered.

Keywords: Nuclear power plant, accident, population protection, evacuation start, required time, optimization.

For citation: Lyubarskiy A.V., Mikhalev A.V., Tokmachev G.V. Approach to Optimizing the Time of Initiation of Measures to Protect the Population in the Event of Accidents at

Nuclear Power Plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:18–32. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.02> (in Russian).

References

1. On the need to improve approaches to establishing emergency planning zones for nuclear power facilities. Scientific and business portal "Atomic Energy 2.0". URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/01/21/121197> (accessed May 20, 2025) (in Russian).
2. NP-005-16. Regulation on the procedure for declaring an emergency, promptly transmitting information and organizing emergency assistance to nuclear power plants in cases of radiation hazardous situations. Rostekhnadzor of the Russian Federation, Moscow, 2016. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/2cd/4293755792.pdf?ysclid=m621g6otp444075196> (accessed May 20, 2025) (in Russian).
3. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P_1708_web.pdf (accessed May 20, 2025).
4. Summary Report on the Post-Accident Review on the Chernobyl Accident. Report INSAG-1 (International Nuclear Safety Advisory Group). International Atomic Energy Agency, Vienna, 1988. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/istoriya-atomnoy-energetiki_v4_2002/p145/ (accessed May 20, 2025).
5. Criteria for Development of Evacuation Time Estimate Studies (NUREG/CR-7002. Rev.1). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2021. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2101/ML21013A504.pdf> (accessed May 20, 2025).
6. Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. Report by the Director General. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2015. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-director-generals-report-on-fukushima-daiichi-accident> (accessed May 20, 2025).
7. Lyubarskiy A.V., Tokmachev G.V., Mikhalev A.V., Kuzmina I.B. About Definition and Practical Application of Probabilistic Safety Indicators Related to Large Accidental Release. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;1:59–73. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.05> (in Russian).
8. Severe-accident calculation code SOCRATES. Institute of the Russian Academy of Sciences for Problems of Safe Development of Nuclear Energy. URL: <https://www.ibrae.ac.ru/contents/370> (accessed May 20, 2025) (in Russian).
9. Integral calculation code (software package) NOSTRADAMUS. Institute of the Russian Academy of Sciences for Problems of Safe Development of Nuclear Energy. URL: <https://www.ibrae.ac.ru/contents/950/> (accessed May 20, 2025) (in Russian).
10. Lyubarskiy A.V., Tokmachev G.V., Mikhalev A.V. Large Early Accidental Release – What Is It and Is It Needed in RF Standards? *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;4:81–94. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.07> (in Russian).

Authors

Artur V. Lyubarskiy, Head of Division, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: Lyubarskiy_AV@aep.ru
Aleksandr V. Mikhalev, PhD student,
E-mail: Mikhalev_AV@aep.ru
Gennady V. Tokmachev, Chief Expert, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: Tokmachev_GV@aep.ru