

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИНТУИТИВНЫХ ПОНЯТИЙ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Окунев В.С.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия*

**Ключевые слова:** аварийные режимы, ядерный реактор, самозащищенность, доминирующие процессы, конкурирующие процессы, эквивалентные процессы, условно равнобезопасные компоновки.

**Аннотация.** В статье анализируется возможность математической формализации понятий, которые обычно относят к интуитивным. Это одна из основных задач теории игр. Формализованы понятия доминирующих, конкурирующих и эквивалентных процессов при наложении аварийных ситуаций. Условно равнобезопасные (или равноопасные) компоновки определены как Парето-оптимальные объекты. Работа актуальна при решении задач проектирования ядерных реакторов нового поколения.

## FORMALIZATION OF INTUITIVE CONCEPTS IN PROBLEMS OF DESIGNING NEW GENERATION SAFE NUCLEAR REACTORS

*Okunev V.S.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

**Keywords:** emergency modes, nuclear reactor, self-protection, dominant processes, competing processes, equivalent processes, conditionally equally safe layouts.

**Abstract.** The article analyzes the possibility of mathematical formalization of concepts that are usually referred to as intuitive. This is one of the main problems of game theory. The concepts of dominant, competing and equivalent processes are formalized in case of imposing emergency situations. Conditionally equally safe (or equally dangerous) arrangements are defined as Pareto-optimal objects. The work is relevant in solving the problems of designing nuclear reactors of a new generation.

Анализ безопасности ядерного реактора следует проводить на стадии концептуальной разработки [1]. Детерминистическое исключение тяжелых аварий позволит минимизировать риск недопустимых выбросов радиоактивных материалов за пределы станции практически до нуля.

Аварийные ситуации работы реактора относят к сложным динамическим процессам. Их математическое моделирование необходимо при решении задач обеспечения (включая комплексную оптимизацию параметров) и обоснования безопасности реактора и АЭС. Наиболее опасны режимы, сопровождающиеся отказом аварийной защиты (*ATWS – Anticipated Transient Without Scram* – маловероятные переходные процессы без быстрой остановки реактора). Среди них *LOCA WS – Loss of Coolant Accident Without Scram* (аварийная ситуация, инициированная потерей теплоносителя без срабатывания аварийной защиты); *LOF WS – Loss of Flow Without Scram*

(нарушение циркуляции теплоносителя (первого контура) без срабатывания аварийной защиты); *LOHS WS* – *Loss of Heat Sink Without Scram* (нарушение теплоотвода от первого контура без срабатывания аварийной защиты); *OVC WS* – *Overcooling Accident Without Scram* (переохлаждение теплоносителя первого контура без срабатывания аварийной защиты); *TOP WS* – *Transient Overpower Without Scram* (переходный режим с увеличением мощности без срабатывания аварийной защиты). Аварийные режимы работы быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем моделируют возмущения реактивности ( $\delta\rho$ ), расхода теплоносителя ( $\delta G$ ) и температуры теплоносителя на входе в активную зону ( $\delta T_{\text{вх}}$ ). Отдельно рассматривают осушение активной зоны или ее части (режим *LOCA WS*) [1]. Возмущение  $\delta\rho > 0$  соответствует режиму *TOP WS*;  $\delta G > 0$  – *OVC WS*;  $\delta G < 0$  – *LOF WS*;  $\delta T_{\text{вх}} > 0$  – *LOHS WS*;  $\delta T_{\text{вх}} < 0$  – *OVC WS*.

При наложении различных аварийных режимов возможна нейтрализация или усугубление аварийной ситуации. В комбинациях аварийных режимов какой-либо процесс может оказаться доминирующим. Аварийные режимы могут быть эквивалентными. В теории игр подобные понятия относят к интуитивным. Максимальная формализация интуитивных понятий необходима для предварительного анализа и последующего разрешения конфликтных ситуаций в задачах проектирования и обоснования безопасности ядерного реактора.

Введем некоторые определения.

**Определение 1.** Аварийный режим  $v_i$  ( $1 \leq i \leq M$ ;  $M$  – число рассматриваемых аварийных режимов) доминирует над процессом  $v_j$  ( $1 \leq j \leq M$ ), т. е.  $v_i \succ v_j$ , при их наложении  $v_i \cup v_j$ , если характер временного изменения основных функционалов безопасности (максимальных температур компонентов активной зоны, мощности и др. — выбираются на основе анализа области самозащитенности реактора [1]) при наложении  $v_i \cup v_j$  качественно не изменился по сравнению с процессом  $v_i$ , т. е. кривые изменения одних и тех же функционалов безопасности в процессе  $v_i$  и при наложении  $v_i \cup v_j$  идентичны (сходны по форме). Утверждение справедливо, если в качестве  $v_i$  и  $v_j$  рассматриваются не отдельные аварийные ситуации, а их комбинации:  $v_i = \bigcup_r v_r$  и  $v_j = \bigcup_p v_p$ , где  $r = 1, 2, \dots, R$ ;  $p = R + 1, R + 2, \dots, P$ ;

$R \leq M$ ;  $P \leq M$ . Причем допустимо существование таких  $r$  и  $p$ , что  $v_r = v_p$ . В этом случае речь идет о доминировании комбинации аварийных режимов  $v_i$  над комбинацией  $v_j$  при наложении  $v_i \cup v_j$ .

**Определение 2.** Аварийные ситуации  $v_i$  и  $v_j$  являются конкурирующими при наложении  $v_i \cup v_j$ , если характер изменения по времени  $t$  основных функционалов безопасности в режимах  $v_i$  и  $v_j$  противоположен: на одном и том же интервале времени одни возрастают, другие – убывают, т.е. вид временной зависимости хотя бы для одного из функционалов безопасности в переходных режимах, соответствующих процессам  $v_i$  и  $v_j$ , качественно не совпадает. В

этом случае производные основных функционалов безопасности по времени в любой точке кривой временной зависимости имеют разные знаки (за исключением экстремумов и установившегося режима, где производные равны нулю):

$$\text{sign} [dk_n(v_i) / dt] \neq \text{sign} [dk_n(v_j) / dt]$$

( $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $j = 1, 2, \dots, M$ ), для любых моментов времени  $t$ , определяемых из условия  $dk_n(v_m) / dt \neq 0$ . Сказанное справедливо, если  $v_i$  и  $v_j$  являются, в свою очередь, комбинациями различных процессов.

Очевидно, что при доминировании одного из конкурирующих процессов (например,  $v_i$  над  $v_j$ ) при их наложении

$$\text{sign} [dk_n(v_i \cup v_j) / dt] = \text{sign} [dk_n(v_i) / dt], \text{sign} [dk_n(v_i \cup v_j) / dt] \neq \text{sign} [dk_n(v_j) / dt].$$

**Определение 3.** Аварийные ситуации  $v_i$  и  $v_j$  являются эквивалентными ( $v_i \sim v_j$ ), если характер временного изменения основных функционалов безопасности в процессах  $v_i$  и  $v_j$  идентичен, т.е. вид зависимости этих функционалов от времени в переходных режимах, соответствующих процессам  $v_i$  и  $v_j$ , качественно совпадает. В этом случае  $\text{sign} [dk_n(v_i) / dt] = \text{sign} [dk_n(v_j) / dt]$  для моментов времени, соответствующих  $dk_n(v_m) / dt \neq 0$ . Последнее утверждение также справедливо, если  $v_i$  и  $v_j$  являются комбинациями различных процессов.

Не для всех комбинаций аварийных режимов можно определить доминирующие процессы. В зависимости от значения  $\delta\rho$ ,  $\delta G$ ,  $\delta T_{\text{вх}}$ , скорости изменения этих параметров и времени их относительного запаздывания доминирующим в комбинации  $v_i + v_j$  может оказаться как процесс  $v_i$ , так и  $v_j$ . Характерный пример – наложение режима *OVC WS*, вызванного увеличением расхода теплоносителя, и *LOHS WS*, инициированного повышением  $T_{\text{вх}}$ , в зависимости от значения возмущения (например,  $\delta T_{\text{вх}}$ ) доминирует тот или иной процесс.

Нейтрализация возможна при наложении конкурирующих процессов. Наложение эквивалентных, т.е. не являющихся конкурирующими, процессов всегда усугубляет аварийную ситуацию.

Сравнительный анализ результатов исследований различных наложений аварийных ситуаций в быстрых реакторах с различными видами топлива и теплоносителя показывает, что одной из наиболее опасных аварийных ситуаций является наложение процессов (*LOF + TOP + OVC*) *WS*, если *OVC* запаздывает по времени. Добавление процесса *LOHS WS* к этим трем смягчает ситуацию. Таким образом, возмущения  $\delta\rho$ ,  $\delta G$ ,  $\delta T_{\text{вх}}$  могут нейтрализовать друг друга, а могут и усугубить аварийную ситуацию. При нейтрализации процессов выполняется условие

$$\sum_{n=1}^N \delta\rho_n < \delta\rho_n,$$

где  $\delta\rho_n$  – изменение реактивности системы вследствие  $n$ -го возмущения,  $N$  – число возможных возмущений, инициирующих данную комбинацию аварийных режимов. Условие усугубления аварийных ситуаций

$$\sum_{n=1}^N \delta p_n > \delta p_n.$$

При  $\sum_{n=1}^N \delta p_n = \delta p_n$  наложение аварийных процессов не изменяет (не усугубляет и не нейтрализует) ситуацию.

В задачах проектирования актуален выбор единственного варианта или нескольких «равнобезопасных» компоновок из допустимого дискретного множества. Объекты такой задачи (безопасные компоновки), представленные для анализа, могут обладать разной степенью самозащищенности от разных типов аварий. Равнобезопасными, в строгом смысле этого слова, могут быть лишь тождественно одинаковые компоновки, но для принятия решений можно говорить об условной равнобезопасности или ввести термин «условно равнобезопасны».

С помощью известных методов [2-5] можно выбрать наиболее предпочтительный (эффективный или конкурирующий) объект (вариант компоновки) с точки зрения возможности обеспечения безопасности. Если таких объектов несколько и они практически неразличимы по совокупности принятых критериев многокритериальной задачи (в данном случае по безопасности), то эти варианты можно считать условно равнобезопасными.

Подмножество предпочтительных объектов многокритериальной задачи (вариантов компоновки активной зоны) можно считать оптимальными по Парето. Парето-оптимальные объекты [6] эквивалентны. Таким образом, условно равнобезопасные компоновки – Парето-оптимальные объекты многокритериальной задачи, где в качестве критериев рассматриваются функционалы безопасности, характеризующие различные аварийные ситуации. Чем больше критериев имеет задача, тем более обосновано употребление понятия «условно равнобезопасные компоновки». Если ставится задача проектирования реактора, в которой тяжелые аварии должны быть исключены детерминистически, можно предварительно исключить из рассмотрения доминируемые объекты, к которым следует отнести компоновки активной зоны, полученные при нарушении хотя бы одного из ограничений из всей совокупности ограничений для функционалов безопасности, характеризующих все наиболее опасные аварийных ситуации.

**Определение 4.** В общем случае условно равнобезопасными (равноопасными) компоновками следует считать эквивалентные объекты многокритериальной задачи, где в качестве критериев рассматриваются функционалы безопасности, характеризующие различные аварийные ситуации.

Если для данного типа проектируемой реакторной установки самозащищенность в принципе не может быть обеспечена, то эти выделенные эквивалентные объекты, вообще говоря, могут относиться и к доминируемым. Такие компоновки разумнее отнести к условно равноопасным.

### Список литературы

1. Okunev V.S. Designing of New Generation of the Nuclear Reactors // AIP Conference Proceedings. 2019, vol. 2195, pp. 020012. <https://doi.org/10.1063/1.5140112>.
2. Оуэн Г. Теория игр. – М.: Мир, 2004. – 216 с.
3. Воробьев Н.Н. Современное состояние теории игр // Успехи математических наук. – 1970. – Т. 25, №2(152). – С. 80-140.
4. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. – М.: Мир, 1970. – 708 с.
5. Льюис Р., Райфа Х. Игры и решения. – М.: 1961. – 642 с.
6. Блауг М. Экономическая мысль в ретроспективе. – М.: Академия народного хозяйства при Правительстве РФ, Дело, 1994. – 676 с.

### References

1. Okunev V.S. Designing of New Generation of the Nuclear Reactors // AIP Conference Proceedings. 2019, vol. 2195, pp. 020012. <https://doi.org/10.1063/1.5140112>.
2. Owen G. Game Theory Bingley, West Yorkshire, U.K.: Emerald Publishing; 4th edition (August 8, 2013), 500 p.
3. Vorobyov N.N. The current state of game theory // Successes of mathematical sciences. 1970. Vol. 25, no. 2(152), pp. 80-140.
4. Von Neumann J. and Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. Princeton University Press, 1944. 776 p.
5. Luce D. and Raiffa H. Games and Decisions: Introduction and Critical Survey. John Wiley & Sons Inc., 1969. 509 p.
6. Blaug M. Economic thought in retrospect. M.: Academy of National Economy under the Government of the Russian Federation, Delo, 1994. 676 p.

<b>Окунев Вячеслав Сергеевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры физики	<b>Okunev Viacheslav Sergeevich</b> – candidate of Technical sciences, associate professor at the Department of physics
okunevvs@bmstu.ru	

*Received 18.09.2022*