

УДК 621.039.56

К. Н. МАЛОВИК

Севастопольський національний університет ядерної енергії та промисловості, г. Севастополь

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ СВОЙСТВ РЕСУРСОСПОСОБНОСТІ ОБОРУДОВАНИЯ ОБ'ЄКТОВ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрена математическая формализация задачи определения структуры и взаимосвязи свойств ресурсоспособности объектов критического применения. Показана схема значений определяющих ресурсных характеристик и их зависимость от коренных причин отказов. Для исследования взаимодействия определяющих ресурсных характеристик и их влияния на ресурсоспособность объектов критического применения предложен аппарат матричного анализа.

Ключевые слова: ресурсная характеристика, ресурсоспособность, интенсивность отказов.

Анотація. В роботі розглянута математична формалізація задачі визначення структури та взаємозв'язку властивостей ресурсоспособності об'єктів критичного застосування. Показана схема значень визначальних ресурсних характеристик та їх залежність від корінних причин відмов. Для дослідження взаємодії визначають ресурсних характеристик та їх впливу на ресурсоспособність об'єктів критичного застосування запропонований апарат матричного аналізу.

Ключові слова: ресурсна характеристика, ресурсоздатність, інтенсивність відмов.

The Abstract. The paper considers the problem of determining the mathematical formalization of the structure and properties of the relationship of objects resursosposobnosti critical applications. Shows the scheme of values defining the resource characteristics and their dependence on the root causes of failures. To study the interaction of determining the resource characteristics and their impact on critical applications resursosposobnost facilities proposed unit matrix analysis.

Keywords: resource characterization, resourceability, failure rate.

Введение

Объекты критического применения (ОКП), к которым принято относить, например, атомные и тепловые электростанции, магистральные газо- и нефтепроводы, имеют вероятность создавать проблемы безопасности, из-за предрасположенности к появлению отказов и аварий оборудования, приводящих к катастрофическим последствиям. В частности, для атомных станций, известна системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов [1]. При этом в качестве одного из основных определений используется понятие ресурсоспособности как комплекса технических характеристик оборудования и трубопроводов, определяющих возможность их эксплуатации [2] (отмечается, что ресурсоспособность является характеристикой только оборудования и трубопроводов, в то время как ресурс оборудования и трубопроводов зависит от их ресурсоспособности и условий эксплуатации). К сожалению, это понятие недостаточно рассмотрено как в отечественной и зарубежной технической литературе, так и в нормативно-технической документации. При этом проблема ресурса в атомной отрасли является наиболее актуальной, что связано, как минимум, с двумя обстоятельствами:

- часть энергоблоков атомных электростанций выработали свой назначенный срок службы;
- обоснование ресурсоспособности осуществлялось 40-50 лет назад по руководящим техническим материалам того времени, которые на сегодня либо устарели, либо нуждаются в переосмыслении, с учетом как опыта эксплуатации, так и новых научных достижений.

Опыт эксплуатации технических объектов и оборудования ОКП показывает [3], что назначенные показатели долговечности для многих видов объектов весьма занижены, что приводит к преждевременному прекращению применения объектов по назначению и, как следствие, к неэффективному использованию материальных средств, затраченных на разработку, производство и эксплуатацию таких объектов. В связи с этим, задача исследования реальных характеристик ресурсоспособности и в том числе остаточной долговечности оборудования ОКП является актуальной для анализа событий, развивающихся во времени, которые типичны для обеспечения надежности технических средств, медико-биологических исследований в клинической практике и др. [4].

Постановка цели и задачи научного исследования

Целью научного исследования является выявление и сокращение недостатков в сфере оценивания ресурсоспособности оборудования ОКП. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих вопросов:

- 1) математическая формализация задачи определения структуры и взаимосвязи свойств ресурсоспособности, что позволит систематизировать свойства ресурсоспособности оборудования ОКП;
- 2) исследование схемы значений определяющих ресурсных характеристик в зависимости от коренных причин отказов оборудования ОКП;
- 3) рассмотрение квадратных матриц для определения взаимодействия ресурсных характеристик и упорядочения их влияния на ресурсоспособность оборудования ОКП.

Основные результаты

Для определения структуры и взаимосвязи свойств ресурсоспособности объектов ОКП целесообразна математическая формализация этой задачи. Для этого введены следующие обозначения: $q(i)$ – любой i -й ОКП; $i=1, \dots, n$; $Q=\{q(i)\}$ – множество ОКП; $S_q(i)$ – множество свойств i -го ОКП, образующих пространство S .

$SQ=\{Sq(i)\}$ – множество свойств i -х объектов ОКП, причем любому ОКП, ставится в соответствие множество свойств $Sq(i)$, т.е. обеспечивается условие эквивалентности

$$q(i) \Leftrightarrow Sq(i) \tag{1}$$

$Sq(ij)$ – конкретная характеристика свойств $q(i) \in Q$.

Свойства могут быть разбиты на классы $S_1, \dots, S_i, \dots, S_j, \dots, S_p, \dots, S_k$, для которых выполняется одно из следующих условий:

$$S_j \subset S_p, S_p \subset S_j, S_p \cap S_j = \emptyset. \tag{2}$$

При рассмотрении свойств ОКП целесообразно выделить первичные, вторичные и другие группы свойств S' , S'' и S''' соответственно, определяющих комплексный характер ресурсоспособности ОКП в данном случае.

В метрическом пространстве S целесообразно ввести расстояние ρ_s , которое может интерпретироваться как мера сходства или различия природы свойств, определяемых конкретными значениями характеристик d . То есть для i -го ОКП должно выполняться условие

$$\rho_s \Rightarrow \rho_d(d_k^i, d_l^i), \tag{3}$$

где $d_k^i, d_l^i \in D^i = \{d_1^i, d_2^i, \dots, d_n^i\}$,

а n - число конкретных характеристик свойств.

Тогда характеристики свойств исследуемых ОКП должны удовлетворять следующим условиям [5]:

$$\left. \begin{aligned} 1. \rho_s(S_i, S_j) < \rho_s(S_i, S_k) \\ 2. \rho_s(S_i, S_j) = \rho_s(S_j, S_i) \\ 3. \rho_s(S_i, S_j) = 0 \Leftrightarrow S_i \equiv S_j \\ 4. \rho_s(S_j, S_i) + \rho_s(S_j, S_k) \geq \rho_s(S_i, S_k) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

Использование предложенного математического подхода предполагает применение ключевых понятий и основных принципов при исследовании проблем долговечности оборудования ОКП [1-3,6-10]:

1. Принцип стохастичности ресурса объекта исходит из того, что реальное значение ресурса конкретного оборудования считается случайной величиной, определяемой соответствующим законом распределения.
2. Принцип обоснования значения ресурса оборудования из условий риска предусматривает, что требования к назначению ресурса оборудования должны назначаться исходя из условий обеспечения заданного уровня безопасности ОКП.
3. Принцип сохранения физической сущности процессов при прогнозировании ресурса состоит в том, что адекватность модели изменения процессов деградации материалов оборудования во времени, прогнозируемым процессам на интервале предыстории, сохраняется на интервале упреждений. То есть этот принцип базируется на одном из центральных фундаментальных постулатов в физике, сформулированном К.Шенноном: основные закономерности, наблюдающиеся в прошлом, будут сохранены и в будущем.
4. Принцип адекватности математических методов оценки и прогнозирования ресурса статистическим данным о работоспособности оборудования, требующий предварительного анализа содержания и объема входной (эксплуатационной) информации.
5. Принцип сочетания детерминированных, статистических, физико-статистических и экспертных методов.

6. Принцип прогнозирования индивидуального ресурса требует выполнения работ для конкретного оборудования, определяющих остаточный ресурс, характеризующий возможную продолжительность эксплуатации данного оборудования от момента контроля до предельного состояния.
7. Принцип продления назначенного ресурса предусматривает обоснование и установление нового назначенного ресурса конкретного оборудования ОКП.

Совместное применение показанного математического подхода и указанных принципов позволяет иллюстрировать результат систематизации свойств ресурсоспособности оборудования ОКП в виде, показанном на рис. 1.

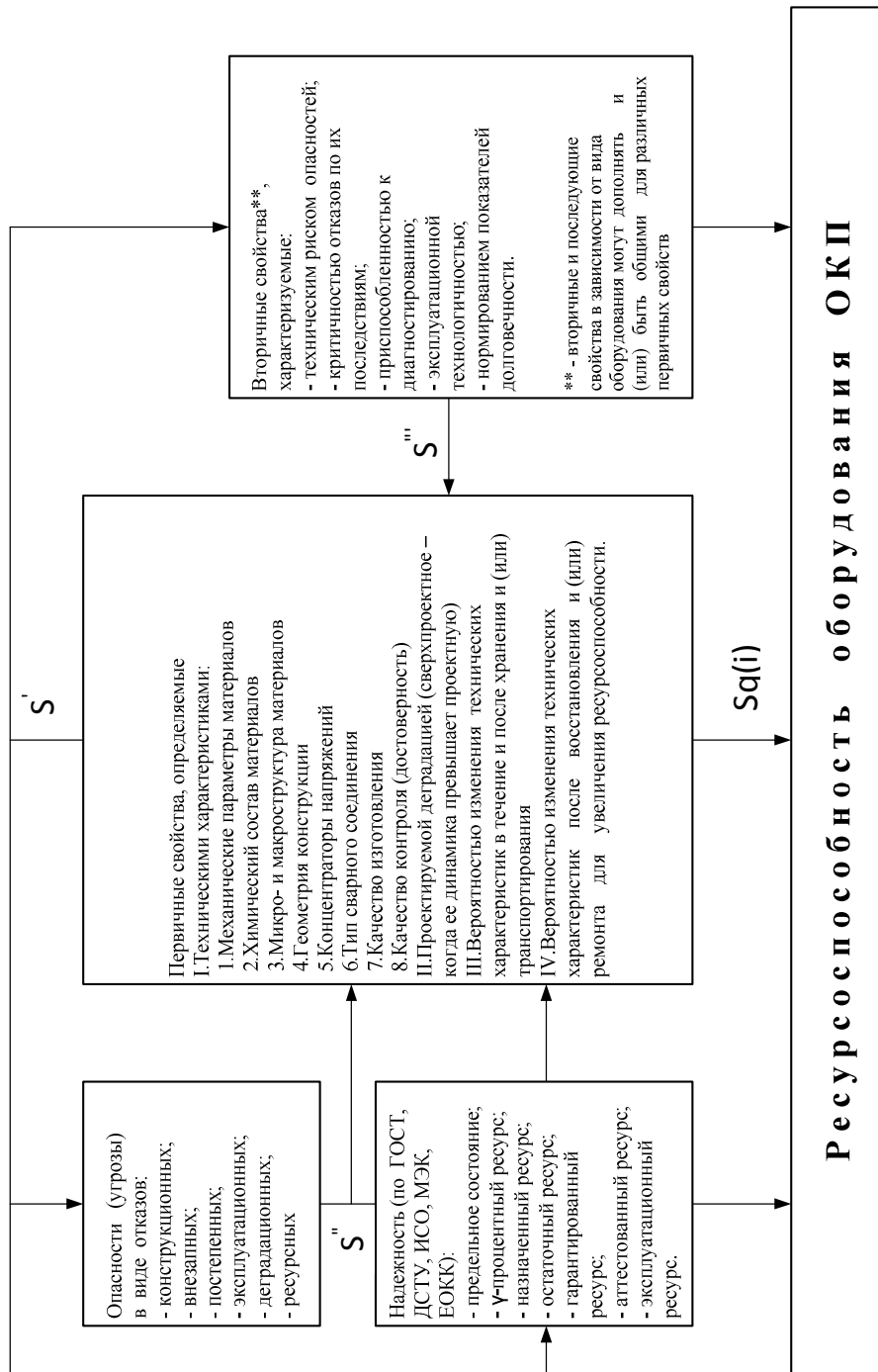


Рисунок 1 – Структура и взаимосвязь свойств ресурсоспособности

Для дальнейшего исследования ресурсоспособности оборудования ОКП можно использовать их определяющие ресурсные характеристики [6, 8, 11, 12], которые, как случайные величины, характеризуются средними значениями и дисперсиями, качественные оценки которых показаны на рис.2, где обозначено:

- \bar{T}_n - гарантированный ресурс и его допустимые отклонения ΔT_n ;
- \bar{T}_γ - γ -процентный ресурс и его допустимые отклонения ΔT_γ ;
- \bar{T}_r - технический ресурс и его допустимые отклонения ΔT_r ;
- \bar{T}_l - время предельного состояния и его допустимые отклонения ΔT_l ;
- $T_0^I \div T_0^{IV}$ - остаточный ресурс для выбранной точки его контроля;
- 1 – пессимистический прогноз;
- 2 – оптимистический прогноз;
- $\lambda(t)$ – интенсивность отказов ОКП;
- Q_γ, Q_r, Q_ℓ - соответствующие зоны допустимых отклонений $\lambda(t)$.

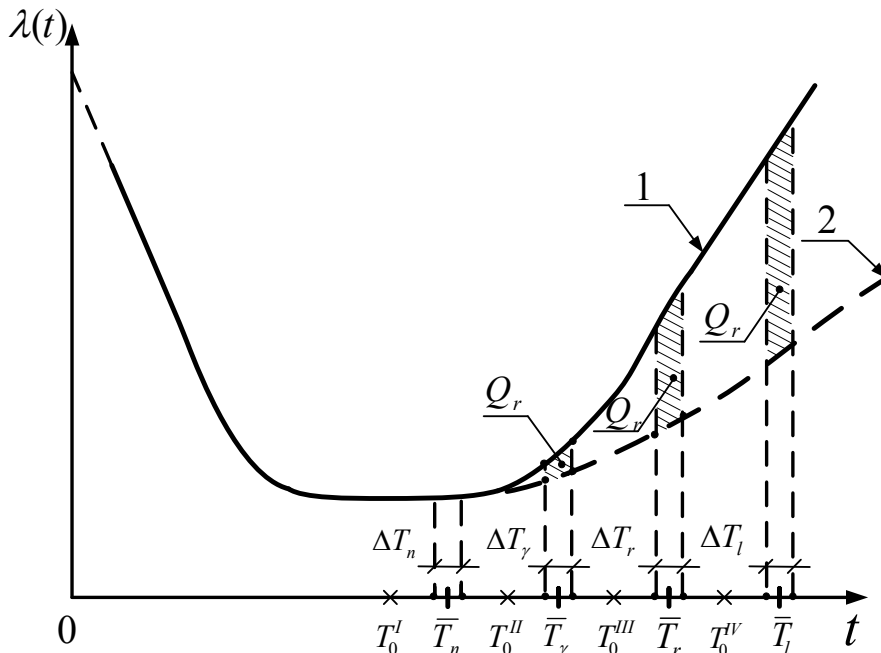


Рисунок 2 – Схема значений определяющих ресурсных характеристик оборудования ОКП

При этом, наиболее естественное толкование γ -процентного ресурса – это его отождествление с назначенным ресурсом на стадии проектирования оборудования ОКП [7]. Кроме того, желательно чтобы выполнялось условие [6]

$$T_n < T_\gamma < T_r < T_l, \tag{5}$$

при исследовании и определении коренных причин отказов ОКП [8, 13, 14], опыт эксплуатации которых позволяет предположить, что имеют место следующие зависимости:

$$\begin{aligned} T_n &= f_n(\lambda_K; \lambda_\Theta), \\ T_\gamma &= f_\gamma(\lambda_K; \lambda_\Theta; \lambda_{КП}), \\ T_r &= f_r(\lambda_K; \lambda_\Theta; \lambda_{КП}; \lambda_d), \\ T_l &= f_l(\lambda_K; \lambda_\Theta; \lambda_{КП}; \lambda_d; \lambda_p), \end{aligned} \tag{6}$$

где λ_K – интенсивность конструкционных внезапных отказов; λ_{KII} – интенсивность конструкционных постепенных отказов; λ_3 – интенсивность эксплуатационных отказов; λ_d – интенсивность деградационных отказов; λ_p – интенсивность ресурсных отказов.

Для оценки времени предельного состояния T_ℓ (рис.2) можно использовать модель Кокса [4], асимптотическую теорию вероятностей экстремальных значений [15] (развитие теории Гумбеля) и др.

Тогда для исследования ресурсоспособности оборудования ОКП с помощью оценки определяющих ресурсных характеристик можно предложить следующие квадратные матрицы:

- для случая $T_0^I < T_n$

$i \backslash j$	0	n	γ	r	l
0	a_{00}	a_{n0}	$a_{\gamma 0}$	a_{r0}	a_{l0}
n	a_{0n}	a_{nn}	$a_{\gamma n}$	a_{rn}	a_{ln}
γ	$a_{0\gamma}$	$a_{n\gamma}$	$a_{\gamma\gamma}$	$a_{r\gamma}$	$a_{l\gamma}$
r	a_{0r}	a_{nr}	$a_{\gamma r}$	a_{rr}	a_{lr}
l	a_{0l}	a_{nl}	$a_{\gamma l}$	a_{rl}	a_{ll}

(7)

- для случая $T_n < T_0^{II} < T_\gamma$

$i \backslash j$	n	0	γ	r	l
n	a_{nn}	a_{0n}	$a_{\gamma n}$	a_{rn}	a_{ln}
0	a_{no}	a_{00}	$a_{\gamma 0}$	a_{r0}	a_{l0}
γ	$a_{n\gamma}$	$a_{0\gamma}$	$a_{\gamma\gamma}$	$a_{r\gamma}$	$a_{l\gamma}$
r	a_{nr}	a_{0r}	$a_{\gamma r}$	a_{rr}	a_{lr}
l	a_{nl}	a_{0l}	$a_{\gamma l}$	a_{rl}	a_{ll}

(8)

- для случая $T_\gamma < T_0^{III} < T_r$

$i \backslash j$	n	γ	0	r	l
n	a_{nn}	$a_{\gamma n}$	a_{0n}	a_{rn}	a_{ln}
γ	$a_{n\gamma}$	$a_{\gamma\gamma}$	$a_{0\gamma}$	$a_{r\gamma}$	$a_{l\gamma}$
0	a_{no}	$a_{\gamma 0}$	a_{00}	a_{r0}	a_{l0}
r	a_{nr}	$a_{\gamma r}$	a_{0r}	a_{rr}	a_{lr}
l	a_{nl}	$a_{\gamma l}$	a_{0l}	a_{rl}	a_{ll}

(9)

- для случая $T_r < T_0^{IV} < T_l$

$i \backslash j$	n	γ	r	0	l
n	a_{nn}	$a_{\gamma n}$	a_{rn}	a_{0n}	a_{ln}
γ	$a_{n\gamma}$	$a_{\gamma\gamma}$	$a_{r\gamma}$	$a_{0\gamma}$	$a_{l\gamma}$
r	a_{nr}	$a_{\gamma r}$	a_{rr}	a_{0r}	a_{lr}
0	a_{no}	$a_{\gamma 0}$	a_{r0}	a_{00}	a_{l0}
l	a_{nl}	$a_{\gamma l}$	a_{rl}	a_{0l}	a_{ll}

(10)

Столбцы и строки квадратных матриц (4-7) соответствуют оценкам определяющих ресурсных характеристик оборудования ОКП, а клетки (i, j) – вариантам изменения j-той определяющей ресурсной характеристики при улучшении (ухудшении) i-той определяющей ресурсной характеристики.

Следует указать, что матрица (7) характеризует зависимость гарантированного ресурса прежде всего от влияния интенсивностей отказов λ_K и $\lambda_{Э}$; матрица (8) – зависимость γ -процентного ресурса от интенсивностей отказов $\lambda_K, \lambda_{Э}$ и $\lambda_{КП}$; матрица (9) – зависимость технического ресурса от интенсивностей отказов $\lambda_K, \lambda_{Э}, \lambda_{КП}$ и λ_d ; матрица (10) – зависимость времени предельного состояния от интенсивностей отказов $\lambda_K, \lambda_{Э}, \lambda_{КП}, \lambda_d$ и λ_p .

Тогда можно проанализировать взаимодействие определяющих ресурсных характеристик, например, с помощью многомерного корреляционного анализа [15] и упорядочить (ранжировать) их влияние на ресурсоспособность оборудования ОКП.

При этом осуществляется комплексное исследование ресурсоспособности ОКП, предопределенное наличием пессимистического и оптимистического прогнозов, а также допустимыми отклонениями $\Delta T_n, \Delta T_\gamma, \Delta T_r$ и ΔT_l , что иллюстрируют для множества ОКП зоны Q_γ, Q_r, Q_l , заштрихованные на рис.2. В результате комплексного исследования предложенных определяющих ресурсных характеристик появляется возможность систематизации свойств ресурсоспособности оборудования ОКП, уточняющая методическое обоснование процессов оценивания и прогнозирования определяющих ресурсных характеристик, то есть процессов ресурсометрии. Это позволит осуществлять дальнейшее совершенствование стандартизации как в области оценивания и прогнозирования ресурсоспособности оборудования ОКП, так и процессов ресурсометрии [12, 16].

Выводы

1. Выполнена математическая формализация задачи определения и систематизации свойств ресурсоспособности оборудования ОКП.
2. Определена структура и взаимосвязи свойств ресурсоспособности оборудования ОКП.
3. Предложена совокупность квадратных матриц для анализа взаимовлияния определяющих ресурсных характеристик на ресурсоспособность оборудования ОКП.

Рекомендация

Целесообразно дальнейшее исследование и совершенствование стандартизации определяющих характеристик ресурсоспособности оборудования АЭС.

Литература

1. РД СК-1-05. Системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС. КНЦ БРАС, 2005.
2. Аркадов Г.В. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы)/Г.В.Аркадов, А.Ф.Гетман, А.Н.Родионов.-М.: Энергоатомиздат, 2010.-423 с.
3. Надежность и эффективность в технике: Справочник: 10т. /Ред. совет: В.С.Авдеевский (пред.) и др.-М.: Машиностроение, 1989.- (В пер.). т.6: Экспериментальная обработка и испытания / Под общ. ред. Р.С.Судакова, О.И.Теснина.-376 с.
4. Кокс Д.Р., Оунс Д. Анализ данных типа времени жизни / Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1988.-191 с.
5. Деза Е.И., Деза М.-М. Энциклопедический словарь расстояний / Елена Деза, Мишель-Мари Деза; [пер. с англ. В.И.Сычева]; Моск. гос. пед. ун-т; Нормальная высш. шк., Париж.-М.: Наука, 2008.
6. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций: Учебник для вузов / В.А.Острейковский.- М.: Энергоатомиздат, 1999- 928 с.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций.- М.: Машиностроение, 1984.-312 с.
8. Маловик К.Н. Системное исследование ресурсных характеристик компонентов энергоблоков АЭС / Маловик К.Н. // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2011.- Вып.4(40), с.40-51.
9. Буртаев Ю.Ф., Острейковский В.А, Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации.-М.: Энергоатомиздат, 1995.-240 с.
10. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Международное агентство по атомной энергии.- Вена, 2008 г.
11. Антонов А.В.Статистические модели в теории надежности: Учеб. пособие / А.В.Антонов, М.С.Никулин.-М.: Абрис, 2012.-390 с.
12. Маловик К.Н. Анализ ресурсных характеристик при неоднородном потоке отказов / К.Н. Маловик // Методи та прилади контролю якості.- Івано-Франківськ, 2011.-№26, с.85-89.

13. МТ-Т.0.08.117-05. Методика расчета показателей надежности приводов трубопроводной арматуры.
14. МТ-Т.0.08.118-05. Методика статистического анализа надежности средств контроля и управления систем, важных для безопасности АЭС.
15. Введение в статистику экстремальных значений и ее приложение. Монография / В.А. Акимов, А.А.Быков, Е.Ю.Щетинин. МЧС России.-М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009.-524 с.
16. Маловик К.Н. Стандартизация ресурсных характеристик оборудования АЭС. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Аннотация докладов. В 3 томах. Т.1. Инновационные ядерные технологии. Высокие технологии в медицине. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.-308 с.

Відомості про автора

Маловик Костянтин Миколайович – к.т.н., доцент, професор Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості (СНУЯЕ та П), директор інституту нанотехнологій, інформаційно-вимірювальних і спеціалізованих комп'ютеризованих систем в енергетиці. Службова адреса: 99015, м. Севастополь, вул. Курчатова 7, Севастопольський національний університет ядерної енергії та промисловості, Телефон/факс робочий: (0692) 71-01-80, E-mail: tmp2@sinp.com.ua, konstmalovik@mail.ru