

# МАТЕРИАЛО- ВЕДЧЕСКО- ПРОГНОЗНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ КОРПУСА ВОДО- ВОДЯНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

**А. Н. Одейчук**

Кандидат технических наук, научный сотрудник  
Научный производственный комплекс  
«Возобновляемые источники энергии и  
ресурсосберегающие технологии»  
Национальный научный центр «Харьковский  
физико-технический институт»  
ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108  
E-mail: anodeychuk@kipt.kharkov.ua

*У роботі запропоновано матеріалознавчо-прогнозний підхід до вибору корпусу водо-водяного ядерного реактора. Розроблено інформаційну технологію прогнозування з оцінкою ризику часових рядів, що забезпечує реалізацію запропонованого матеріалознавчо-прогнозного підходу. Виконана програмна реалізація та апробація розробленої інформаційної технології на прикладі вирішення задачі обґрунтування вибору корпусу водо-водяного ядерного реактора*

*Ключові слова: матеріалознавчо-прогнозний підхід, корпус ядерного реактора, корпусна сталь, інформаційна технологія, часові ряди*

*В работе предложен материаловедческо-прогнозный подход к выбору корпуса водо-водяного ядерного реактора. Разработана информационная технология прогнозирования с оценкой риска временных рядов, обеспечивающая реализацию предложенного материаловедческо-прогнозного подхода. Выполнена программная реализация и апробация разработанной информационной технологии на примере решения задачи обоснования выбора корпуса водо-водяного ядерного реактора*

*Ключевые слова: материаловедческо-прогнозный подход, корпус ядерного реактора, корпусная сталь, информационная технология, временные ряды*

## 1. Введение

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на развитие любой реакторной технологии, является экономика. Данный фактор, а именно капитальные затраты, является одним из существенных препятствий на пути к широкому коммерческому внедрению современных ядерных реакторов. Это обусловлено тем, что проектирование, строительство и эксплуатация ядерных энергетических установок (ЯЭУ) изначально сопряжены с высокими капитальными затратами. Основные капитальные затраты: корпус реактора, внутрикорпусные элементы, трубопроводные магистрали и т. д., которые изготавливаются из радиационно-стойких сталей и сплавов.

Основу ядерной энергетики Украины составляют водо-водяные ядерные реакторы типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 российского производства, которые позволяют производить до 50 % электроэнергии в год в стране [1].

Ввиду отсутствия в Украине собственной инфраструктуры производства промышленных ядерных реакторов, «Стратегией развития ядерной энергетики в Украине на период до 2030 года», предлагается при расширении парка новых ядерных реакторов в Украине ориентироваться и на зарубежный рынок. В частности, применять водо-водяные реакторы российского производства, а также, возможно, и других

производителей при наличии конкурентных предложений.

В современной мировой ядерной энергетике успешно развиваются и имеют высокие эксплуатационные показатели также водо-водяные ядерные реакторы зарубежных производителей, таких как Westinghouse (4-Loop Plant, США), ARIVA (French 4-Loop N4 Type Plants, Франция), SIEMENS (German Konvoi Design Values, ФРГ) и др.

Поэтому при рассмотрении предложений и выборе конкретного производителя ЯЭУ для Украины целесообразно проанализировать все возможные варианты конструкционного исполнения предлагаемых ядерных реакторов, а также рассмотреть их экономическую составляющую.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Одним из путей коммерчески целесообразного продвижения ЯЭУ является сокращение капитальных затрат путем упрощения и улучшения проектов ЯЭУ при использовании усовершенствованных конструкционных материалов, что является доступным средством создания экономичных ядерных реакторов.

Важно отметить, что колебания рынка стоимости сырья, а именно, рост стоимости сырья, также окажут

большое влияние на стоимость компонентов ЯЭУ. Например, нержавеющая сталь состоит, прежде всего, из хрома (12–18) %, никеля (8–15) % и железа. Недавние увеличения цены никеля оказали существенное влияние на рост стоимости нержавеющей стали (почти на порядок). Поэтому выбор конструкционных материалов для будущих ЯЭУ со сбалансированным по экономическим параметрам составом может позволить существенно сократить капитальные затраты проектов ядерных реакторов.

Одним из основных и материалоемких компонентов ядерного реактора является корпус реактора. В настоящее время выбор корпуса ядерного реактора выполняется, в основном, исходя из обширного комплекса параметров, обеспечивающих его работоспособность в сложных условиях радиационного облучения и влияния температурных, химических, физико-механических и других факторов [2].

В тоже время, является достаточно важным уделять большое внимание и экономической составляющей, которая изменяется во времени. Строительство ЯЭУ занимает от 5 до 12 лет [3] и на момент строительства экономические характеристики элементов ЯЭУ могут измениться относительно первоначальных оценок и существенно повлиять на конечную смету затрат реализации проекта.

В литературе вопросу обоснования выбора ядерного реактора с учетом экономической составляющей практически не уделялось внимания. Отчасти проблема выбора корпуса ядерного реактора рассматривается J. T. Busby в работе [4], однако основное внимание автора сосредоточено на замещении текущей стали ЯЭУ более дешевым аналогом, исходя из текущих цен на сталь. Вопрос, связанный с изменением стоимости во времени компонентов ЯЭУ и ее прогнозирование, в работе не рассматривался.

Для обоснования экономически целесообразного выбора компонентов ЯЭУ, в частности, корпуса ядерного реактора, нами в данной работе предлагается материаловедческо-прогнозный подход. Этот подход заключается в прогнозировании стоимости компонентов, входящих в состав корпусных сталей, представляемых в виде нестационарных временных рядов (НВР) и, на их основе, определении прогнозной стоимости корпуса ядерного реактора, проведении анализа, формулировании выводов и рекомендаций.

Существует большое количество методов прогнозирования, однако их область применения ограничена предпосылками и предположениями, лежащими в их основе [5–7]. Поэтому прогнозирование является наукоёмкой процедурой. Прогнозирование требует для своей реализации создания соответствующих информационных технологий (ИТ), позволяющих обеспечить формирование мощной основы для построения прогноза, благодаря комплексному подходу, который охватывает сбор, хранение, обработку и передачу прогноза.

Кроме того, прогнозирование связано с немалым риском и неопределенностью, даже при наличии современных компьютеров и специального программного обеспечения. Существующие подходы к прогнозированию практически обходят задачу учета риска построенного прогноза. Это может привести к негативным последствиям.

Разработка ИТ прогнозирования НВР с оценкой риска является актуальной и будет способствовать решению задачи выбора корпуса водо-водяного ядерного реактора в рамках предложенного материаловедческо-прогнозного подхода.

---

### 3. Цель и задачи исследования

---

Целью работы являлась разработка ИТ прогнозирования НВР с оценкой риска, обеспечивающая реализацию материаловедческо-прогнозного подхода к выбору корпуса водо-водяного ядерного реактора.

Задачами исследования являлись:

- разработка ИТ прогнозирования с оценкой риска НВР;
- программная реализация и апробация разработанной ИТ на примере решения задачи обоснования выбора корпуса водо-водяного ядерного реактора на основе прогнозирования стоимостных показателей исходных компонентов корпусных сталей, представляемых в виде НВР.

---

### 4. Информационная технология прогнозирования с оценкой риска нестационарных временных рядов

---

В соответствии с ГОСТ 34.003-90 [8] информационная технология является совокупностью приемов, способов и методов применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных. В работе [9] дается более развернутое определение ИТ, под которой понимается совокупность методов, производственных процессов и алгоритмов программно-технических средств, объединенных в технологическую цепочку, реализация которых обеспечивает сбор, хранение, обработку, вывод и распространение информации.

Под риском прогноза предложено понимать вероятность понести потери пользователем ИТ вследствие принятия неверного решения, основанного на прогнозе, выполненном с помощью модели прогнозирования, параметры или структура которой могли перестать соответствовать анализируемому временному ряду.

В соответствии с целью работы разработана ИТ прогнозирования нестационарных временных рядов с оценкой риска, которая, в отличие от существующих, позволяет проводить детальный анализ составляющих нестационарного временного ряда и осуществлять обоснованный переход к тому или иному методу прогнозирования, предварительно исключив из рассмотрения методы, не удовлетворяющие статистическому описанию исходных данных, а также выполнять оценку риска построенного прогноза.

Этапы ИТ представлены ниже:

Этап 1. Постановочный

На данном этапе выполняется задание: источников технико-экономической информации, представляемой в виде НВР, прогнозирования с оценкой риска которой необходимо выполнить; горизонта прогноза  $\tau$ ; множества методов прогнозирования  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ ; множество диапазонов допустимых значений статистических характеристик  $S$ , которым должен удовлет-

ворять анализируемый временной ряд для обработки методами F; определение системы мер, в которой должна измеряться выходная переменная, а также потери от неверного принятого решения; выбор системы управления базой данных для последующего создания базы данных.

Этап 2. Сбор, первичная обработка и сохранение данных

Реализацию настоящего этапа предложено заимствовать из существующей информационной технологии прогнозирования. Результатом выполнения данного этапа является НВР  $\{x_j\}_{j=1...T}$  длиной T.

Этап 3. Разработка модели прогнозирования (МП)

Этап 3. 1. Разложение временного ряда на составляющие

Предложено использовать метод МРС для разложения НВР на составляющие с помощью цифровых фильтров, описанный в работе [10]:  $MPC(\{x_j\}_{j=1...T}) = \{ \langle \{f_{1,j}\}_{j=1...T}, Fr_1 \rangle, \dots, \langle \{f_{k,j}\}_{j=1...T}, Fr_k \rangle, \{ \epsilon_j \}_{j=1...T} \}$ , где  $\{f_{i,j}\}_{j=1...T}$  – i-я выделенная частотная составляющая;  $Fr_i$  – частота выделенной i-й составляющей;  $\{ \epsilon_j \}_{j=1...T}$  – случайная составляющая.

Для определения вклада вновь регистрируемых значений входной переменной (временного ряда) в частотные составляющие выполняется повторное разложение временного ряда. В случае, если повторное разложение привело к изменению количественного состава составляющих или к значительному изменению частот составляющих таким образом, что их отклонение от предыдущих значений превысило заранее заданное граничное значение, то считается, что в структуре временного ряда произошли существенные изменения, повлекшие за собой изменение ранее определенных закономерностей, вследствие чего необходимо выполнить повторное построение результирующей модели прогнозирования (РМП).

Этап 3. 2. Формирование статистического описания исходных данных

На данном этапе рассчитываются значения статистических характеристик, которые позволяют охарактеризовать частотные составляющие, вычисленные на предыдущем шаге, и сопоставить их с методами прогнозирования F.

$$\{f_{i,j}\}_{j=1...k} \rightarrow s_i, \{ \epsilon_j \}_{j=1...T} \rightarrow s_{k+1}, s \in S.$$

В случае, если значения статистических характеристик не принадлежат множеству S, производится возврат к постановочному этапу, выполняется повторное формирование множества методов прогнозирования F и множества диапазонов значений статистических характеристик S, такого что  $s \in S$ .

В случае выполнения данного этапа с учетом новых данных и возникновения вышеописанной ситуации, выполняется не только повторное формирование множества методов прогнозирования, но и построение новой РМП.

Этап 3. 3. Разработка МП составляющих временного ряда и РМП

Выполняется разработка моделей прогнозирования частотных составляющих и РМП с помощью метода синтеза моделей прогнозирования НВР путем конкатенации базовых методов прогнозирования с

учетом статистических характеристик временного ряда (МСМП) [11].

$$МСМП(F, \{f_{i,j}\}_{j=1...T}, S, s_i) = МП_i, \quad i = 1, 2, \dots, k,$$

$$МСМП(F, \{ \epsilon_j \}_{j=1...T}, S, s_{k+1}) = МП_{k+1},$$

$$РМП = \sum_i МП_i + МП_{k+1}. \quad (1)$$

Этап 4. Оценка эффективности модели прогнозирования

Выполнение статистического анализа точности и оптимальности разработанной РМП предложено производить на основе обобщенного критерия эффективности моделей прогнозирования GCEFM [12].

$$GCEFM = \min_{z \in Z} \{ BIC | LBQ < \chi_m^2, |MPE| \leq 5 \},$$

где z – модель прогнозирования; Z – множество моделей прогнозирования;  $BIC = \ln(MSE) + \frac{(r+1)\ln n}{n}$  –

байесовский информационный критерий, который показывает минимальную ошибку выбора структуры

модели и учитывает сложность модели;  $MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2$  –

среднеквадратическое отклонение, которое характеризует точность модели; n – длина временного ряда;  $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$  – ошибка модели;  $Y_t$  – значение временного ряда в момент t;  $\hat{Y}_t$  – прогнозные значения  $Y_t$ ; r – количество параметров в модели;  $LBQ = n(n+2) \sum_k \frac{\rho_k^2}{n-k}$  –

Q-статистика Льюнга-Бокса, позволяющий оценить автокорреляцию остатков;  $\rho_k$  – автокорреляция k-го

порядка;  $MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{e_t}{Y_t} \cdot 100$  – средняя процентная

ошибка, которая показывает смещение прогноза относительно фактических данных.

В случае необходимости осуществляется возврат к этапу 1 для расширения множества методов прогнозирования и повторного построения результирующей модели прогнозирования на этапе 3. 3.

Этап 5. Составление прогноза

Прогнозирование временного ряда, прошедшего первичную обработку на этапе 2 и разложе

нного на частотные составляющие, выполняется на  $\tau$  уровней вперед с помощью РМП:

$$\begin{aligned} РМП \left( \{f_{i,j}\}_{j=1...k}, \{ \epsilon_j \}_{j=1...T} \right) &= МП_1(\{f_{1,j}\}_{j=1...T}) + \\ &+ МП_2(\{f_{2,j}\}_{j=1...T}) + \dots + МП_k(\{f_{k,j}\}_{j=1...T}) + МП_{k+1}(\{ \epsilon_j \}_{j=1...T}) = \\ &= \sum_{i=1}^k \{ \hat{f}_{i,j} \}_{j=T+1...T+\tau} + \{ \hat{\epsilon}_j \}_{j=T+1...T+\tau} = \{ \hat{x}_j \}_{j=T+1...T+\tau}. \end{aligned}$$

Получение прогнозных оценок по новым данным временного ряда предусматривает последовательное выполнение этапа 2, 3. 1, 3. 2, а затем выполнение непосредственного расчета прогноза на основании РМП (1).

**Этап 6. Оценка риска прогноза НВР**

В основу данного этапа положено использование метода оценки риска прогноза НВР (МОРП) [10]:  $MORP(\{\xi_j\}_{j=1...T}) = \{\hat{r}_j\}_{j=T+1...T+\tau}$ , где  $\{\xi_j\}_{j=1...T}$  – остатки результирующей модели прогнозирования;  $\{\hat{r}_j\}_{j=T+1...T+\tau}$  – ожидаемые оценки риска прогноза.

**Этап 7. Передача прогноза с оценкой риска пользователю ИТ**

На последнем этапе пользователю ИТ передается прогноз с оценкой риска анализируемой технико-экономической информации, представленной в виде НВР.

Программную реализацию разработанной ИТ было предложено выполнить на основе сервис-ориентированной архитектуры, которая предполагает модульное построение информационной системы с помощью сервисов (служб) [13]. Сервис представляет собой законченный модуль системы, который выполняет отдельно взятую задачу при его вызове и имеет возможность принимать, обрабатывать и возвращать информацию за счет использования стандартизированных интерфейсов обмена данными и моделями [14]. Каждый из сервисов является самодостаточным и не зависит от контекста или состояния других сервисов.

Таким образом, сервис автоматического прогнозирования с оценкой риска разработанный на основе предложенной ИТ может быть в дальнейшем интегрирован в другие информационные системы, а также органично и оперативно модифицирован в соответствии с новыми требованиями.

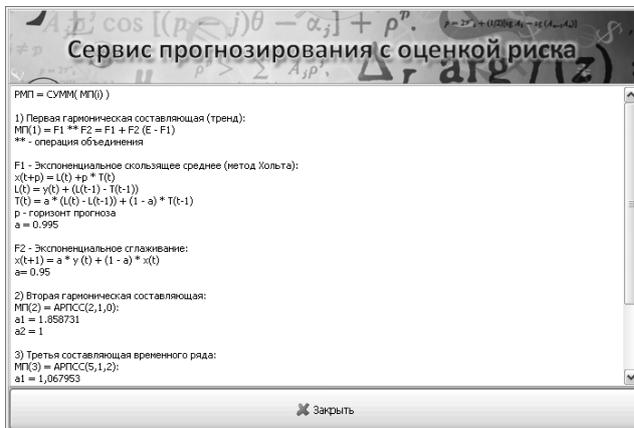
Схема взаимодействия основных блоков программной реализации разработанного сервиса представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема взаимодействия основных блоков программной реализации сервиса прогнозирования нестационарных временных рядов с оценкой риска и их взаимосвязь с этапами разработанной информационной технологии: 1) этап 1; 2) этап 2; 3) этап 3 и 4; 4) этап 5 и 6; 5) этап 7**

В работе [15] было проведено UML-проектирование основных блоков сервиса, которое обеспечило надежную основу для генерации исходного кода и разра-

ботки всего сервиса в целом. Интерфейс пользователя представлен на рис. 2.



**Рис. 2. Интерфейс пользователя: результирующая модель прогнозирования**

**5. Апробация результатов**

Выполним апробацию предложенного материаловедческого-прогнозного подхода и разработанной ИТ прогнозирования НВР с оценкой риска на примере решения научно-практической задачи обоснования выбора корпуса водо-водяного ядерного реактора для атомной энергетики Украины.

Для анализа были выбраны корпуса водо-водяных ядерных реакторов зарубежного производства (табл. 1) [16–18].

Учитывая, что стали рассматриваемых реакторов имеют положительный опыт эксплуатации более 30 лет в составе корпусов водо-водяных ядерных реакторов мощностью 1000 МВт (15X2H-МФА, А-336 Code Case 1236, А 533GR В 1989, А-508 Class 2 1989, 16 MnD5 RCC-M 2111, 20 Mn Mo Ni 5 5 1990, новая экспериментальная сталь РФ - 15X2B2ФА 2000) и мощностью 440 МВт (15X2МФА), были приняты следующие допущения по свойствам анализируемых корпусных сталей:

- примерно одинаковый уровень значений эксплуатационных параметров – температура эксплуатации (325–350 °С),
- прочность (550–600 МПа), радиационная стойкость (флюенс  $(3.7–4.0) \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$ ),
- гарантированный ресурс работоспособности (30 лет) и др., что не потребует дополнительной нормировки сравниваемых величин.

В расчете масса корпусов анализируемых ядерных реакторов мощностью 1000 МВт принята равной 320 т. Сравнению будут подлежать стоимостные показатели

корпусных сталей только по составляющим компонентам без учета затрат на изготовление, которые примерно одинаковы для рассматриваемых типов корпусов водо-водяных ядерных реакторов.

Исходные данные для прогнозирования стоимости кремния (Si), марганца (Mn), железа (Fe), меди (Cu), хрома (Cr), никеля (Ni), молибдена (Mo), вольфрама (W), ванадия (V), которые входят в состав корпусных сталей ядерных реакторов взяты на официальных сайтах Национального центра информации по минералам Геологической службы США (англ. U.S. Geological Survey National Minerals Information Center) [19], Лондонской биржи металлов (англ. London Metal Exchange) [20].

Все стоимости компонентов корпусных сталей ядерных реакторов были приведены к единой системе мер (долл. США за метрическую тонну), используя международную систему единиц СИ, а затем к сопоставимым ценам (2010 год выбран в качестве базового) по формуле:

$$P_{k/2010} = P_k \cdot \frac{CPI_{2010}}{CPI_k}$$

где  $P_k$  – стоимость нормируемого компонента k-ого года; CPI – индекс инфляции в США [21–23].

С помощью созданной информационной технологии прогнозирования с оценкой риска выполнено построение моделей прогнозирования и расчет прогнозных оценок с 2012 г. на период 2017–2022 гг. для компонентов, входящих в состав сталей корпусов ядерных реакторов (рис. 3, 4).

Стоимость и прогнозные оценки стоимости корпусов ядерных реакторов на 2017–2022 гг. (рис. 5).

Средняя абсолютная процентная ошибка прогноза 12,94 %, что точнее, чем средняя абсолютная процентная ошибка существующего подхода на 12 %. Риск прогноза составляет 14,5 %. Для существующего подхода (метод авторегрессии проинтегрирован-

ного скользящего среднего) риск прогноза составляет 35 %.

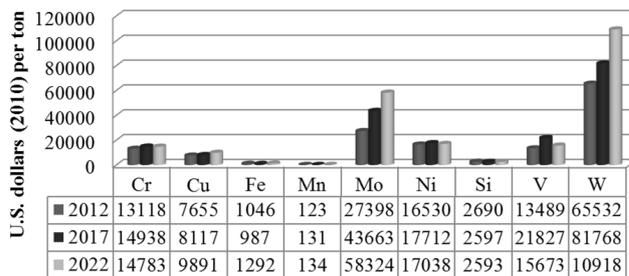


Рис. 3. Стоимость и прогнозные оценки стоимости компонентов корпусных сталей на 2017–2022 гг., в сопоставимых ценах 2010 г., долл. США за метрическую тонну

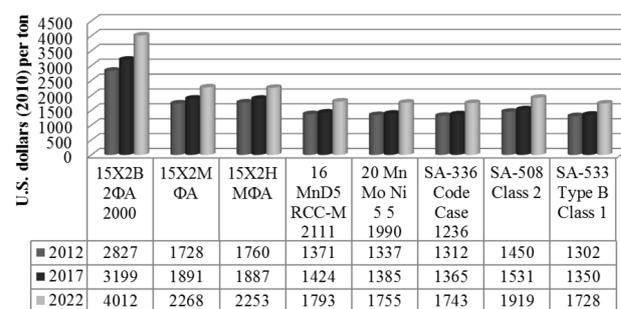


Рис. 4. Стоимость и прогнозные оценки стоимости корпусных сталей на 2017–2022 гг., в сопоставимых ценах 2010 г., долл. США за метрическую тонну

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Стоимость компонентов сталей корпусов ядерных реакторов на прогнозный период (2014–2019 гг.) имеют разноплановую тенденцию.

Таблица 1

Состав сталей корпусов водо-водяных ядерных реакторов

№	Корпус реактора			Состав стали, %									
	Наименование	Сталь	Вес, т	Si	Mn	Fe	Cu	Cr	Ni	Mo	W	V	Примеси
1	ВВЭР-440	15X2MΦA	215	0,17–0,37	0,30–0,60	94,17–95,52	≤0,08	2,5–3,0	≤0,40	0,6–0,8	-	0,25–0,35	0,18–0,23
2	ВВЭР-1000-1	15X2HMΦA	320	1,00	1,00	93,16–94,43	-	1,8–2,3	1,0–1,5	0,5–0,7	-	0,10–0,12	0,18–0,23
3	ВВЭР-1000-2	15X2B2ΦA 2000	320	0,20–0,35	0,30–0,60	92,81–96,23	0,01–0,10	2,0–3,5	0,01–0,05	0,01–0,05	1,0–2,0	0,10–0,35	0,14–0,19
4	PWR Westinghouse (SA-336)	SA-336 Code Case 1236	320	0,15–0,35	1,10–1,50	96,38–97,24	-	≤0,35	0,40–0,50	0,50–0,60	-	-	0,26–0,32
5	PWR Westinghouse (SA-533)	SA 533Type B Class 1	320	0,15–0,40	1,15–1,50	96,48–97,53	-	-	0,40–0,70	0,45–0,60	-	-	≤0,325
6	PWR Westinghouse (SA-508)	A-508 Class 2	320	0,15–0,40	0,50–1,00	95,95–97,55	≤0,15	0,25–0,45	0,50–1,00	0,55–0,70	-	≤0,05	≤0,3
7	PWR (French 4-Loop N4Type Plants)	16 MnD5 RCC-M 2111	320	0,10–0,30	1,15–1,60	95,97–97,36	≤0,02	≤0,25	0,40–1,00	0,43–0,57	-	≤0,01	≤0,282
8	PWR (German Konvoi Design Values)	20 Mn Mo Ni 5 5 1990	320	0,15–0,30	1,20–1,50	96,26–97,22	≤0,12	≤0,20	0,50–0,80	0,40–0,55	-	≤0,02	0,19–0,25

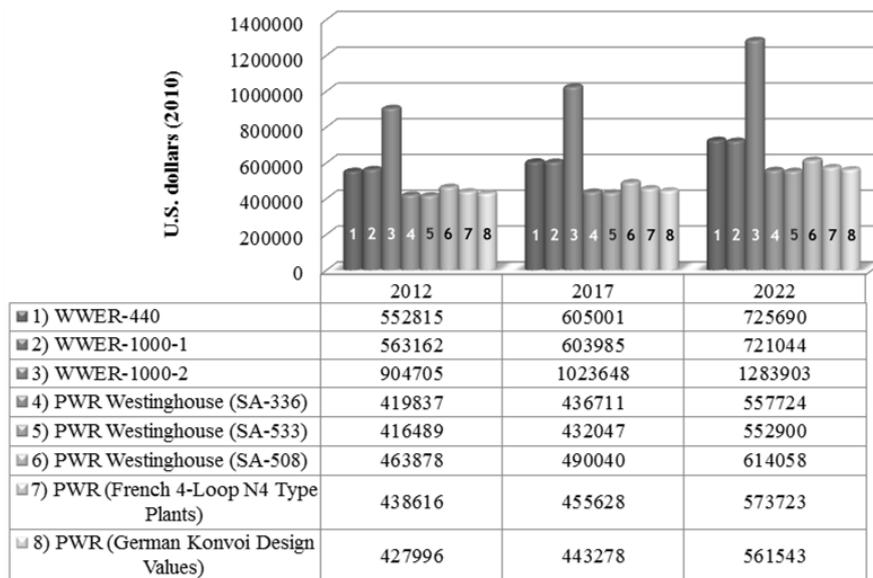


Рис. 5. Стоимость и прогнозные оценки стоимости корпусов ядерных реакторов на 2017 – 2022 гг., в сопоставимых ценах 2010 г., долл. США за метрическую тонну

Стоимость большинства компонентов корпусных сталей имеет восходящий тренд и, несмотря на то, что ожидается снижение стоимости основного компонента по содержанию процентного состава сталей (железа) с 1045,63 долл. до 986.56 долл. в 2017 г., это не приведет к снижению стоимости корпусных сталей в 2017 г. Рост стоимости сталей российского производства 15X2МФА, 15X2НМФА и 15X2В2ФА 2000 в 2017 г. может составить (7–13) %, что связано с подорожанием меди, ванадия и вольфрама. В тоже время другие корпусные стали имеют тенденцию к подорожанию, но не так существенно – на (3–6) %.

В 2022 г. ожидается существенное увеличение стоимости всех корпусных сталей на (30–33) % по сравнению с 2012 г. в связи с прогнозируемым ростом железа и наиболее дорогих компонентов корпусных сталей. Увеличение стоимости для российской стали 15X2В2ФА 2000 будет максимальным и составит 41,9 % по сравнению с 2012 г. Это обусловлено прогнозируемым увеличением стоимости вольфрама, содержание которого в стали 15X2В2ФА 2000 составляет от 2 % до 3,5 %. Вольфрам не входит в состав других, рассматриваемых в данной работе, корпусных сталей.

Таким образом, увеличение стоимости корпусных сталей за весь рассматриваемый прогнозный период наиболее существенно отразится на стоимости корпусов реакторов российского производства (ВВЭР), которые используют дорогостоящие марки сталей 15X2МФА, 15X2НМФА и 15X2В2ФА 2000.

Так, сталь 15X2НМФА, являющаяся базовой сталью для украинской ядерной индустрии, в среднем оказывается в прогнозируемом периоде на 35,2 % дороже своего зарубежного аналога – стали SA 533 GR В 1989, которая имеет минимальную стоимость среди рассматриваемых сталей. Сталь 15X2МФА (корпусная сталь реактора ВВЭР–440) в среднем оказывается в прогнозируемом периоде дороже на 34,7 % стали SA 533GR В 1989, а сталь 15X2В2ФА 2000 (ВВЭР-1000-2) – дороже ее в 2,3 раза.

Сопоставление стоимости корпусов ядерных реакторов показало, что наименьшую стоимость имеет корпус PWR Westinghouse 4-Loop Plant (сталь SA 533GR В 1989), а наибольшую стоимость имеет корпус реактора ВВЭР-1000 (сталь 15X2В2ФА 2000). Таким образом, при выборе новой реакторной установки для Украины на прогнозный период наиболее перспективным по стоимостным показателям является корпус водо-водяного ядерного реактора из корпусной стали SA 533GR В 1989.

Прогнозные оценки стоимости корпуса ядерного реактора ВВЭР-440 (сталь 15X2МФА), показывают, что, несмотря на значительное отличие в массе (табл. 1) от других корпусов реакторов, он не только морально

устарел, будучи реактором второго поколения, но и значительно уступает в стоимости современным аналогам, построенным из более дешевых сталей. Поэтому строительство новых ядерных реакторов ВВЭР-440 с учетом прогнозируемой динамики стоимостных показателей корпуса (сталь 15X2МФА) может являться экономически нецелесообразным.

Таким образом, использование разработанной информационной технологии прогнозирования временных рядов с оценкой риска позволило в рамках предложенного материаловедческо-прогнозного подхода выполнить автоматическую разработку комплекса моделей прогнозирования с оценкой риска стоимостных показателей компонентов корпусных сталей и корпусов водо-водяных ядерных реакторов.

Разработанные модели позволяют получить более эффективные прогнозные оценки (на 12 %) по сравнению с традиционным подходом к построению моделей прогнозирования, что позволило построить достоверный среднесрочный прогноз стоимостей корпусов водо-водяных ядерных реакторов и оценить риск прогноза 14,5 %.

## 6. Выводы

1. Предложен материаловедческо-прогнозный подход для выбора корпуса водо-водяного ядерного реактора, исходя из прогноза стоимости компонентов, которые входят в состав корпусных сталей.

2. Разработана и программно реализована информационная технология прогнозирования с оценкой риска нестационарных временных рядов, обеспечивающая реализацию предложенного материаловедческо-прогнозного подхода. Технология предусматривает проведение детального анализа составляющих временного ряда и осуществление обоснованного перехода к тому или иному методу прогнозирования, предварительно исключив из рассмотрения методы, не удовлетворяю-

щие статистическому описанию исходных данных. Также она позволяет выполнить оценку риска построенного прогноза.

3. Полученные результаты исследований прошли апробацию в рамках материаловедческо-прогнозного подхода для решения задачи выбора на 2017–2022 гг. корпуса водо-водяного ядерного реактора на основании прогнозирования стоимостных показателей исходного сырья.

Сравнительный анализ корпусов ядерных реакторов, проведенный по результатам прогноза (ошибка прогноза 12,94 %, что на 12 % лучше традиционного подхода, риск прогноза 14,5 %) стоимости исходных компонентов, показал, что при выборе новой реакторной установки для Украины на прогнозный период наиболее перспективным, по стоимостным показателям, является корпус водо-водяного ядерного реактора изготовленный из стали А 533GR В 1989.

#### Литература

1. Энергетична стратегія України на період до 2030 року [Текст] / Розпорядження КМУ від 15 березня 2006 р. – № 145-р. – 129 с.
2. Integrity of reactor pressure vessels in nuclear power plants: assessment of irradiation embrittlement effects in reactor pressure vessel steels [Text] // IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.11. – Vienna: IAEA, 2009. – 144 p.
3. Ядерная энергетика. Опыт сооружения атомных электростанций. Перспективы развития [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.sigma08.ru/jur3-1.htm> – Заголовок с экрана.
4. Busby, J. T. Economic benefits of advanced materials in nuclear power systems [Text] // J. T. Busby // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 392, Issue 2. – P. 301–306. doi:10.1016/j.jnucmat.2009.03.018
5. Грін, В. Г. Економетричний аналіз [Текст] / В. Г. Грін; пер. з англ. А. Олійник, Р. Ткачук; наук. ред. пер. О. Комашко; передм. О. І. Черняка, О. В. Комашка. – К.: Вид-во Соломії Павличко «Основи», 2005. – 1197 с.
6. Суслов, В. И. Эконометрия [Текст] / В. И. Суслов, Н. М. Ибрагимов, Л. П. Талышева и др. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 744 с.
7. Ханк, Д. Э. Бизнес-прогнозирование [Текст] / Д. Э. Ханк, Д. У. Уичерн, А. Д. Райс; пер. с англ. В. В. Марченко, В. Н. Радченко, А. В. Слепцева и др.; 7-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 656 с.
8. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [Текст] / М.: ИПК Издательство стандартов. – Введ. с 1992-01-01, 2002. – 16 с.
9. Трофимова, В. В. Информационные системы и технологии в экономике и управлении [Текст] / В. В. Трофимова. – М.: Высшее образование, 2006. – 480 с.
10. Одейчук, А. Н. Информационная технология прогнозирования с оценкой риска нестационарных временных рядов [Текст] / А. Н. Одейчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2011. – № 23. – С. 95–107.
11. Одейчук, А. Н. Метод синтеза моделей прогнозирования временных рядов в информационных управляющих системах [Текст] / А. Н. Одейчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – Т. 3, № 9 (51). – С. 42–46.
12. Одейчук, А. Н. Обобщенный критерий эффективности моделей прогнозирования временных рядов в информационных системах [Текст] / А. Н. Одейчук // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2009. – № 1 (70). – С. 113–119.
13. Компас в мире сервис-ориентированной архитектуры (SOA): ценность для бизнеса, планирование и план развития предприятия [Текст] / Н. Биберштейн, С. Боуз, К. Джонс и др.; пер. с англ. Лунина С. – М.: Кудиц-Пресс, 2007. – 256 с.
14. Крюков, В. В. Корпоративная информационная среда вуза: методология, модели, решения [Текст]: монография / В. В. Крюков, К. И. Шахгельдян. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 308 с.
15. Одейчук, А. Н. Использование языка моделирования UML при проектировании информационной технологии разработки модели прогнозирования [Текст] / А. Н. Одейчук, Н. Н. Куклин // АСУ и приборы автоматики. – 2008. – Вып. 144. – С. 157–164.
16. Пат. 2135623 Российская Федерация, С22С38/52. Малоактивируемая радиационно-стойкая сталь [Текст] / Горынин И. В., Рыбин В. В., Карзов Г. П. и др. – заявитель и патентообладатель Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей». – № 98110529/02; заявл. 04.06.1998; опубл. 27.08.1999, Бюл. изобрет. № 24.
17. Основное оборудование реакторного отделения. Балаковская атомная электростанция. Служба подготовки персонала [Текст] / Балаково: Балаковская АЭС, 2001. – 187 с.
18. Integrity of reactor pressure vessels in nuclear power plants: assessment of irradiation embrittlement effects in reactor pressure vessel steels [Text] // IAEA nuclear energy series. – Vienna: IAEA, 2009. – № NP-T-3.11. – 144 p.
19. National Minerals Information Center USA [Electronic resource] / Available at : <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/>. – Title in screen.
20. London Metal Exchange [Electronic resource] / Available at : <http://www.lme.com/>
21. Federal Reserve Bank of Minneapolis [Electronic resource] / Available at: [http://www.minneapolisfed.org/community\\_education/teacher/calc/hist1800.cfm](http://www.minneapolisfed.org/community_education/teacher/calc/hist1800.cfm)
22. United States Department of Labor – Producer Price Indexes [Electronic resource] / Available at: <http://www.bls.gov/ppi/#tables>
23. RateInflation. USA - Consumer Price Index (CPI) History Table [Electronic resource] / Available at : <http://www.rateinflation.com/consumer-price-index/usa-historical-cpi.php?form=usacpi>