

ДП “ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ІНЖЕНЕРНИЙ ЦЕНТР  
СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА АВАРІЙНОГО РЕАГУВАННЯ”  
МІНЕНЕРГОВУГІЛЛЯ УКРАЇНИ

# **ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ**

*Науково-виробничий журнал*

# **NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT**

*Scientific and Industrial Journal*

**№ 1 (11), 2018**

Виходить 1—4 рази на рік

Заснований у травні 2012 року

**Київ — 2018**

Науково-виробничий журнал “Ядерна енергетика та довілля” публікує науково-дослідні, інженерно-технічні та експертно-аналітичні розробки у сфері радіаційної фізики, ядерної, радіаційної та екологічної безпеки, радіаційного матеріалознавства, безпеки та надійності ядерно-енергетичних установок, аналітичної та радіаційної хімії, використання нанотехнологій, ІТ-технологій і промислових технологій та з інших напрямків досліджень, які можуть бути використані для розвитку ядерно-енергетичної галузі, а також інформує населення щодо результатів контролю та моніторингу стану довілля.

У журналі друкуються статті, які є завершеними роботами, що містять нові результати теоретичних та експериментальних досліджень і становлять інтерес для науково-технічних працівників ядерно-енергетичної галузі та широкого кола читачів, які цікавляться ядерною енергетикою та екологічними проблемами довілля.

Статті приймаються до друку українською, російською та англійською мовами.

#### ЗАСНОВНИКИ:

ДП “Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування” (ДП “ДНІЦ СКАР”) Міненерговугілля України та Українське ядерне товариство (УкрЯТ)

#### Редакційна колегія:

Головний редактор: *Васильченко В. М.*, канд. техн. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

Заступник головного редактора: *Масько О. М.*, канд. хім. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

Відповідальний секретар: *Пуртов О. А.*, канд. фіз.-мат. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

*Барбаішев С. В.*, д-р. техн. наук (Одеський національний політехнічний університет)

*Бондарьков М. Д.*, д-р. техн. наук (ДНДУ “Чорнобильський центр з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології”)

*Дубковський В. О.*, д-р техн. наук, професор (Одеський національний політехнічний університет)

*Інюшев В. В.*, канд. техн. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

*Корольов О. В.*, д-р техн. наук, професор (Одеський національний політехнічний університет)

*Куц В. М.*, канд. фіз.-мат. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

*Литвинський Л. Л.*, д-р фіз.-мат. наук (ТОВ “АЕСКАР”)

*Маслов О. В.*, д-р техн. наук, професор (Одеський національний політехнічний університет)

*Маслюдов І. М.*, академік НАНУ, д-р фіз.-мат. наук (ІНЦ “ХФТГ” НАНУ)

*Новосолов Г. М.*, канд. фіз.-мат. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

*Носовський А. В.*, д-р техн. наук, професор (ДУ “Інститут проблем безпеки АЕС НАН України”)

*Печериця О. В.*, канд. техн. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

*Протасов О. О.*, д-р біол. наук, професор (ДУ “Інститут гідробіології НАН України”)

*Пуртов О. А.*, канд. фіз.-мат. наук (ДП “ДНІЦ СКАР”)

*Пишико Г. М.*, д-р хім. наук (ДУ “Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України”)

*Рязанов В. В.*, д-р фіз.-мат. наук (ДУ “Інститут ядерних досліджень НАН України”)

*Харченко В. С.*, д-р техн. наук, професор (Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”)

*Шелофаст В. В.*, д-р техн. наук, професор (ООО НТЦ “АПМ”)

*Ястребенецький М. О.*, д-р техн. наук, професор (ДП “ДНІЦ СКАР”)

#### Адреса редакції:

Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування  
проспект Героїв Сталінграду, 64/56  
м. Київ, 04213  
Тел./факс: (+38-044) 411-75-70  
Електронна адреса: purtov.dnic@gmail.com  
http://dnic.com.ua

#### Editor's address:

State Scientific Engineering Center of Control Systems and Emergency Response  
Geroiv Stalingrady, 64/56  
Kyiv, 04213, Ukraine  
Tel./fax: (+38-044) 411-75-70  
E-mail: purtov.dnic@gmail.com  
http://dnic.com.ua

Друкується за постановою науково-технічної ради ДП “ДНІЦ СКАР” (№ 2 від 05.04.2018)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України

наказом Міністерства освіти і науки України № 1528 від 29.12.2014

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації

Серія КВ № 18914-7704пр від 06.05.2012

## ЗМІСТ

Куров В. А., Муссауи Ю., Сухоручко А. М. Особенности моделирования и расчета прочности железобетонной гермооболочки реакторного отделения энергоблока АЭС в программном комплексе APM Structure 3D	4
Пуртов О. А., Масько А. Н., Карашук А. В. Обновленная концепция снятия с эксплуатации энергоблоков ОП «Ривненская АЭС»	9
Корнилов А. А., Барбашев С. В. О включении комплекса плазменной переработки твердых радиоактивных отходов в состав комплекса по переработке радиоактивных отходов на Ривненской АЭС	18
Азаров С. І., Задунай О. С., Євланов В. М. Аналіз можливих екологічних наслідків під час експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива	28
Пирогов Т. В., Колядюк А. С., Шелофаст В. В. Моделирование трубопроводов двухузловыми гнутыми элементами типа «pipe»	34
Кеймиров М. А. Применение природного и модифицированного полиамином монтмориллонита Огланлынского месторождения (Туркменистан) для очистки вод от соединений кобальта (II)	40
Скалозубов В. И., Чулкин О. А., Пирковский Д. С. Обзорный анализ условий и последствий гидродинамических ударов в оборудовании и трубопроводах систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок	46
Протасов А. А., Морозовская И. А., Ласковенко Н. Н. Использование метода экспериментальных субстратов в мониторинге биологических помех в работе систем водоснабжения и тестировании необрастающих покрытий	52
Новоселова Т. Н., Голод А. В., Левицкий А. В., Протасов А.А. Контроль экологического состояния водоема-охладителя АЭС на основании данных по прозрачности воды	57
Яковенко В. А., Силаева А. А., Протасов А. А. Инвазивные брюхоногие моллюски в техноэко-системе Запорожской АЭС	61
Ищенко О. П. Валідація розрахункових моделей басейну витримки відпрацьованого ядерного палива та системи охолодження води басейну витримки	66
Комарова-Ракова Я. О. Получение магнегаза в отработанных угольных шахтах и использование его в пиковых нагрузках энергосистемы	69

## CONTENTS

V. Kurov, Y. Mussaui, A. Sukhoruchko Features of modeling and strength calculation reinforced concrete envelope of the reactor compartment of NPP in the APM Structure 3D software package	4
O. Purtov, A. Masko, A. Karaschuk Updated concept of Rivne NPP units decommission	9
A. Kornilov, S. Barbashev On inclusion of plasma complex of solid radioactive waste recycling in the composition of the complex for recycling of radioactive wastes at Rivnenskaya NPP	18
S. Azarov, O. Zadunay, V. Evlanov Analysis of environmental consequences in operation of wet storage facilities for spent nuclear fuel	28
T. Pirogov, A. Kolyaduk, V. Shelofast Simulation of pipelines by double-dimensional elements of the type «pipe»	34
M. Keymirov Application of natural and polyamine-modified montmorillonite Oglanlyn deposit (Turkmenistan) for water purification from cobalt (II)	40
V. Skalozubov, O. Chulkin, D. Pirkovskiy Overview analysis of conditions and consequences of hydrodynamic strikes in equipment and pipelines of systems important for the safety of nuclear power plants	46
A. Protasov, I. Morozovska, N. Laskovenko The use of methods of experimental substrates in the monitoring of biological hindrances in the exploitation of water supply systems and testing of antifouling coatings	52
T. Novoselova, A. Golod, A. Levitsky, A. Protasov Control of environmental state of the NPP cooling pond on the basis of water transparency data	57
V. Yakovenko, A. Sylaieva, A. Protasov Invasive gastropods in the technoecosystem of Zaporizhzhya NPP	61
O. Ishchenko Validation of the computational models of the spent nuclear fuel pool and of the cooling system of the spent nuclear fuel pool water	66
Y. Komarova-Rakova Obtaining "magnegas" in the processed coal chips and using it in the peak loads of the energy system	69

УДК 539.4: 621.039

В. А. Куров<sup>1</sup>, Ю. Муссауи<sup>2</sup>, А. М. Сухоручко<sup>2</sup><sup>1</sup>Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования, г. Киев<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью Научно-технический центр «АПМ», г. Королев (Московская область, РФ)

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ГЕРМОБОЛОЧКИ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГБЛОКА АЭС В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ APM STRUCTURE 3D

В статье рассмотрены основные подходы к оценке сейсмостойкости защитной герметичной оболочки реакторного отделения энергоблока АЭС методом конечных элементов в программном комплексе APM Structure 3D.

**Ключевые слова:** реакторное отделение энергоблока АЭС, защитная герметичная оболочка, расчет сейсмостойкости, арматурные канаты, расчетная модель, нагрузки, метод конечных элементов, оболочечные и пластинчатые конечные элементы, программный комплекс APM Structure 3D.

**Введение.** Одним из фундаментальных принципов безопасности АЭС является реализация стратегии глубоководной защиты – системы физических барьеров, технических и организационных мер по защите барьеров [1]. Защитная герметичная оболочка (ГО) реакторного отделения энергоблока АЭС является одним из барьеров глубоководной защиты, который изолирует его от окружающей среды и обеспечивает, при потенциально возможных авариях, локализацию радиоактивных веществ в подоболочечном пространстве.

Защитная оболочка представляет собой герметичный объем, состоящий из вертикальной монолитной железобетонной предварительно напряженной цилиндрической части и сферического преднапряженного купола [2]. Диаметр цилиндрической части – 47,4 м, верху защитной оболочки соответствует отметка +66,450 м. Применяется бетон класса В30, арматура АІ и АІІІ [3, 4]. Схема защитной герметичной оболочки представлена на рисунке 1.

Предварительное напряжение оболочки обеспечивается системами геликоидально-петлевого (в цилиндрической части) и ортогонально-петлевого (в куполе) армирования. Арматурные канаты из высокопрочной проволоки размещаются в каналообразователях, заполненных антифрикционной средой [2].

Предварительно напряженная герметичная оболочка обладает рядом положительных свойств:

- надежность работы основных несущих элементов оболочки – напрягаемой арматуры (даже разрыв определенной части этих элементов не приводит к разрушению конструкции);

- возможность проверки состояния предварительно напряженных пучков арматуры, а также замены их в процессе эксплуатации;

- возможность расчета прочности оболочки по характеристикам материалов, определенным при одноосном напряженном состоянии, тогда как фактическая прочность материалов, работающих в

оболочке, как правило, в объемном состоянии намного выше.

**Особенности расчета на прочность герметичной оболочки.** Особое внимание уделяется сохранению прочности и герметичности защитной оболочки при сейсмических воздействиях. Ввиду сложности конструкции защитных оболочек в совокупности с нагрузками, обусловленными условиями эксплуатации, наиболее целесообразным методом подтверждения прочности конструкции является расчет прочности с помощью специализированных программных кодов, применяющих метод конечных элементов [5]. Одним из таких кодов является расчетный модуль программного комплекса APM Structure 3D.

Расчетный модуль APM Structure 3D позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние конструкции при статическом и динамическом нагружении, выполнять расчет устойчивости, собственных частот и вынужденных колебаний, а также другие расчеты. В APM Structure 3D есть возможность выполнять проектировочные и проверочные расчеты армирования в конструкции, расчеты трещиностойкости, расчеты по первой и второй группе предельных состояний.

Особенностью расчета на прочность ГО в программном комплексе, по сравнению с другими железобетонными конструкциями, является необходимость учета ряда нагрузок, связанных с условиями эксплуатации ГО:

- усилия предварительного натяжения арматурных канатов;

- нагрузка от полярного крана грузоподъемностью 320+160+2x70т;

- температурные воздействия;

- эпизодические нагрузки;

- сейсмические воздействия;

- нагрузки в режиме нарушения нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) ( $p=0,07$  МПа;  $T_v=90$  °С);

- нагрузки в режиме аварийной ситуации (АС) ( $p=0,35$  МПа;  $T_v=150$  °С),

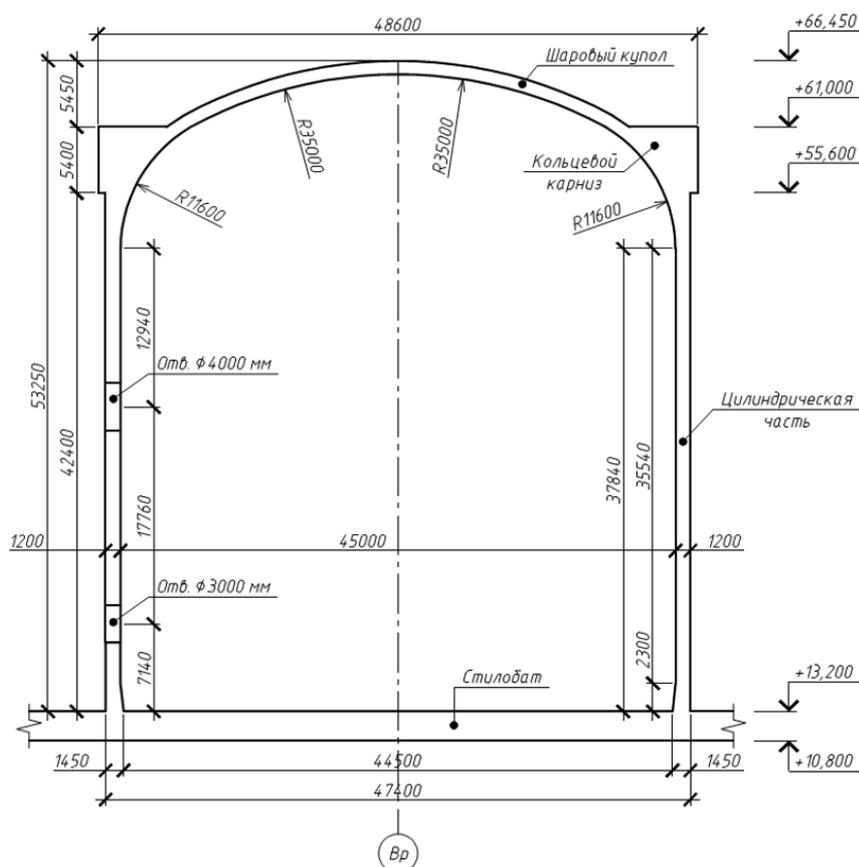


Рисунок 1. Схема герметичной защитной оболочки

а также типовых нагрузок:

- собственный вес несущих конструкций;
- снеговая нагрузка на покрытие купольной части;
- ветровая нагрузка на покрытие купольной части.

Нагрузки на строительные конструкции ГО приняты в соответствии с требованиями действующих норм [6, 7, 8].

Программа APM Structure 3D позволяет выполнить построение модели, достоверно описывающей геометрию и поведение реального сооружения, с последующим расчётом методом конечных элементов.

При построении расчётной модели в модуле APM Structure 3D для цилиндрической и купольной части ГО использовались четырёхузловые и трёхузловые пластинчатые конечные элементы. При построении кольцевого карниза использовались объёмные четырёхузловые конечные элементы, а для арматурных канатов – конечный элемент «канат».

Уменьшение жёсткости пластинчатых элементов за счёт каналаобразователей с достаточной точностью компенсируется совместной работой бетонной защитной оболочки и герметичной облицовки. Принятая в расчёте жёсткость пластинчатых элементов соответствует реальному состоянию и отражает наиболее достоверную работу конструкции.

Кинематические граничные условия задаются в виде жёсткого защемления узлов цилиндрической части ГО в местах её опирания на стилобат.

Конечно-элементная модель ГО и схема приложения арматурных канатов представлены на рисунке 2.

APM Structure 3D позволяет выполнить статический расчёт конструкций и сооружений, работающих в условиях неоднородного поля температур, полученного из результатов решения задачи нестационарной теплопроводности.

Ниже (рисунки 3-4) представлены результаты статического расчёта ГО от действия температуры для различных температур при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ).

**Результаты расчета сейсмостойкости.** Расчет на сейсмические воздействия проводится линейно-спектральным методом с использованием обобщённых спектров ответа (в рассматриваемом случае графики зависимости ускорения, передаваемого на сооружение, от частоты собственных колебаний) для отметки +13,2 м [5].

Собственные частоты и соответствующие им формы колебаний защитной оболочки определялись методом конечных элементов в программе APM Structure 3D. Количество собственных частот, учитываемых в расчёте на сейсмические воздействия определялось в соответствии с требованиями [7].

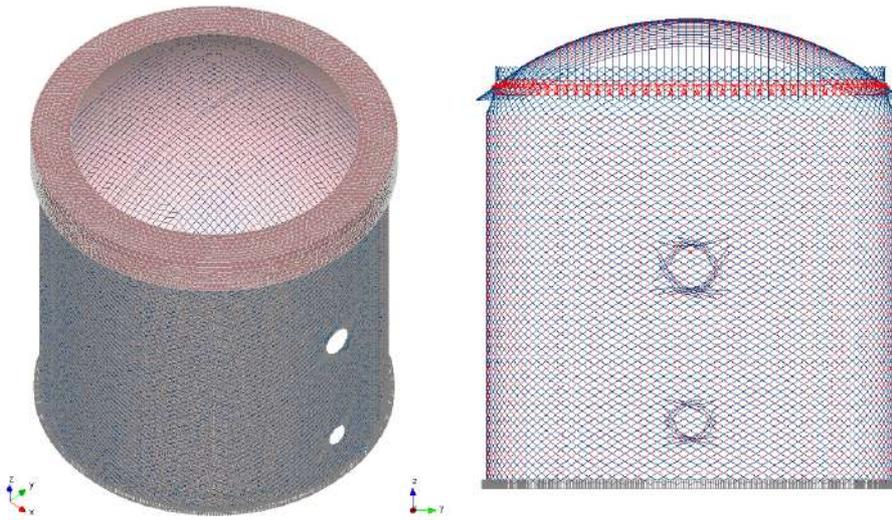


Рисунок 2. Конечно-элементная модель герметичной оболочки (слева) и схема приложения нагрузки от предварительного натяжения арматурных канатов (справа)

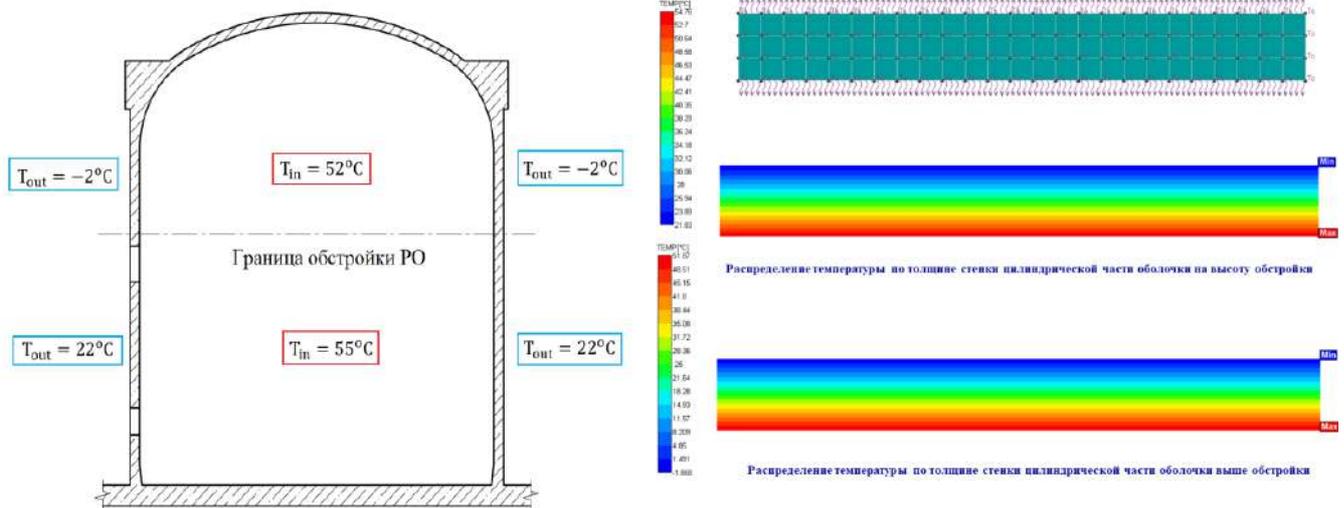


Рисунок 3. Схема температурной нагрузки на конструкцию защитной оболочки

Результаты распределения приведенных напряжений в арматурных канатах для нормальных условий эксплуатации и комбинации НУЭ с максимальным расчетным землетрясением (МРЗ) при пиковом ускорении грунта  $0,1g$ , представлены на рисунках 5 и 6.

На рисунках 7-10 представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния ГО при действии предельных расчетных значений нагрузок при их расчетных сочетаниях в виде карт распределений максимальных главных растягивающих напряжений ( $\sigma_1$ ) и перемещений.

Погрешность конечно-элементной модели составляет 8 %. По результатам расчетов определено, что защитная ГО удовлетворяет критериям прочности. При комбинации нагрузок НУЭ+МРЗ напряжения в арматурных канатах и главные напряжения в оболочке уменьшаются, что связано с ослаблением натяжения арматурных канатов при сейсмических воздействиях.

Рисунок 4. Результаты расчета нестационарной теплопроводности для НУЭ

В целом расчет прочности защитной ГО соответствует требованиям действующих в Украине нормативных документов [1–8], а также результатам аналогичных работ, проводимых на АЭС Украины

**Заключение.** Выполнена оценка сейсмостойкости для защитной ГО энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 на основе разработанной конечно-элементной модели в расчетном модуле APM Structure3D.

Программный комплекс APM Structure3D полностью обеспечен функционалом для выполнения расчетов прочности как зданий и сооружений АЭС в целом, так и конкретно защитной ГО. APM Structure3D позволяет учитывать все необходимые нагрузки и граничные условия для корректного расчета ГО на сейсмостойкость в соответствии с требованиями действующих в Украине нормативных документов.

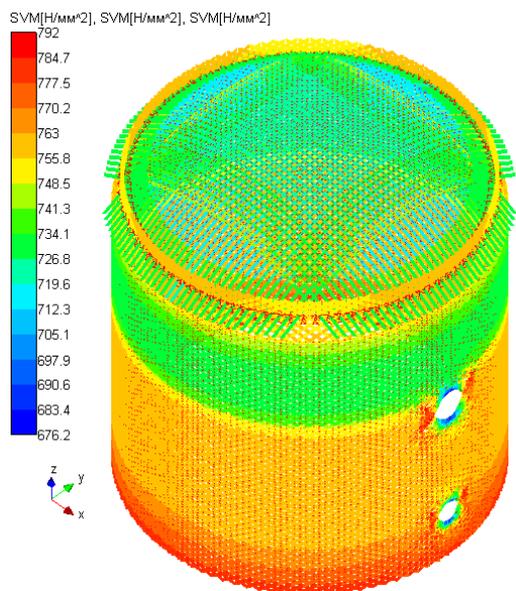


Рисунок 5. Распределение напряжений (по Мизесу) в арматурных каналах при НУЭ

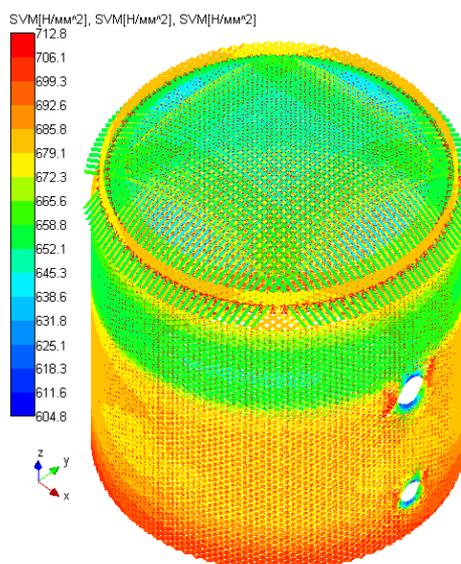


Рисунок 6. Распределение напряжений (по Мизесу) в арматурных каналах при НУЭ+МРЗ

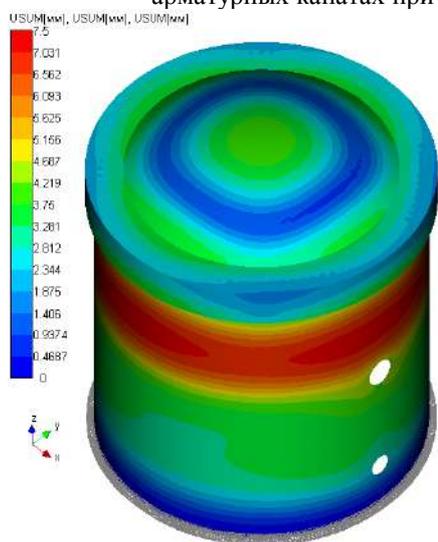


Рисунок 7. Распределение суммарных перемещений при НУЭ

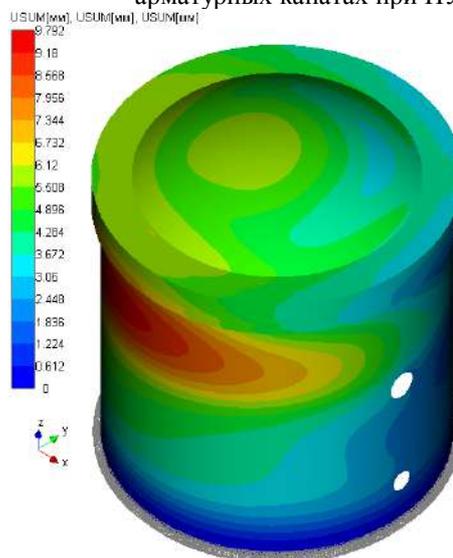


Рисунок 8. Распределение суммарных перемещений при НУЭ+МРЗ

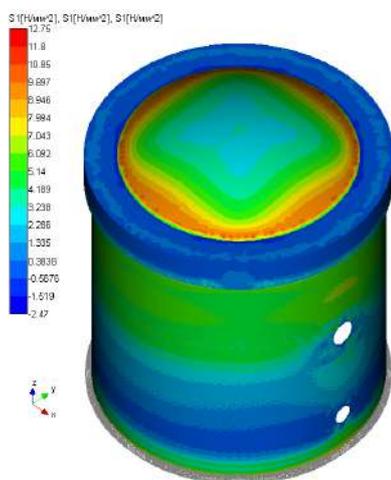


Рисунок 9. Распределение максимальных главных напряжений при НУЭ

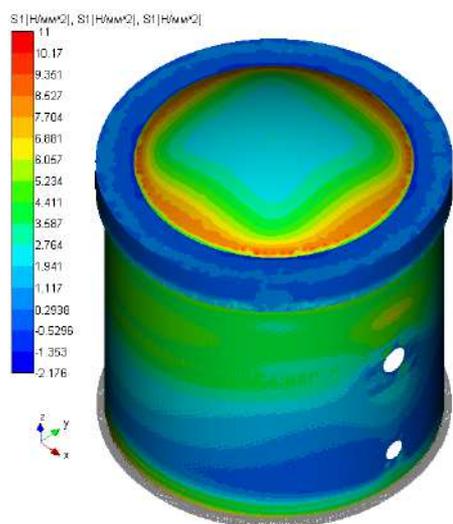


Рисунок 10. Распределение максимальных главных напряжений при НУЭ +МРЗ

**Список использованной литературы**

1. НП 306.2.141-2008 Загальні положення безпеки атомних станцій. ДКЯРУ, 2007 р.
2. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций: ПНАЭ Г-10-007-89.
3. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: ДБН В.2.6-98:2009.
4. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжёлого бетона. Правила проектирования: ДСТУ Б В.2.6-156:2010.
5. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмичної безпеки енергоблоків атомних станцій: НП 306.2.208-2016.
6. Строительство в сейсмических районах Украины: ДБН В.1.1-12-2014.
7. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006.
8. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа: ПИН АЭ-5.6.

*Получено 12.02.2018*

УДК 621.039

О. А. Пуртов<sup>1</sup>, А. Н. Масько<sup>1</sup>, А. В. Каращук<sup>2</sup><sup>1</sup>Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования, г. Киев<sup>2</sup>ОП «Ривненская АЭС»**ОБНОВЛЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ СНЯТИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ  
ОП «РИВНЕНСКАЯ АЭС»**

Представлены основные положения обновленной Концепции снятия с эксплуатации энергоблоков ОП «Ривненская АЭС». Рассмотрены два основных варианта снятия с эксплуатации (СЭ) энергоблоков АЭС — немедленный демонтаж и отложенный демонтаж. Оптимальным вариантом СЭ энергоблоков № 1,2,3,4 ОП РАЭС определен отложенный демонтаж с длительностью стадии выдержки 18, 26, 30 и 21 год соответственно. Оптимальный вариант СЭ с отложенным демонтажем обеспечивает существенные преимущества с точки зрения равномерности трудозатрат и загруженности установок по переработке РАО. Оценены финансовые затраты на отдельных стадиях СЭ энергоблоков № 1-4, размеры ежегодных отчислений на СЭ и на захоронение РАО от СЭ энергоблоков в соответствии с обновленной Концепцией.

**Ключевые слова:** концепция снятия с эксплуатации, энергоблоки АЭС, Ривненская АЭС, затраты на снятие с эксплуатации и захоронение РАО.

**Введение.** Концепция снятия с эксплуатации энергоблоков ОП «Ривненская АЭС» (далее – Концепция) подлежит пересмотру:

- планомерно через каждые 10 лет;
- для внесения изменений каждые пять лет;
- в случае существенных изменений в планах дальнейшей эксплуатации объектов ОП РАЭС;
- в случае существенных изменений условий и требований к снятию с эксплуатации (далее – СЭ) АЭС, определенных нормативно-правовыми актами и нормативными документами ГП «НАЭК «Энергоатом».

Концепция пересмотрена в соответствии с требованиями стандарта СОУ НАЕК 015:2012 [1] и с учетом положений обновленной «Концепції зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України» [2].

**Назначение и сфера применения Концепции.** Концепция представляет собой документально закрепленное решение ОП «Ривненская АЭС» (далее – ОП РАЭС) о совокупности подходов и мероприятий, направленных на обеспечение будущего снятия с эксплуатации действующих на промплощадке ОП РАЭС ядерных установок (ЯУ) и объектов, предназначенных для обращения с радиоактивными отходами (РАО).

Концепция является одним из документов по направлению деятельности «Снятие с эксплуатации», который требуется при получении и продлении эксплуатирующей организацией ГП «НАЭК «Энергоатом» лицензии на осуществление деятельности по эксплуатации энергоблоков ОП РАЭС, а также при установлении размера отчислений эксплуатирующей организации на специальный счет для формирования финансового резерва, предназначенного для СЭ ядерных установок.

**Цель и задачи Концепции.** Основной целью

Концепции является долгосрочное планирование комплекса мероприятий по СЭ всех действующих ЯУ и объектов по обращению с РАО, расположенных на промплощадке ОП РАЭС.

В соответствии с основной целью, задачами Концепции являются:

- анализ истории эксплуатации и текущего состояния действующих объектов ОП ЮУАЭС, а также прогноз их ключевых характеристик объектов на момент окончания проектного срока их эксплуатации;
- анализ истории эксплуатации и текущего состояния действующих объектов ОП РАЭС и окружающей среды, а также прогноз ключевых характеристик объектов на момент окончания их проектного срока эксплуатации;
- оценка планов дальнейшего использования промплощадки ОП РАЭС и, расположенных на ней объектов, подлежащих СЭ;
- анализ текущего состояния деятельности по обращению с РАО на ОП РАЭС и его прогноз на момент окончания проектного и планируемого срока эксплуатации действующих объектов ОП РАЭС;
- выбор и обоснование стратегии СЭ действующих ЯУ и объектов по обращению с РАО ОП РАЭС;
- определение основных подходов к обеспечению безопасности при СЭ объектов ОП РАЭС;
- определение основных подходов к обеспечению качества при СЭ объектов ОП РАЭС, включая организационные аспекты и вопросы стандартизации;
- определение основных требований к инфраструктуре, необходимой для СЭ энергоблоков ОП РАЭС;
- прогноз потребности в трудовых ресурсах

при СЭ объектов ОП РАЭС;

– оценка объемов и графика расходов на СЭ объектов ОП РАЭС;

– оценка размеров ежегодных сборов за образование и хранение эксплуатационных РАО и РАО от СЭ объектов ОП РАЭС;

– оценка размеров ежегодных отчислений для накопления средств на СЭ объектов ОП РАЭС.

**Объекты ОП РАЭС, подлежащие СЭ.** В состав единого производственно-технологического комплекса ОП РАЭС входят объекты и/или их элементы, которые с точки зрения влияния на безопасность на протяжении их жизненного цикла подразделяются на три группы:

– ядерные установки: энергоблоки №1,2,3,4;

объекты по обращению с РАО:

– спецкорпус 1-й очереди (СК-1);

– спецкорпус энергоблоков №№ 3 – 4;

– здание переработки слабоактивных отходов (ЗПСО);

– объекты общестанционного назначения, которые не являются ЯУ или объектами по обращению с РАО (далее - общестанционные объекты).

**Возможные варианты снятия с эксплуатации РАЭС.**

В Концепции СЭ энергоблоков ОП РАЭС учтено продление ресурса энергоблоков № 1-2 на 20 лет, и планируемое, согласно «Энергетической стратегии на период до 2030 года» [3] в редакции 2013 года, продление ресурса энергоблоков № 3-4 на 20 лет.

В 2016 году проведены исследования строительных конструкций спецкорпусов-1,2 и ЗПСО. Установлен новый назначенный срок эксплуатации строительных конструкций СК-1,2 и ЗПСО до 31.12.2053.

Соответствующие прогнозируемые сроки завершения эксплуатации энергоблоков и объектов по обращению с РАО, принятые при расчетах и оценках в данной Концепции, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Прогнозируемые сроки завершения эксплуатации объектов ОП РАЭС

Наименование объекта	Дата пуска (начала эксплуатации)	Дата завершения эксплуатации по действующей лицензии	Дата завершения эксплуатации, с учетом возможного продления срока эксплуатации на 20 лет
<b>Ядерные установки</b>			
Энергоблок №1	22.12.1980	22.12.2030	22.12.2030
Энергоблок №2	22.12.1981	22.12.2031	22.12.2031
Энергоблок №3	21.12.1986	11.12.2017	11.12.2037
Энергоблок №4	10.10.2004	07.06.2035	07.06.2055
<b>Объекты по обращению с РАО</b>			
Спецкорпус энергоблоков № 1-2	22.12.1980	31.12.2053	31.12.2053
Спецкорпус энергоблоков № 3-4	21.12.1986	31.12.2053	31.12.2053
Здание переработки слабоактивных отходов (ЗПСО)	Блок хранения 2001 г. Блок переработки строится.	31.12.2053	31.12.2053

НП 306.2.02/1.004-98 [5] в соответствии с международной практикой и рекомендациями МАГАТЭ определяет следующие стадии СЭ ядерных энергоблоков (стадии СЭ - терминология НП 306.2.141-2008 [6]): прекращение эксплуатации, окончательное закрытие, консервация, выдержка и демонтаж. Стадии консервации и выдержки не являются обязательными. Стадия прекращения эксплуатации начинается после принятия решения о СЭ и окончательном останове энергоблока. В соответствии с НП 306.2.141-2008 [6] стадия прекращения эксплуатации относится к этапу жизненного цикла ЯУ «снятие с эксплуатации», согласно НП 306.2.02/1.004-98 [5] стадия прекращения эксплуатации является заключительным этапом эксп-

луатации.

Исходя из положений [2,5,6], определены два возможных варианта СЭ каждого ядерного энергоблока, которые анализируются в настоящей Концепции:

– немедленный демонтаж;

– отложенный демонтаж.

«Концепція зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України» [2] предусматривает возможность использования хранилищ РАО на протяжении всего периода СЭ ядерных энергоблоков, длительность которого составляет 22 и 52 года соответственно для вариантов немедленного и отложенного демонтажа. Соответствующие предельные сроки завершения эксплуатации храни-

лищ радиоактивных материалов приведены в таблице 1.

Концепция охватывает период времени от начала подготовки к СЭ и до полного завершения деятельности по СЭ объектов ОП РАЭС, указанных в таблице 1.

В зависимости от варианта СЭ энергоблоков, завершение рассматриваемого периода прогнозируется:

- для варианта немедленного демонтажа - в 2077 году;
- для варианта отложенного демонтажа энергоблоков (оптимальный вариант) - в 2098 году.

**Выбор оптимального варианта СЭ энергоблоков РАЭС.** При выборе оптимального варианта СЭ энергоблоков ОП РАЭС рассматривались следующие возможные варианты:

- (вариант №1) немедленный демонтаж;
- (вариант №2) отложенный демонтаж с подвариантами, рассматривающими длительность стадии выдержки в диапазоне 20-40 лет:

В соответствии с требованиями [5], выбор оптимального варианта СЭ в Концепции выполнен на основе принципа «затраты-польза», в пользу варианта с отложенным демонтажем.

Далее оптимизация варианта СЭ энергоблоков ОП РАЭС с отложенным демонтажем выполнена с

учетом достижения следующих условий:

- минимизация разрывов в сводном по всем энергоблокам графике реализации каждой из стадий СЭ (стадии прекращения эксплуатации, окончательного закрытия, консервации и демонтажа);
- достижение максимальной равномерности сводного по всем энергоблокам графика трудозатрат на СЭ;
- достижение максимальной равномерности сводного по всем энергоблокам графика наработки и переработки РАО от СЭ на указанных стадиях.

Поблочные графики стадий СЭ, динамики трудозатрат и ежегодных объемов образования переработанных РАО от СЭ энергоблоков ОП РАЭС для базового и оптимального вариантов СЭ с отложенным демонтажем приведены на рисунках 1 - 6.

Как видно из рисунков, условие непрерывности сводного по всем блокам графика реализации каждой из «активных» стадий СЭ соблюдается в обоих вариантах. При этом оптимальный вариант обеспечивает существенные преимущества с точки зрения равномерности трудозатрат и загруженности установок по переработке РАО.

С учетом этого факта, оптимальный вариант принят в качестве основы для построения стратегии СЭ энергоблоков ОП РАЭС

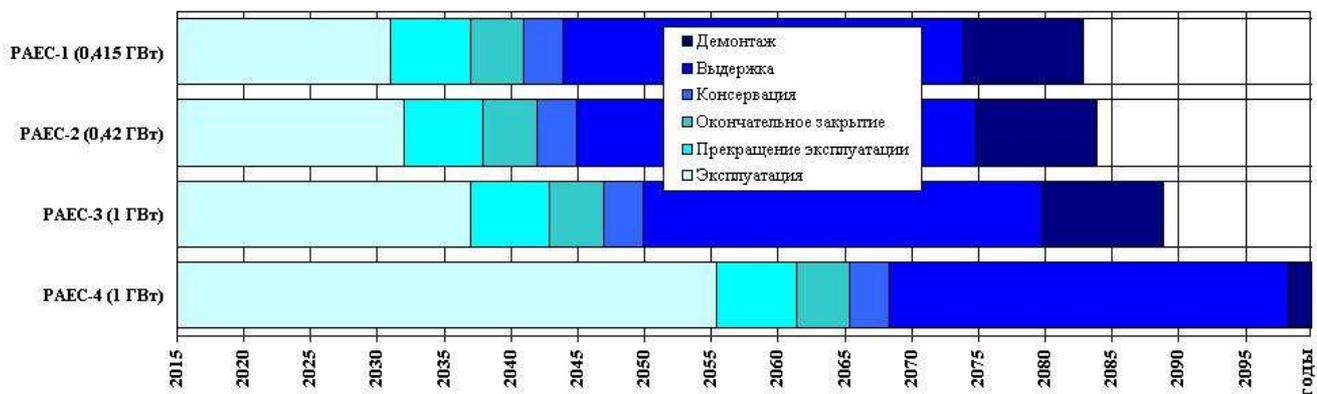


Рисунок 1. Базовый вариант. Поблочный график стадий СЭ энергоблоков ОП РАЭС (отложенный демонтаж)

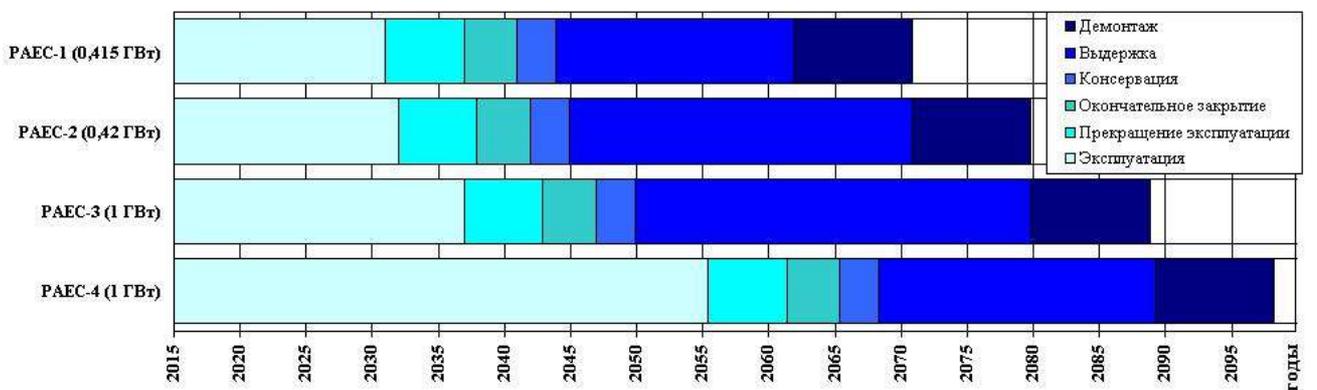


Рисунок 2. Оптимальный вариант. Поблочный график стадий СЭ энергоблоков ОП РАЭС (отложенный демонтаж)

## ОП РАЭС

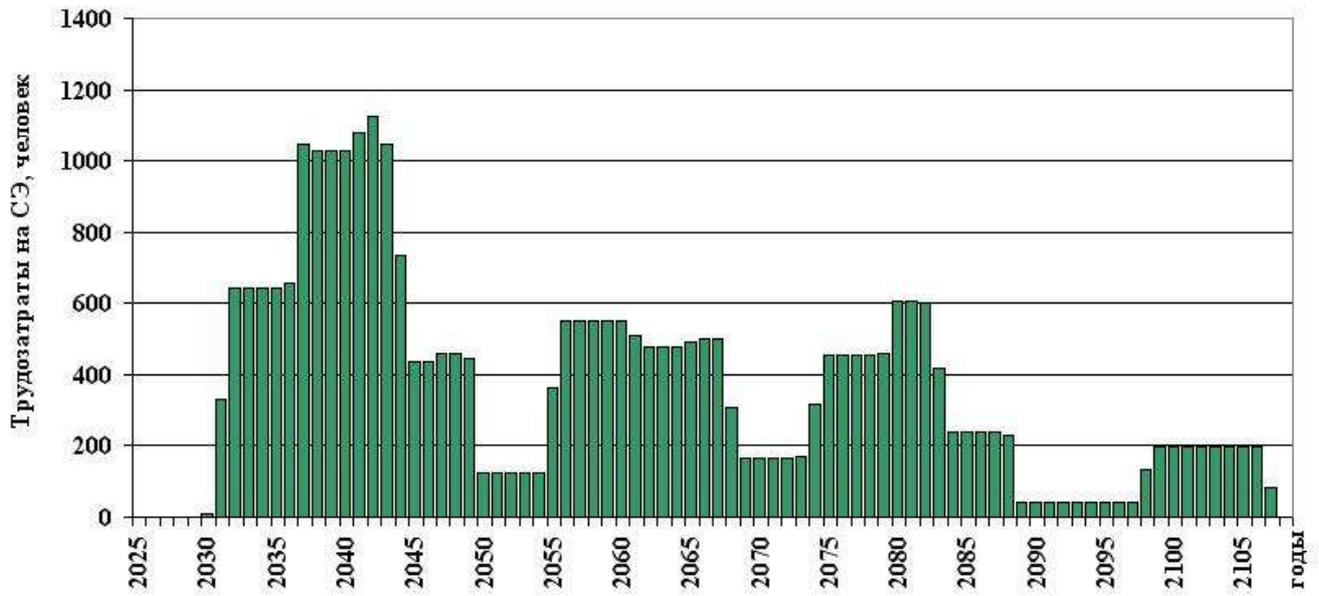


Рисунок 3. Базовый вариант. Трудозатраты на СЭ энергоблоков ОП РАЭС (отложенный демонтаж)

## ОП РАЭС

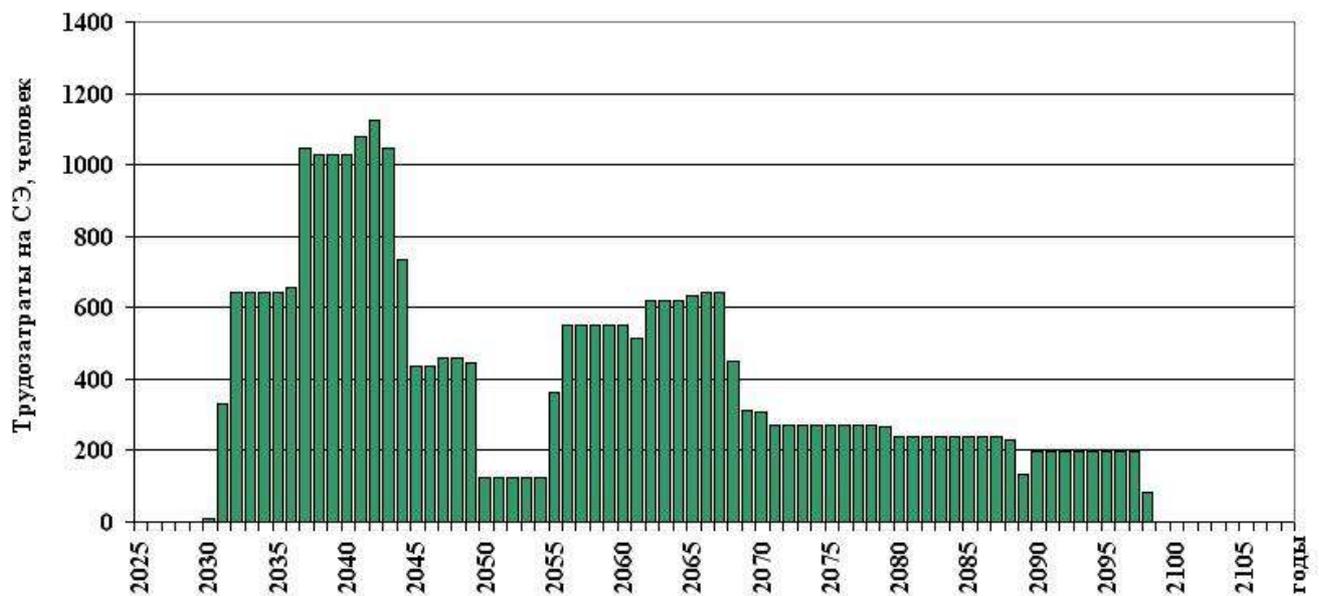


Рисунок 4. Оптимальный вариант. Трудозатраты на СЭ энергоблоков ОП РАЭС (отложенный демонтаж)

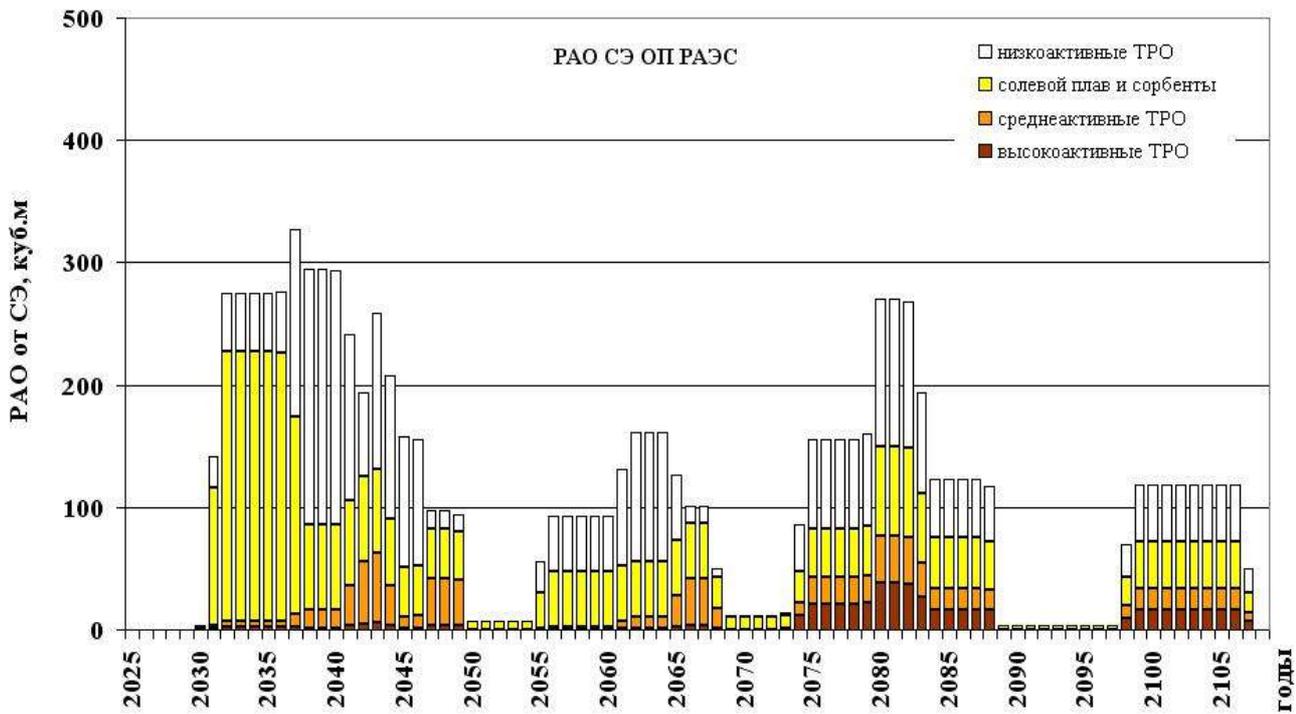


Рисунок 5. Базовый вариант. Ежегодные объемы образования переработанных РАО от СЭ энергоблоков ОП РАЭС (отложенный демонтаж)

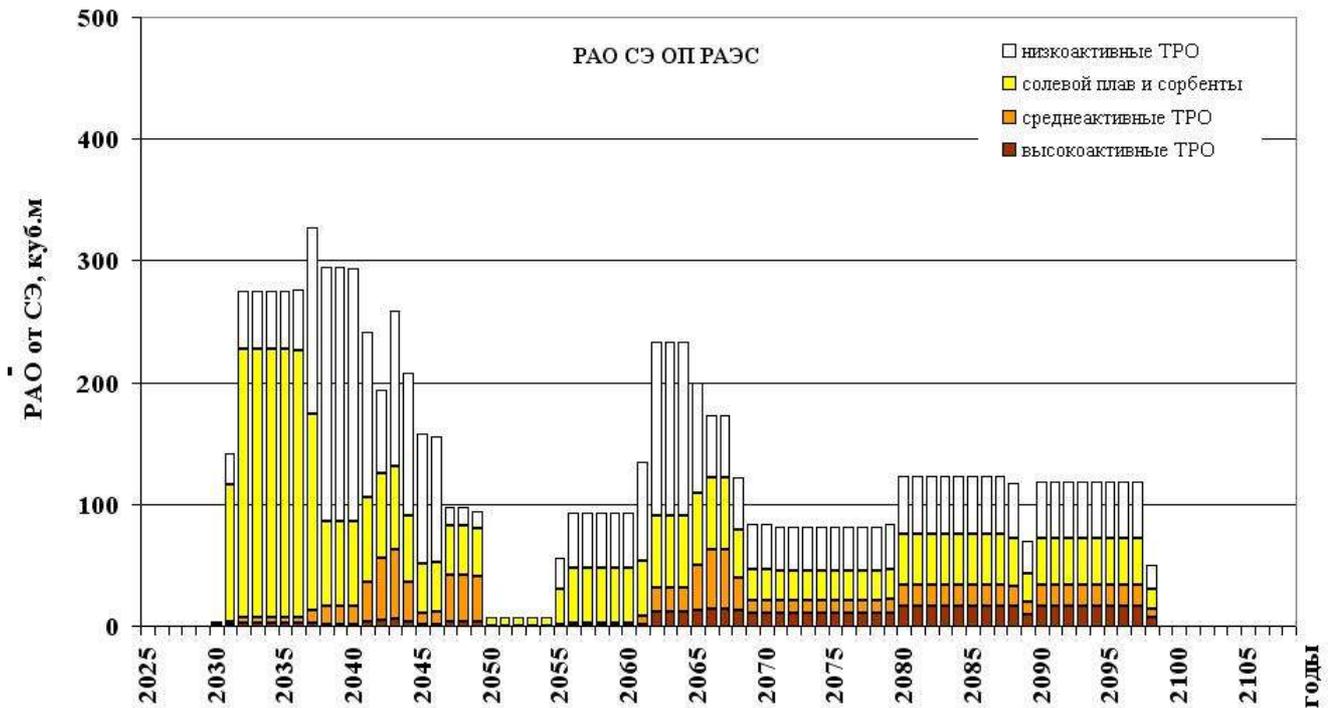


Рисунок 6. Оптимальный вариант. Ежегодные объемы образования переработанных РАО от СЭ энергоблоков ОП РАЭС (отложенный демонтаж)

**Оптимальный вариант СЭ энергоблока №1..**

Оптимальным вариантом СЭ энергоблока №1 ОП РАЭС определен вариант отложенного демонтажа с длительностью стадии выдержки 18 лет. Обобщенные характеристики этого варианта СЭ приведены в таблице 2.

Оценка суммарных объемов образования РАО от СЭ энергоблока №1 ОП РАЭС представлена в

таблице 3.

**Оптимальный вариант СЭ энергоблока №2.**

Оптимальным вариантом СЭ энергоблока №2 ОП РАЭС определен вариант отложенного демонтажа с длительностью стадии выдержки 26 лет. Обобщенные характеристики этого варианта СЭ приведены в таблице 4.

Таблица 2. Характеристики оптимального варианта СЭ энергоблока №1

Название стадии	Дата начала	Длительность, лет	Трудозатраты, чел.-лет
Прекращение эксплуатации	22.12.2030	6	1934,4
Окончательное закрытие	22.12.2036	4	1208,0
Консервация	22.12.2040	3	1052,1
Выдержка	22.12.2043	18	798,5
Демонтаж	22.12.2061	9	1656,2
Всего		40	6649,1

Таблица 3. Суммарные объемы образования переработанных РАО (по категориям) от СЭ для оптимальных вариантов СЭ энергоблоков ОП РАЭС (м<sup>3</sup>) до конца СЭ

Энергоблок	Солевой плав	ТРО-1	ТРО-2	ТРО-3
№1	962,1	840,7	207,3	111,1
№2	962,1	840,7	207,3	111,1
№3	950,0	1156,1	317,2	168,0
№4	950,0	1156,1	317,2	168,0

Таблица 4. Характеристики оптимального варианта СЭ энергоблока №2

Название стадии	Дата начала	Длительность, лет	Трудозатраты, чел.-лет
Прекращение эксплуатации	22.12.2031	6	1934,4
Окончательное закрытие	22.12.2037	4	1208,0
Консервация	22.12.2041	3	1052,1
Выдержка	22.12.2044	26	1078,2
Демонтаж	22.12.2070	9	1656,2
Всего		48	6928,9

Оценка суммарных объемов образования РАО от СЭ энергоблока №2 ОП РАЭС представлена в таблице 3.

**Оптимальный вариант СЭ энергоблока №3.** Оптимальным вариантом СЭ энергоблока №3 ОП РАЭС определен вариант отложенного демонтажа с длительностью стадии выдержки 30 лет. Обобщенные характеристики этого оптимального варианта приведены в таблице 5.

Оценка суммарных объемов образования РАО от СЭ энергоблока №3 ОП РАЭС представлена в таблице 3.

**Оптимальный вариант СЭ энергоблока №4.** Оптимальным вариантом СЭ энергоблока №4 ОП РАЭС определен вариант отложенного демонтажа с длительностью стадии выдержки 30 лет. Обобщенные характеристики этого оптимального варианта приведены в таблице 6.

Таблица 5. Характеристики оптимального варианта СЭ энергоблока №3

Название стадии	Дата начала	Длительность, Лет	Трудозатраты, чел.-лет
Прекращение эксплуатации	11.12.2037	6	2549,5
Окончательное закрытие	11.12.2043	4	1413,0
Консервация	11.12.2047	3	1129,0
Выдержка	11.12.2050	30	1279,0
Демонтаж	11.12.2080	9	1771,5
Всего		52	8142,0

Таблица 6. Характеристики оптимального варианта СЭ энергоблока №4

Название стадии	Дата начала	Длительность, лет	Трудозатраты, чел.-лет
Прекращение эксплуатации	7.06.2055	6	2549,5
Окончательное закрытие	7.06.2061	4	1413,0
Консервация	7.06.2065	3	1129,0
Выдержка	7.06.2068	21	946,0
Демонтаж	7.06.2089	9	1771,5
Всего		43	7809,0

Оценка суммарных объемов образования РАО от СЭ энергоблока №4 ОП РАЭС представлена в таблице 3.

Прогнозируемые сроки завершения эксплуатации и СЭ объектов ОП РАЭС приведены в таблице 7.

Таблица 7. Прогнозируемые сроки завершения эксплуатации и СЭ объектов ОП РАЭС (оптимальный вариант)

Название объекта	Дата пуска (начала эксплуатации)	Дата завершения эксплуатации	Дата завершения СЭ
Энергоблок №1	22.12.1980	22.12.2030	22.12.2070
Энергоблок №2	22.12.1981	22.12.2031	22.12.2079
Энергоблок №3	21.12.1986	11.12.2017	11.12.2089
Энергоблок №4	10.10.2004	07.06.2035	7.06.2098
Спецкорпус энергоблоков № 1-2	22.12.1980	31.12.2053	7.06.2098
Спецкорпус энергоблоков № 3-4	21.12.1986	31.12.2053	7.06.2098
Здание переработки слабоактивных отходов (ЗПСО)	Блок хранения 2001 г. Блок переработки строится.	31.12.2053	7.06.2098

**Оценка финансовых затрат на различных стадиях СЭ.** Оценка финансовых затрат на отдельных стадиях СЭ энергоблоков ОП РАЭС выполнена на основе экспертной оценки объемов и длительности работ по СЭ по методике, аналогичной использованной в «Концепції зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України» [2].

Оценка выполнялась в соответствии с «Положенням (стандартом) бухгалтерського обліку. Стаття 16 «Витрати» [7] с распределением прогнозируемых затрат по следующим элементам – прямые затраты на оплату труда, прямые материальные затраты, другие прямые затраты, общепроизводственные затраты.

Работы по СЭ, планируемые к выполнению силами ОП РАЭС, считались бесприбыльными. Для услуг предприятий научно-технического, проектного и инжинирингового профиля учитывалась плановая прибыль в размере 10 % от стоимости работ.

За исключением обязательных отчислений на социальные мероприятия, принятых на уровне 36,8 % (по состоянию на 01.01.2013) от затрат на оплату труда, затраты ОП РАЭС на СЭ не рассматривались в качестве объекта налогообложения. Для услуг предприятий научно-технического, проектного и инжинирингового профиля, помимо отчислений на социальные мероприятия, учитывалась ставка НДС в размере 20 %.

Оцененные для оптимальных вариантов финансовые затраты на СЭ энергоблоков №1-4 ОП РАЭС (в ценах на 01.01.2013 без учета дисконтирования) приведены в таблице 8.

Таблица 8. Оцененные финансовые затраты на СЭ энергоблоков №1-4 ОП РАЭС (без учета затрат на захоронение РАО от СЭ)

Название стадии	Энергоблок			
	№1 млн. грн	№2 млн. грн	№3 млн. грн	№4 млн. грн
Прекращение эксплуатации	587,3	587,3	790,3	790,3
Окончательное закрытие	347,2	347,2	442,9	442,9
Консервация	313,0	313,0	382,2	382,2
Выдержка	296,4	415,0	590,3	423,3
Демонтаж	580,5	580,5	728,7	728,7
Всего	2124,4	2243,0	2934,5	2767,4

**Накопление финансовых средств на СЭ энергоблоков №1-4.** Требования к порядку и процедуре накопления средств на СЭ (без учета будущих затрат на захоронение РАО) в финансовом резерве для СЭ ядерных установок определены Законом Украины «Про впорядкування питань,

пов'язаних з забезпеченням ядерної безпеки» [8] и Постановлением КМ Украины «Питання створення, накопичення та використання фінансового резерву для зняття з експлуатації ядерних установок» [9].

В соответствии с положениями [9], накопление финансовых средств на СЭ энергоблоков №1-3 ОП РАЭС, отработавших к моменту начала накопления (2005 г.) более половины их проектного срока эксплуатации, должно осуществляться в период от начала накопления до завершения их СЭ (с учетом планируемого продления их эксплуатации). Накопление финансовых средств на СЭ энергоблока №4 ОП РАЭС должно осуществляться в период от начала накопления до его окончательного останова (с учетом планируемого продления его эксплуатации).

Размеры ежегодных отчислений на СЭ энергоблоков №1-4 ОП РАЭС, рассчитанные в соответствии с «Порядком установления размера отчислений эксплуатирующей организации (оператора) на специальный счет», утвержденным [9], приведены в таблице 9. Динамика накопления и расходования финансовых средств на СЭ энергоблоков №1-4 ОП РАЭС для оптимального варианта представлена на рисунке 7 (в ценах на 01.01.2013, без учета дисконтирования).

**Накопление финансовых средств на захоронение РАО от СЭ энергоблоков №1-4.** Законодательство ограничивает срок хранения РАО в пристанционных хранилищах и обязывает эксплуатирующую организацию АЭС передавать их на захоронение специализированным предприятиям по обращению с РАО. Производители РАО должны платить государству сбор за образование радиоактивных отходов. В 2008 году Законом Украины №515-VI «Про внесення змін до деяких законів України щодо поводження з радіоактивними відходами» [13] создан Государственный фонд обращения с РАО.

Таблица 9. Ежегодные отчисления на СЭ энергоблоков №1-4 ОП РАЭС

Отчисления на СЭ для оптимального варианта	Энергоблок				Всего
	№1	№2	№3	№4	
Год начала отчислений на СЭ	2005	2005	2005	2005	
Год завершения отчислений на СЭ	2070	2079	2088	2054	
Размер отчислений на СЭ, млн грн/год на 2017-2018 гг.	34,6	32,0	36,8	61,0	164,4
Размер отчислений на СЭ, млн грн/год * с 2005 по 2016 года, включительно	12,7	11,9	14,5	25,4	

## ОП РАЭС

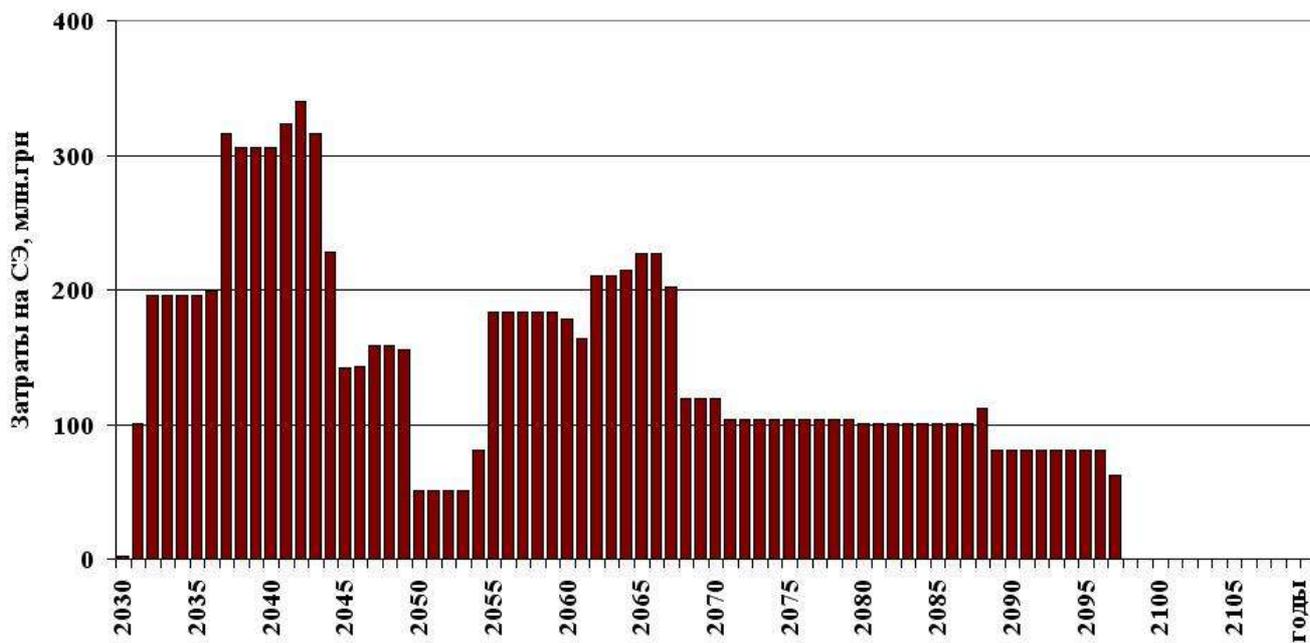


Рисунок 7. Сводная динамика затрат на СЭ для варианта отложенного демонтажа энергоблоков №1-4 ОП РАЭС (оптимальный вариант)

Обращение с радиоактивными отходами в Украине осуществляется в соответствии с Законом Украины «Про Загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами» [10]. Ежегодный объем расходов на осуществление предусмотренных данной Программой мероприятий корректируется Кабинетом Министров Украины в соответствии с законом о Государственном бюджете Украины на соответствующий год и приоритетами Программы.

Финансирование бюджетных программ, в рамках которых выполняются работы по обращению с РАО, образовавшимися в результате Чернобыльской катастрофы, а также финансирование «Общегосударственной целевой экологической программы обращения с радиоактивными отходами», других мероприятий, связанных с обращением с РАО, осуществляется за счет средств Государственного фонда обращения с РАО, согласно части первой статьи 4 Закона Украины «Про поводження з радіоактивними відходами» [11].

С 1 января 2011 года порядок отчислений финансовых средств регулируется Налоговым кодексом Украины [12]. Согласно п.14.1.57 Налогового кодекса Украины «Экологический налог - общегосударственный обязательный платеж взимается исходя из фактических объемов выбросов в атмосферный воздух, сбросов в водные объекты загрязняющих веществ, размещения отходов, фактического объема радиоактивных отходов, которые временно хранятся их производителями, фактиче-

ского объема образованных радиоактивных отходов и из фактического объема радиоактивных отходов, накопленных до 1 апреля 2009 года».

Согласно п. 247.1. Налогового кодекса Украины «Ставка налога за образование радиоактивных отходов производителями электрической энергии - эксплуатирующими организациями ядерных установок (атомных электростанций), включая уже накопленные, составляет 0,0114 грн на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии» в 2017 году.

Главная функция ГП «НАЭК «Энергоатом» в этом вопросе - подготовка РАО к передаче государству на захоронение. ГП «НАЭК «Энергоатом» заплатило государству за образование РАО в 2016 году 830 млн.грн.

В соответствии с положениями Ст.4 Закона Украины «Про поводження з радіоактивними відходами» [11], государство гарантирует принятие без дополнительной оплаты всего объема РАО, образованных в течение осуществления деятельности субъектом, который производит отходы и платит экологический налог за загрязнение окружающей природной среды.

Законодательная база в отношении эксплуатирующих организаций (операторов) атомных станций не различает РАО по периодам и источникам их образования (эксплуатационные РАО, РАО от СЭ или РАО от переработки ОЯТ) и устанавливает норматив экологического налога на основе показателей текущего производства электрической энергии на АЭС, а также объемов РАО, накопленных

до 01.04.2009 [12].

Таким образом, накопление средств на захоронение РАО от СЭ энергоблоков №1-4 ОП РАЭС должно осуществляться в составе общих платежей оператора ОП РАЭС в период от начала платежей экологического налога до окончательного останова последнего из этих энергоблоков (с учетом планируемого продления его эксплуатации).

Прогноз размеров ежегодных платежей экологического налога эксплуатирующей организацией ОП РАЭС приведен в таблице 10.

Таблица 10. Прогноз размеров ежегодных платежей экологического налога за загрязнение окружающей природной среды эксплуатирующей организацией ОП РАЭС

Ежегодные платежи сбора за загрязнение окружающей природной среды	Энергоблок				Всего
	№1	№2	№3	№4	
Год начала платежей сбора	2009	2009	2009	2009	
Год завершения платежей сбора	2030	2031	2036	2054	
Размер сбора в 2016 году, млн грн/год	19,5	19,7	48,6	48,6	136,4

### Список использованной литературы

1. СОУ НАЕК 015:2012 Зняття з експлуатації. Вимоги до змісту концепції зняття з експлуатації АЕС. ДП НАЕК «Енергоатом», 2012 р.
2. «Концепція зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України», затверджена Наказом Міненергугілля України від 10.12.2015 №798.
3. «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», схвалена Розпорядженням КМ України від 24.07.2013 № 1071-р.
4. «Комплексная программа работ по продлению срока эксплуатации действующих энергоблоков атомных электростанций», одобренная Распоряжением КМ Украины от 29.04.2004 №263-р.
5. НП 306.2.02/1.004-98 Загальні положення забезпечення безпеки при знятті з експлуатації атомних електростанцій та дослідницьких ядерних реакторів. МЕБУ, 1998 р.
6. НП 306.2.141-2008 Загальні положення безпеки атомних станцій. ДКЯРУ, 2007 р.
7. Положення (стандарт) бухгалтерського обліку. Стаття 16 «Витрати», затверджене наказом Мініфіну України № 318 від 31.12.1999.
8. Закон України «Про впорядкування питань, пов'язаних з забезпеченням ядерної безпеки» №1868-IV від 24.06.2004.
9. Постанова КМ України «Питання створення, накопичення та використання фінансового резерву для зняття з експлуатації ядерних установок» №594 від 27.04.2006.
10. Закон України «Про Загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами» №516-VI від 17.09.2008.
11. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» №255 від 30.06.1995.
12. Податковий кодекс України.
13. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо поводження з радіоактивними відходами» №515-VI від 17.09.2008..

Получено 16.04.2018

УДК 621.039.7

*А. А. Корнилов<sup>1</sup>, С. В. Барбашев<sup>2</sup>*<sup>1</sup>*ОП Ривненская АЭС, г. Вараш*<sup>2</sup>*Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса*

### О ВКЛЮЧЕНИИ КОМПЛЕКСА ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В СОСТАВ КОМПЛЕКСА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА РИВНЕНСКОЙ АЭС

Проанализирована ситуация с поступлением и накоплением РАО на АЭС Украины, в т.ч. на Ривненской АЭС (РАЭС). Показана острая необходимость решения проблемы роста объемов РАО в пристанционных хранилищах АЭС. Описан создаваемый на РАЭС в рамках проекта ТАСИС комплекс по переработке РАО. Перечислены его преимущества и недостатки. Усовершенствовать вводимый в эксплуатацию на РАЭС комплекс переработки РАО предлагается путем включения в его схему комплекса плазменной переработки, который является инновационным подходом в области обращения с РАО, обеспечивающим рост эффективности процессов переработки РАО. Дано описание комплекса плазменной переработки твердых радиоактивных отходов. Такой модифицированный комплекс позволит сократить объем низко- и среднеактивных отходов в десятки раз. Главными преимуществами плазменного метода, по сравнению с другими, являются расширение возможностей переработки отходов, различных по морфологическому составу, а также получение на выходе из установки конечного продукта (шлакового компанда), который сохраняет химическую стойкость и механическую прочность на протяжении долгого времени, что исключит повторную переработку РАО в будущем.

**Ключевые слова:** твердые радиоактивные отходы, переработка радиоактивных отходов, комплекс переработки радиоактивных отходов, комплекс плазменной переработки радиоактивных отходов.

**Вступление.** В процессе ведения на АЭС основного технологического процесса, регламентных и ремонтных операций образуются радиоактивные отходы (РАО). Безопасное обращение с РАО – это важная составляющая общей системы безопасности при использовании ядерной энергии, главной целью которой является охрана здоровья человека и обеспечение безопасности для окружающей среды как в настоящее время, так и в будущем.

За последние 10 лет доля АЭС в выработке электроэнергии в Украине увеличилась с 47% в 2007 году до 55% в 2017 году. Однако, при усиленной эксплуатации АЭС, постоянно откладывается на будущее решение ряда важных проблем, связанных с обращением РАО, к числу которых можно отнести отсутствие на АЭС комплексных установок по переработке отходов, достаточного количества площадок для долговременного хранения, а также захоронения РАО, особенно высокоактивных, например, таких, как продукты переработки отработанного ядерного топлива [1].

В настоящее время на АЭС Украины накопилось значительное количество РАО, среди которых серьезную проблему с точки зрения обращения представляют твердые радиоактивные отходы (ТРО), в состав которых входит отработавшее проектный срок оборудование, материалы, элементы конструкций, спецодежда, строительные отходы, отходы теплоизоляционных волокнистых материалов и др. [2]. Так, по состоянию на 31.12.2016, общее количество накопленных ТРО на АЭС Украины оценивается в 40,2 тыс. м<sup>3</sup>, из

которых только за 2016 год было образовано 1,2 тыс. м<sup>3</sup> ТРО (рис. 1-4) [2].

Технология обращения с ТРО на действующих украинских АЭС включает сбор, первичную сортировку и переработку до состояния, приемлемого для транспортировки с целью дальнейшей переработки и последующего временного хранения в проектных станционных хранилищах.

Ривненская АЭС (РАЭС) – одна из первых АЭС Украины, которая начала активно заниматься усовершенствованием системы обращения с ТРО. На станции реализуется ряд проектов международной технической помощи, таких, как ТАСИС и ИСЯБ (Инструмент сотрудничества в области ядерной безопасности от Европейской Комиссии).

Существующая в настоящее время на РАЭС система обращения с ТРО включает процессы:

- сбора отходов в полиэтиленовые мешки в местах их образования;
- первичной сортировки отходов с фрагментацией (при необходимости);
- транспортировки отходов из мест временного сбора;
- сортировки ТРО по активности: низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО) отходы;
- транспортировки ТРО из мест временного сбора в спецкорпус (СК) № 2.

ТРО, рассортированные по типу и классифицированные по активности, размещаются на временное хранение в хранилище ТРО в спецкорпусе на площадке РАЭС.

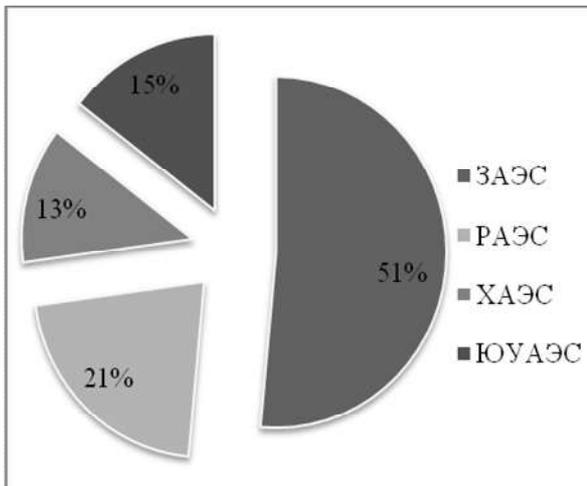


Рисунок 1. Распределение количества образованных ТРО на АЭС в 2016 году

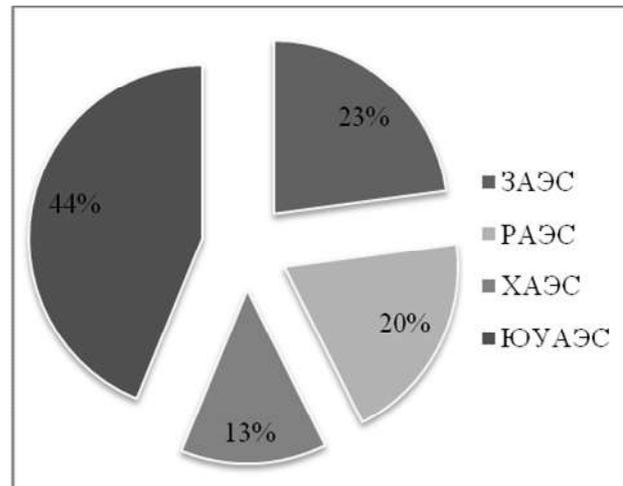


Рисунок 2. Распределение количества накопленных ТРО на АЭС на 31.12.2016 г.

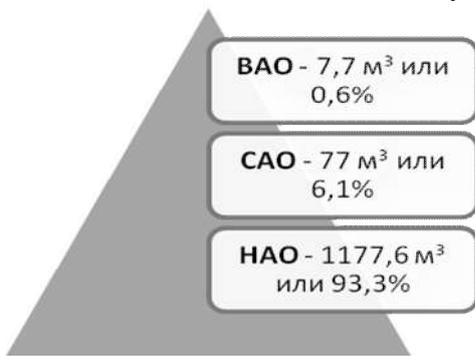


Рисунок 3. Категории образованных ТРО по активности на АЭС в 2016 году

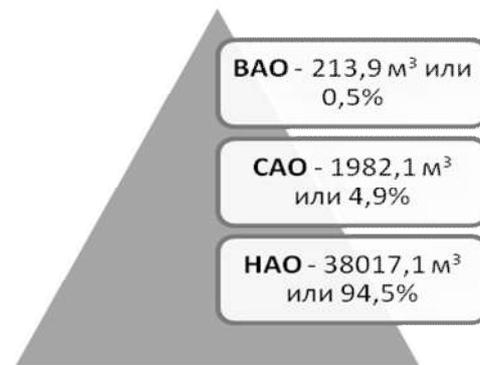


Рисунок 4. Категории накопленных ТРО по активности на АЭС на 31.12.2016 г.

Для минимизации образования ТРО на РАЭС реализуется ряд мероприятий, основными из которых являются:

- применение современных технологий дезактивации оборудования, помещений и средств индивидуальной защиты персонала;
- совершенствование планирования работ в зоне строгого режима (использование обменной тары для лакокрасочных материалов, ограничение внесения в зону строгого режима упаковочного материала и предметов, которые не используются непосредственно в технологическом процессе и т.п.);
- нормирование образования / поступления ТРО по подразделениям (установление лимитов поступления РАО);
- дезактивация и повторное использование загрязненных материалов (организация дефектации, учета и хранения пригодного к повторному использованию теплоизоляционного материала, использование спецодежды, непригодной для дальнейшего использования в качестве обтирочного материала) [2].

Информация о поступлении в хранилища и распределении ТРО по категориям активности на РАЭС по годам приведена на рисунках 5– 6 [2].

Суммарный объем ТРО, поступивших на временное хранение в хранилища ТРО (ХТРО) РАЭС в 2017 году, составляет почти 300 м<sup>3</sup>, что на 10% превышает объем ТРО, поступивших в 2016 году. При этом 94% составляют НАО, 5% – САО, и 1% – ВАО.

В настоящее время на РАЭС заполнение ХТРО осуществляется быстрыми темпами, особенно хранилищ НАО. Их объемы практически полностью заполнены (рисунок 7). Для хранилищ САО ситуация немного лучше. Они заполнены чуть более чем на 40%. Но, учитывая быстрые темпы образования отходов, это не исключает проблемы наличия объемов хранения. Эти обстоятельства обуславливают поиск путей её решения в качестве первоочередной и неотложной задачи.

Причина сложившейся ситуации заключается в отсутствии на РАЭС необходимой инфраструктуры для полноценной переработки и подготовки РАО к хранению и транспортировке, которая включала бы сортировку РАО по морфологическому составу, обеспечивала физико-химическую стабилизацию отходов и надежную фиксацию радионуклидов в них, позволяла эффективно снижать уровень гамма-излучения в контейнере РАО.

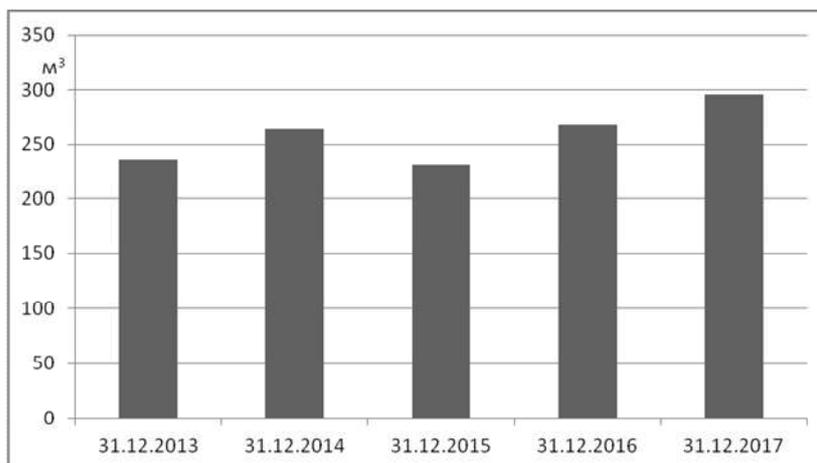


Рисунок 5. Поступление ТРО в хранилища на РАЭС

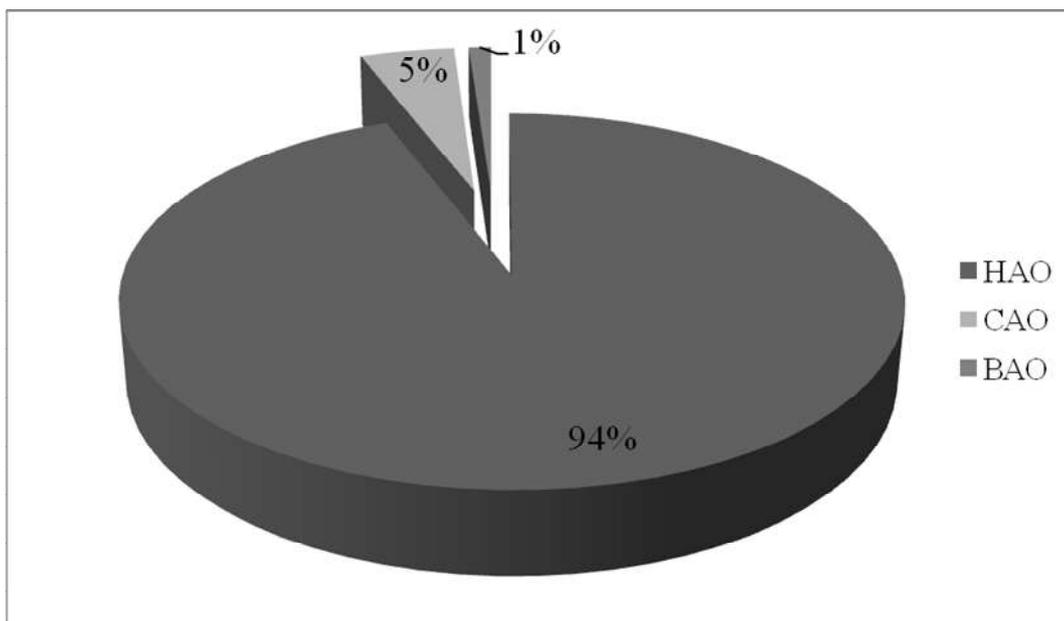


Рисунок 6. Распределение объемов накопленных на РАЭС ТРО по категориям активности на 31.12.2017.

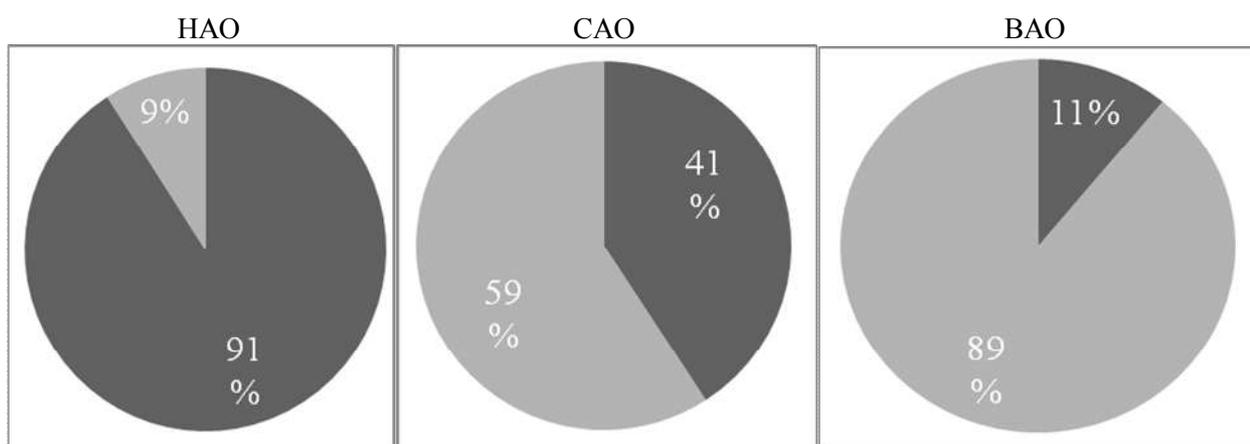


Рисунок 7. Заполнение хранилищ ТРО на РАЭС по категориям активности (черным - заполненные объемы хранилищ ТРО; серым - свободные объемы хранилищ ТРО)

Для устранения указанных выше недостатков, связанных с переработкой и длительным хранением/захоронением уже накопленных в процессе эксплуатации станции ТРО, и тех которые будут образовываться при снятии энергоблоков РАЭС с

эксплуатации, с 2005 года на РАЭС проводится работа в рамках проекта международной технической помощи TACIS U1.01 / 01B «Создание комплекса по переработке РАО на РАЭС» (далее – КП РАО) [3].

Согласно выводам МАГАТЭ и Европейской комиссии основной целью этого проекта является повышение уровня безопасности АЭС путем внедрения передовых технологий по переработке РАО, что, в свою очередь, позволит вывести систему обращения с РАО на РАЭС на новый, современный уровень [3].

Данный комплекс планируется ввести в эксплуатацию в первой половине 2018 года. Следует сказать, что аналогичные комплексы уже начали создаваться также на Запорожской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС.

Технологическая линия комплекса по переработке РАО на РАЭС включает семь установок. Четыре установки: извлечения (ONET, Франция), сортировки и фрагментации ТРО (Nukem, Герма-

ния), суперпрессования Megane 15 (Nukem, Германия) и измерения активности HS 541 (Envinet, Чехия) поставлены в рамках проекта TACIS. Остальные три установки: цементирования (Энвитек, Украина), очистки масла и дезактивации металла (консорциум Спецэнерготикос, Литва - Украина) – будут поставлены за средства НАЭК «Энергоатом». На всех установках, которые на сегодняшний день уже смонтированы, завершены пробные испытания и проведена проверка функциональности вспомогательных систем: спецканализации, вентиляции, пожаротушения, связи и видеонаблюдения [1].

На рисунке 8 показана общая схема создаваемого на РАЭС комплекса по переработке ТРО (КПТРО) [2].



Рисунок 8. Схема создаваемого на РАЭС комплекса по переработке ТРО

Планируется, что комплекс будет иметь следующие технические характеристики (таблицы 1,2) [2].

Таблица 1. Проектные характеристики комплекса по переработке ТРО

Годовая проектная производительность	750 м <sup>3</sup> / год
Производительность за смену	4,5 м <sup>3</sup>
Средний уровень образования твердых НАО на РАЭС	280 м <sup>3</sup> в год
Количество накопленных на РАЭС твердых НАО	7200 м <sup>3</sup>
Время необходимо для извлечения всех ТРО из хранилищ	17-20 лет

Стоимость создания КПТРО - 342 миллиона гривен (или около 12 млн. дол.), из них 103 млн. грн. получены благодаря проекту международной технической помощи TACIS совместно с Еврокомиссией [4].

Таблица 2. Характеристики ТРО, поступающих на переработку на КПТРО

Мощность дозы гамма-излучения на расстоянии	10 см - ≤ 280 мкГр/ч
Содержание альфа-излучателей	≤ 0,1 кБк/кг
Поверхностное загрязнение, бета-излучение	≤ 267 Бк/см <sup>2</sup>
Масса фрагментов ТРО	≤ 250 кг
Длина фрагментов ТРО	до 3 м

При експлуатації КППРО будуть вирішуватися наступні задачі: вилучення ТРО з хранилищ РАЭС; попередня обробка вилучених ТРО; транспортування ТРО в будівлю, в якій розташований комплекс; прийом, фрагментація і сортування ТРО, вилучених з хранилищ, а також поступаючих при експлуатації РАЭС, дезактивація радіоактивно забрудненого металу; упаковка ТРО в контейнери-бочки (при необхідності - сушіння ТРО в бочках); переробка ТРО з метою зменшення об'єму шляхом суперпресування (усилля 1500 т); цементування ТРО в контейнерах-бочках; вимірювання активності контейнерів, паспортизація ТРО; підготовка упаковок ТРО для передачі на тимчасове зберігання / захоронення [1].

Внедрення на РАЭС такого комплексу буде сприяти зменшенню об'ємів відходів, що утворюються в процесі експлуатації, і тих, що знаходяться в хранилищах, а також кондиціонуванню РАО з метою підготовки до передачі на спеціалізовані підприємства для наступного захоронення.

Однак, КППРО, зменшуючи об'єм РАО, не звільнений від недоліків, і не дозволяє повністю досягти головної мети переробки - забезпечення стану РАО, необхідного для захоронення в централізованих хранилищах. В їх числі:

- відсутність надійної фіксації радіонуклідів;
- недостатня ефективність зниження рівня гамма-випромінювання в контейнері;
- залежність механічної міцності цементних блоків від вмісту солі. (При наявності солей з концентрацією більше 150 г/л міцний моноліт не утворюється);
- необхідність зберігання блоків в спеціальних могилах, які не повинні допускати контакту РАО з водою;
- неможливість переробки РАО, що містять різні вибухопозитивні і легкозпалювані речовини;
- складність переробки РАО, що містять забруднену арматуру, великогабаритні деталі і обладнання;
- утворення великої кількості пилу, для видалення якої пресуюче обладнання повинно розміщуватися в ізолюваних приміщеннях з пилоочилюючим обладнанням;
- транспортування відходів здійснюється в тимчасові хранилища, т.к. місць постійного зберігання ТРО на РАЭС не існує.

Для усунення більшості з вищевказаних недоліків, нами пропонується впровадити на РАЭС комплекс плазмової переробки ТРО (КПП ТРО) [5]. Це дозволить досягти максимального скорочення об'ємів ТРО, підвищить надійність стабілізації РАО, виключить необхідність

повторного кондиціонування продуктів переробки РАО через 30-50 років.

Особливістю технології плазмової переробки є підвищення безпеки наступного оброблення ТРО: переробляються раніше підпресовані змішані відходи після вилучення з тари і переупаковки в крафт-мішки, а також відходи, які піддалися суперкомпактуванню в металевій упаковці, різко (в 20-40 раз) зменшується об'єм РАО для наступного захоронення [6], виводяться з наступного оброблення горючі відходи, РАО перетворюються в шлаковий компаунд - свого роду штучний камінь, з якого радіоактивні елементи практично не вимиваються, що є найважливішою перевагою цієї технології.

Схема комплексу плазмової переробки ТРО показана на рисунку 9. Основні його вузли - це шахтна піч, яка призначена для прийому і переробки ТРО; система плазматронів, призначених для плавлення ТРО, і система збору розплавленого шлаку, який сливається з пічки в контейнер.

В годину піч може переробляти 200-250 кг ТРО, виробляючи від 50 до 80 кг шлаку, при температурі в пічці 1200-1300 °С [7] (таблиця 4, 5). Густина шлаку значно вище, ніж у вихідній речовині. Установка може неперервно працювати впродовж 360 годин, після чого проводяться планово-профілактичні роботи. Термін служби установки - 30 років.

Таблиця 4. Технічні характеристики комплексу плазмової переробки РАО [7]

Виробничість по твердим відходам, кг/год	200 - 250
Виробничість по шлаку, кг/год	50 - 80
Вихід піролізних газів з шахтної пічки, кг/год	300 - 400
Вихід газів з шахтної пічки, норм. м <sup>3</sup> /год	2000 - 3000
Температура в плавителі пічки, °С	1500 - 1800
Температура піролізних газів, °С	300
Електрична потужність плазмових джерел нагріву, кВт	100-150
Кількість плазмових джерел нагріву	
В плавителі пічки	2
В камері згорання піролізних газів	1
Встановлена електрична потужність обладнання загальної і спеціальної призначення, кВт	1000
Режим роботи комплексу	
Неперервна робота, год	360 - 720
Планово-профілактичні роботи, год	360
Вихід комплексу на робочий режим, год	16 - 24

Таблица 5. Показатели эксплуатационных затрат при переработке 5000 м<sup>3</sup> РАО в год [7]

Наименование статей расходов	Единица измерения	Количество
Годовой объем переработки РАО	м <sup>3</sup>	5000
Усредненный коэффициент сокращения объема	K <sub>y</sub>	20-40
Объем шлака в унитарном контейнере (УК)	л	22
Количество УК на год	шт.	6250
Количество УК в одном невозвратном защитном контейнере (НЗК)	шт.	36
Количество УК в одном НЗК-150-1,5П для размещения УК	шт.	174
Количество УК в одном НЗК-150-1,5П для размещения вторичных отходов	шт.	19
Количество УК в одном контейнере металлическом защитном (КМЗ)	шт.	64
Количество КМЗ для размещения УК	шт.	98
Расходы тех. воды для охлаждения аппаратов в год	м <sup>3</sup>	1 000 000
Расходы хим. обессоленной воды в год	м <sup>3</sup>	400
Расходы электроэнергии в год*	кВт*ч	2 85 000 000
Потребность отопительной системы (приточка)	Гкал	2800

\*Расчеты проводились с учетом того, что перерабатываться будут 5000 м<sup>3</sup> РАО в год. Например, на РАЭС за 2017 год было образовано менее 300 м<sup>3</sup> ТРО. При обработке такого объема отходов на обслуживание КПП ТРО потребуется около 170 млн.кВт час в год, что составит меньше 1% годового производства электроэнергии станцией (Энергоблоками Ровенской АЭС в 2017 году произведено 19 млрд 792,9 млн кВт часов электроэнергии).

Технология переработки ТРО методом плазменной витрификации является одним из перспективных направлений в области обращения с РАО. Так, данный метод успешно применяется не только ведущими западными компаниями, такими, как «ZWILAG» (Швейцария), «Belgoprocess» (Бельгия), «Fortum Corporation» (США), «NASA» (США), «Ontario Power Generation» (Канада), «Ontario Hydro» (Канада), но и российскими предприятиями: «Радон», «Нововоронежская АЭС» [6, 8].

Опытная эксплуатация КПП РАО, которая была осуществлена в 2015 году на Нововоронежской

АЭС, показала, что промышленное применение плазменного метода переработки РАО дает результаты, соответствующие техническим характеристикам, указанным в таблицах 4,5. В перспективе планируется внедрение аналогичных комплексов на других предприятиях «Росатома» [6].

Данные, представленные в таблице 6, свидетельствуют о том, что применение метода плазменной переработки ТРО расширяет возможность переработки отходов по морфологическому составу по сравнению с такими методами, как сжигание, цементирование, прессование [7].

Технические характеристики метода плазменной переработки отходов, положительные результаты, полученные при его применении на «ядерных» предприятиях разных стран, дают основание предложить этот метод для внедрения на украинских АЭС и, в первую очередь, на РАЭС, т.к. эта станция первой в Украине начала внедрять КППРО и близка к его завершению.

Ниже представлена предлагаемая авторами настоящей статьи измененная схема комплекса переработки ТРО, вводимого в эксплуатацию на РАЭС в рамках проекта TACIS, усовершенствованная включением в него комплекса плазменной переработки (рисунок 10), который является инновационным подходом в области обращения с РАО, обеспечивающим рост эффективности процессов переработки РАО. В измененной схеме установки прессования (подпрессовка, суперпрессование) и цементирования в блоке переработки ТРО заменяются установкой плазменного плавления.

Следует отметить, что стоимость комплекса плазменной переработки твердых радиоактивных отходов соизмерима со стоимостью всего внедряемого на РАЭС комплекса (в 2013 году стоимость КПП ТРО на Нововоронежской АЭС составила 350 млн. руб. или около 10,5 млн. \$ [9], тогда, как стоимость КППРО составляет около 12 млн.\$ [4]).

Предварительное сравнение стоимости обращения с горючими и негорючими ТРО показало, что наименее затратный метод – прямое цементирование РАО. Однако, если учитывать объемы кондиционированных РАО и стоимость их подготовки к захоронению, метод прямого цементирования оказывается наиболее затратным (рисунок 11) [10].

Таким образом, суммарные затраты на переработку и подготовку к захоронению (пакетирование, транспортировка, временное хранение) 1 м<sup>3</sup> ТРО методом плазменной переработки почти такие же, как и при сжигании, и на ~800 \$/ м<sup>3</sup> меньше, чем для метода цементирования [10]. А, если учесть, что применение КПП ТРО позволяет уменьшить объем отходов для захоронения по сравнению с «традиционными» методами в несколько десятков раз (см. выше), то выгода от его внедрения на АЭС становится очевидной.

Таблица 6. Сравнение вариантов переработки твердых радиоактивных отходов АЭС

Виды отходов	Морфологический состав отходов	Методы переработки				
		Сжигание*	Цементирование*	Прессование*	Плазменный*	
1	2	3	4	5	6	
Горючие	Бумага	+	+	+	+	
	Древесина	+	-	-	+	
	Текстиль, ветошь	+	-	-	+	
	Полимеры	до 20%	до 10%	+	+	
	Биологические отходы	+	+	до 5%	+	
Негорючие	Стекло	-	+	-	+	
	Строительный мусор	-	+	до 10%	+	
	Почва и песок	-	-	-	+	
	Радиодетали	-	до 15%	+	+	
	Теплоизоляционные материалы	-	-	-	+	
	Металлы	-	-	+	до 10%	
	Гидроизоляция	-	-	-	+	
	Асфальт	-	-	-	+	
	Смешанные отходы	Смеси горючих и негорючих отходов	-	+	-	+
	Опасные материалы	Резина (шланги, перчатки, шины)	до 10%	-	+	до 10%
Хлорированные полимеры		до 5%	-	+	до 5%	
Ионообменные смолы		-	+	-	до 10%	
Отходы с повышенной влажностью		Растительные материалы	Не все	+	-	+
	Илы, шламы	-	+	-	+	
	Сорбенты для очистки воды	-	+	-	+	
	Ионообменные смолы	-	+	-	до 10%	

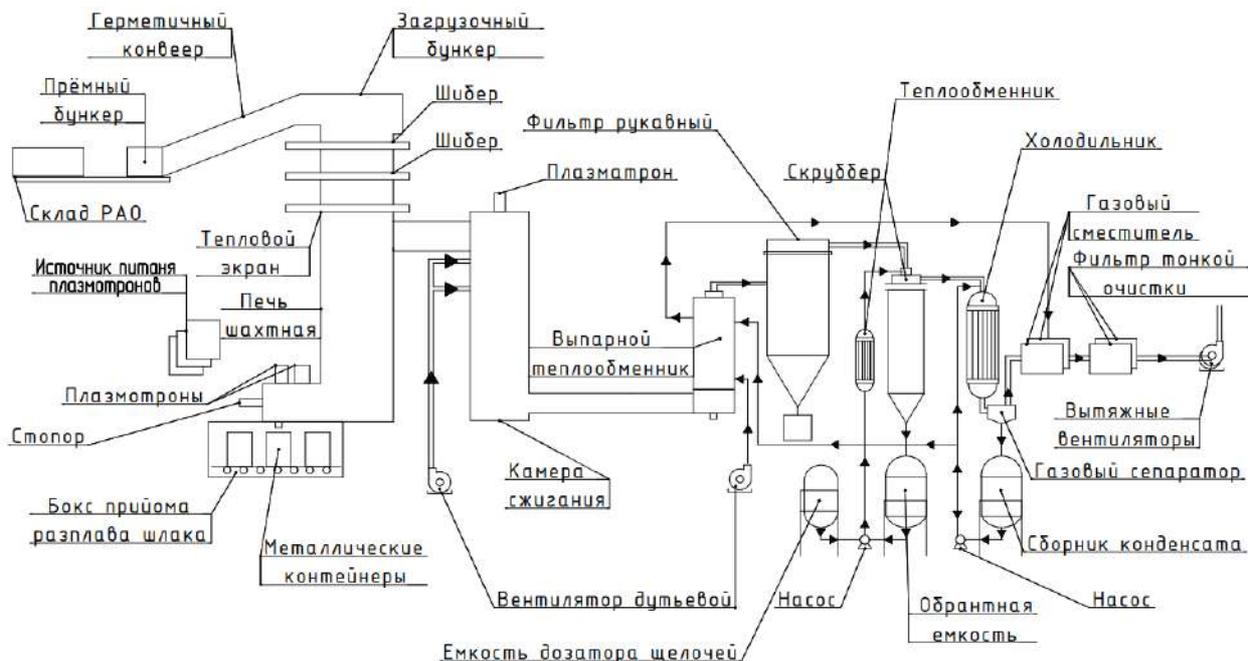


Рисунок 9. Принципиальная схема комплекса плазменной переработки РАО



Рисунок 10. Схема предлагаемого комплекса переработки ТРО РАОС, включающего плазменную переработку

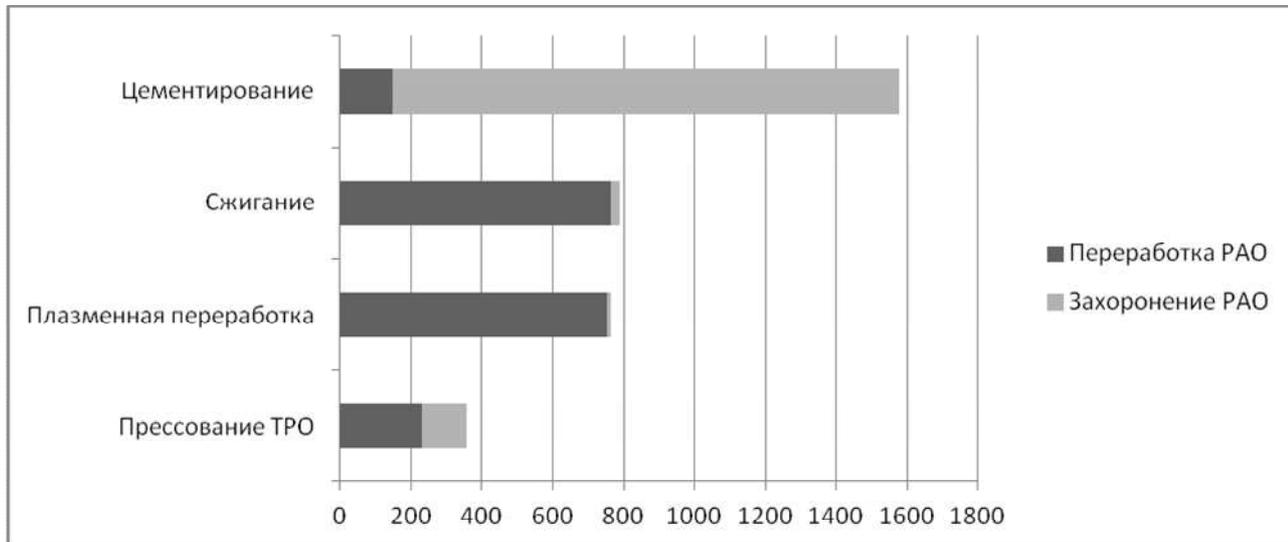


Рисунок 11. Сравнение стоимости переработки и захоронения ТРО, дол/м³

**Выводы**

Ситуация с быстрым ростом объемов накопленных ТРО на АЭС Украины свидетельствует о существовании и острой необходимости решения проблемы обращения с РАО на АЭС.

Для этого на украинских АЭС применяются различные подходы. Так, например, на РАОС в рамках проекта TACIS создается комплекс переработки ТРО, который планируется ввести в эксплуата-

цию в 2018 году. (Аналогичные комплексы планируется создать и на других украинских АЭС). Данный комплекс состоит из семи установок: извлечения, сортировки, прессования, суперпрессования, цементирования, измерения активности РАО. Однако он имеет целый ряд недостатков, которые не дают возможности полностью достичь главной цели переработки - перевод РАО в состояние, пригодное для их захоронения в централизованных хранилищах.

Усовершенствовать вводимый в эксплуатацию

на РАЭС комплекс переработки ТРО предлагается путем включения в его схему комплекса плазменной переработки, который является инновационным подходом в области обращения с РАО, обеспечивающим рост эффективности процессов переработки РАО. Такой модифицированный комплекс позволит сократить объем НАО и САО до 40 раз. Главным преимуществом метода является получение безопасного продукта на выходе (шлаковый компаунд), который сохраняет химическую стойкость и механическую прочность на протяжении

долгого времени, что исключит повторную переработку РАО в будущем.

Суммарные затраты на переработку 1 м<sup>3</sup> ТРО методом плазменной переработки почти такие же, как и при сжигании, и меньше, чем для метода цементирования. Если учесть, что применение КПП ТРО позволяет уменьшить объем отходов для захоронения по сравнению с «традиционными» методами в несколько десятков раз, то выгода от его внедрения на АЭС становится очевидной.

### Список использованной литературы

1. Котенко Є. Україна один на один з проблемою радіоактивних відходів [Електронний ресурс] / Євгеній Котенко // rian.com.ua. – 2017. – Режим доступу к ресурсу: <https://rian.com.ua/analytics/20170630/1025420055.html>.
2. Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП «НАЕК "Енергоатом". Звіт за 2016 рік [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу к ресурсу: [http://www.energoatom.kiev.ua/ua/actvts/nuclear/radioactive\\_waste/46828-nformatcya\\_schodo\\_povodjennya\\_z\\_radoaktivnimi\\_vdhodami\\_pri\\_ekspluatatc\\_aes\\_naek\\_energoatom\\_stanom\\_na\\_/](http://www.energoatom.kiev.ua/ua/actvts/nuclear/radioactive_waste/46828-nformatcya_schodo_povodjennya_z_radoaktivnimi_vdhodami_pri_ekspluatatc_aes_naek_energoatom_stanom_na_/).
3. Комплекс переборки ТРО на ВП РАЕС [Електронний ресурс] // ГП НАЭК «Энергоатом». – 2017. – Режим доступу к ресурсу: [http://www.energoatom.kiev.ua/ru/actvts/nuclear/radioactive\\_waste/53284-kompleks\\_po\\_pererabotke\\_raq\\_rivnenskoyi\\_aes\\_gotov\\_k\\_kompleksnym\\_ispytaniyam/](http://www.energoatom.kiev.ua/ru/actvts/nuclear/radioactive_waste/53284-kompleks_po_pererabotke_raq_rivnenskoyi_aes_gotov_k_kompleksnym_ispytaniyam/).
4. Горбач Ю. На що Рівненська АЕС витратила третину мільярда [Електронний ресурс] / Ю. Горбач // портал «Четверта влада». – 2017. – Режим доступу к ресурсу: <http://4vlada.com/rivne/52245>.
5. Савчин В. В. Плазменные методы в технологии переработки РАО [Електронний ресурс] / В. В. Савчин, А. Л. Моссэ – Режим доступу к ресурсу: <https://waste.ua/cooperation/2008/theses/savchin.html>.
6. Зубкова Е. Экспертное мнение: Как обезопасить отходы АЭС? [Електронний ресурс] / Екатерина Зубкова. – 2015. – Режим доступу к ресурсу: <http://www.energyland.info/interview-show-495>.
7. Костин Д. Г. Комплекс плазменной переработки РАО Нововоронежской АЭС [Електронний ресурс] / Д. Г. Костин // АО «Концерн Росэнергоатом». – 2015. – Режим доступу к ресурсу: <https://www.slideshare.net/energyland/ss-55290751>.
8. Комплекс переработки плазменной печи на Нововоронежской АЭС [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу к ресурсу: <https://www.youtube.com/watch?v=84H1GefbM1c&t=1s>.
9. Харсеев О.А. Монтаж комплекса по переработке отходов на НВАЭС выполнит ОАО «Энергоспецмонтаж» [Електронний ресурс] / Харсеев Олег // [kommersant.ru](http://kommersant.ru). – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.kommersant.ru/doc/2361187>.
10. РАО в Приволжье разложили по схеме [Електронний ресурс] / [А. А. Абрамов, А. Н. Дорофеев, С. А. Дерябин та ін.] // Атомный эксперт. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://atomicexpert.com/page226821.html>.

Получено 28.02.2018

УДК 621.039:614.841.41

С. І. Азаров<sup>1</sup>, О. С. Задунай<sup>3</sup>, В. М. Євланов<sup>3</sup><sup>1</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ;<sup>2</sup>Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку та захисту інформації, м. Київ<sup>3</sup>Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки м. Київ, Україна

## АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОКРОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Проведено прогностичні розрахунки і аналіз радіаційних впливів на компоненти навколишнього середовища у процесі експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива. Показано, що в умовах нормальної експлуатації сховища радіаційні впливи на навколишнє середовище несуттєві. Однак, у випадку виникнення аварій тяжкість екологічних наслідків буде значна для довкілля і необхідно застосовувати превентивні заходи захисту.

**Ключові слова:** СВЯП-1, принципи і критерії безпеки, відпрацьоване ядерне паливо, сховище ядерного палива.

**Вступ.** На території України з метою створення власного ядерно-паливного циклу експлуатації збудовано та функціонує мокре сховище відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1). Причини, що можуть призвести до виникнення аварії на СВЯП-1, можна розділити на зовнішні і внутрішні. До зовнішніх відносяться раптове припинення забезпечення безаварійної та безперебійної роботи СВЯП-1, стихійні лиха, різні прояви тероризму, військові конфлікти. Серед внутрішніх причин особливе значення мають значний фізичний і моральний знос обладнання, порушення технологічної та виробничої дисципліни, недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу, проектно-конструкторські помилки і недоробки та ін.

Для забезпечення безпечного функціонування СВЯП-1, воно повинно відповідати всім сучасним вимогам з безпеки як при нормальних умовах експлуатації, так і при аварійних ситуаціях.

До цих вимог належать:

- забезпечення ядерної безпеки;
- забезпечення радіаційної безпеки (прийнятної потужності дози іонізуючого випромінювання на поверхні басейну витримки (БВ) і біля нього);
- забезпечення теплової безпеки (допустимої температури оболонок тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ) і елементів БВ);
- забезпечення надійності (герметичності БВ і цілісності його вмісту) при статичних і динамічних навантаженнях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Над проблемою дослідження безпеки СВЯП працюють багато вітчизняних і закордонних спеціалістів та науковців. Різні аспекти та окремі підходи до дослідження цієї проблеми висвітлено у чисельних працях [1], але через те, що цей процес є безперервним, постійним і надзвичайно актуальним, дослідження тривають. Необхідно зазначити, що для подібного ядерно-радіаційно-небезпечного об'єкту комплексний аналіз безпеки за допомогою декіль-

кох критеріїв до цього не виконувався.

**Постановка завдання та його вирішення.** Аварії на Чорнобильській АЕС (1986) і на АЕС Fukushima-Daiichi (Японія) [2,3] стали поштовхом для перегляду філософії оцінки безпеки ядерних установок, концентрації зусиль міжнародної спільноти щодо інтенсивного обміну досвідом та сучасними національними досягненнями у галузі безпечного використання ядерної енергії, підготовки низки фундаментальних конвенцій під егідою МАГАТЕ, на яких сьогодні будується міжнародний режим забезпечення ядерної та радіаційної безпеки.

Метою статті є розкриття аспектів, що сприяють обмеженню шкідливого впливу аварійних викидів СВЯП-1 на навколишнє природне середовище та здоров'я людини.

**Цілі і завдання забезпечення екологічної безпеки.** Основною метою забезпечення екологічної безпеки в процесі експлуатації СВЯП-1 є запобігання неконтрольованому розвитку ядерних реакцій і поширенню радіації.

СВЯП-1 є безпечним, якщо радіаційний вплив від нього на персонал, населення і навколишнє середовище:

- не перевищує встановлених меж при нормальній експлуатації і при проектних аваріях;
- обмежується прийнятними значеннями при важких (запроектних) аваріях.

Екологічна безпека СВЯП-1 повинна забезпечуватись на всіх етапах його життєвого циклу від проектування до зняття з експлуатації. При проектуванні закладаються основи екологічної безпечної експлуатації СВЯП-1. Для цього в проекті в повному обсязі враховуються основні принципи екологічної безпеки, а також використовуються системи безпеки і такі проектні рішення, при яких установка має властивості само захищеності, зумовлені фізичними і технічними характеристиками обладнання і систем СВЯП-1.

Відповідно до принципу глибокоешелонованого захисту, для запобігання або обмеження несприятливих наслідків збоїв і відмов технічних засобів і помилок персоналу передбачається кілька послідовних рівнів захисту СВЯП-1.

Найважливішою вимогою принципу глибокоешелонованого захисту є організація ряду фізичних бар'єрів, які повинні запобігати поширенню продуктів поділу в навколишнє середовище при їх потенційно можливому витокі з паливної композиції.

У СВЯП-1 наявна така система послідовних бар'єрів безпеки, що забезпечує надійне утримання радіоактивних речовин в заданих об'ємах або межах споруд [4]:

- паливна матриця;
- оболонки ТВЕЛів;
- кордони першого контуру теплоносія (корпус реактора, трубопроводи та обладнання систем першого контуру);
- герметичне огороження локалізуючих систем безпеки (наприклад, захисна оболонка).

Кожен фізичний бар'єр проектується і виготовляється з урахуванням спеціальних норм і правил для забезпечення його підвищеної надійності. При аналізі безпеки необхідно переконатися в ефекти-

вності цих бар'єрів як в умовах нормальної експлуатації, так і в аварійних ситуаціях. Так, для забезпечення цілісності ТВЕЛу як бар'єру безпеки необхідна підтримка заданого температурного режиму його роботи, а також обмеження механічного та корозійного впливу на оболонку. Для цього встановлюють проектні межі на запас до кризи теплообміну, температуру палива, внутрішній тиск газу під оболонкою, напругу і деформацію оболонки, накопичену втомну циклічну пошкоджуваність.

В процесі експлуатації бар'єри безпеки повинні перебувати в працездатному стані, що забезпечується підтримкою параметрів СВЯП-1 в заданих проектних межах, а також контролем цілісності та ефективності бар'єрів безпеки. Крім встановлення фізичних бар'єрів безпеки передбачаються технічні та адміністративні заходи зі збереження працездатності цих бар'єрів.

Також, незважаючи на всі вжиті заходи щодо запобігання аваріям, плануються заходи щодо захисту населення і навколишнього середовища в разі руйнування захисних бар'єрів.

На рисунку 1 схематично зображені основні критерії забезпечення безпеки в процесі експлуатації СВЯП-1.



Рисунок 1. Основні критерії забезпечення безпеки в процесі експлуатації СВЯП-1

Для забезпечення безпеки СВЯП-1 необхідно:

1. Обґрунтувати поточний рівень безпеки сховища ВЯП (в період до його консервації і закриття) і визначити необхідність втручання для забезпечення радіаційної безпеки працівників (персоналу) і населення.

2. Провести за необхідності всі практично здійсненні заходи з метою підвищення безпеки, спря-

мовані на реалізацію наступних принципів:

– не перевищення допустимих меж індивідуальних доз опромінення працівників (персоналу) і населення (принцип нормування);

– підтримання на можливо низькому рівні з урахуванням економічних і соціальних факторів індивідуальних доз опромінення і числа опромінюваних осіб з населення (принцип оптимізації);

– зменшення шкідливого впливу в результаті зниження доз повинно бути достатнім для обґрунтування збитків і витрат, в тому числі соціальних витрат, пов'язаних з таким втручанням.

3. Обґрунтувати довготривалу безпеку СВЯП і визначити необхідність втручання для забезпечення радіаційного захисту населення.

4. Прийняти, за необхідності, всі практично здійсненні заходи щодо забезпечення довгострокової безпеки сховища ВЯП.

**Об'єкти досліджень.** Об'єктом досліджень є радіаційні впливи на довкілля при експлуатації СВЯП-1 на території чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) у випадках виникнення аварійних ситуацій в процесі експлуатації. На етапі експлуатації СВЯП-1 екологічна безпека на території ЧЗВ - радіоактивно забруднена територія, де заборонено постійне проживання цивільного населення, забезпечується веденням технологічних режимів відповідно до технологічного регламенту, інструкцій з експлуатації та інших регламентуючих документів. Важливою умовою безпеки експлуатації є також наявність необхідного рівня підготовки персоналу і організації робіт. Етап експлуатації є найтривалішим в життєвому циклі СВЯП-1.

Під час розгляду питання екологічної безпеки в процесі експлуатації СВЯП-1 враховувалось наступне [5]:

– нормальна експлуатація - зведення до мінімуму радіоактивних викидів, притаманних цьому режиму, за допомогою забезпечення правильного функціонування систем та обладнання, попередження відмов і аварій;

– порушення нормальної експлуатації внаслідок виникнення відмов та інцидентів - запобігання їх переростання в проектні аварії, для чого необхідно слідувати відповідним інструкціям, контролювати важливі для безпеки параметри;

– виникнення проектних аварій - запобігання їх переростання в запроектні, що забезпечується виконанням інструкцій і процедур з управління і ліквідації аварій, контролем правильності функціонування системи безпеки;

– виникнення запроектних аварій - зведення до мінімуму впливу радіації на персонал, населення і навколишнє середовище за допомогою введення в дію планів заходів щодо захисту персоналу та населення, дотримання інструкцій і інструкцій з управління запроектними аваріями.

В ході аналізу безпеки СВЯП-1 розглядається достатність закладених в проекті заходів щодо попередження порушень режимів нормальної експлуатації, а також досліджуються потенційно можливі аварійні ситуації при різних початкових подіях.

**Радіаційні впливи на довкілля в умовах нормальної експлуатації.** Аналіз світового досвіду

мокрого зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) показує, що в безаварійних умовах зберігання ВЯП в контейнерах або модулях, при регулярному контролі їх герметичності і змін в ТВЕЛах, є практично безпечною технологією [6]. Під час нормальної експлуатації СВЯП-1 можливий вихід ізотопів цезію за рахунок дефектів в оболонках ТВЕЛів. При цьому викид буде представлений в основному ізотопом  $^{137}\text{Cs}$  (> 94%) і складе  $8,2 \cdot 10^{+8}$  Бк/рік.

**Радіаційні впливи на довкілля в умовах проектної максимальної аварії.** Під час моделювання максимальної проектної аварії (МПА) було розглянуто падіння (в момент перевантаження) однієї відпрацьованої тепловиділяючої збірки (ВТВЗ) з розгерметизацією всіх ТВЕЛів при одночасній відмові системи спецвентиляції.

Розрахункова висота викиду радіонуклідів складала 40 м. Вихід активності при аваріях з однієї ВТВЗ (паливо РВПК-1000,) був прийнятий наступний, Ки:  $^{103}\text{Ru}$  - 23,3,  $^{106}\text{Ru}$  - 3,6,  $^{134}\text{Cs}$  - 129,0,  $^{144}\text{Ce}$  - 50,3,  $^{140}\text{La}$  - 43,6,  $^{90}\text{Sr}$  - 2,0,  $^{137}\text{Cs}$  - 98,2,  $^{85}\text{Kr}$  - 51,1. При консервативному підході (постійний напрямок вітру, природний розпад і міграція радіонуклідів не враховуються) максимальне додаткове радіоактивне забруднення прилеглих територій ізотопами цезію за 30-річний період експлуатації СВЯП-1 не перевищить  $12 \text{ Бк/м}^2$  [7], що є нехтовно малою величиною. Необхідно враховувати те, що підвищення концентрації радіонуклідів в повітрі буде короткочасним і не призведе до небезпечних впливів на навколишнє середовище. На найближчому кордоні ЧЗВ (12 км в південно-західному напрямку) в залежності від метеорологічних умов поверхневе забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  складе від 10 до  $90 \text{ Бк/м}^2$ , що відповідає 30 - 50% від сучасного фоновому рівня забруднення ґрунтового покриву і не призведе до зміни статусу цих територій.

Таким чином, головним критерієм екологічного обґрунтування безпеки в процесі експлуатації СВЯП-1 є можливість забезпечення мінімального збитку в разі виникнення радіаційних аварій. Розрахунок радіаційних впливів на повітряне середовище при МПА показує, що об'ємна активність ізотопів цезію на найближчому кордоні ЧЗВ досягне величини (10-50)  $\text{Бк/м}^3$ .

**Радіаційні впливи на довкілля під час запроектної аварії.** Під час моделювання запроектної аварії (ЗПА) був прийнятий сценарій падіння літака (заправка паливом 50%) безпосередньо на залізобетонні модулі, повністю заповнені ВТВЗ, з подальшим горінням авіаційного палива [8-10].

Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ [11], для моделювання та розрахунків розсіювання радіонуклідів в атмосфері застосовувалася модель дифузії Пасквілла, заснована на статистичному (гауссово-

му) розподілі домішок. Нижче наведено опис вихідних умов для моделювання та оцінки радіаційних впливів СВЯП на навколишнє середовище (консервативний підхід). Викид у повітря радіонуклідів під час запроектованої аварії наведено у табл. 1 із зазначенням нуклідного складу.

Блок-схема організації розрахунків характеристик забруднення довкілля при аварійному викиді радіонуклідів наведена на рисунку 2.

Об'ємна активність радіонуклідів у повітрі для миттєвого викиду є функція часу:

$$C(t) = Q_0 \cdot G_0(t), \quad (1)$$

де  $Q_0$  – інтегральна величина миттєвого викиду, Бк;

$G_0(t)$  – фактор, що залежить від часу, метеорологічного розбавлення для миттєвого викинутого об'єму домішки,  $m^{-3}$ .

Фактор розбавлення  $G_0[m^{-3}]$  хмари викиду задається формулою:

$$G_0(x, y, z, t) = \frac{F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(x-V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} \right) \right] \times \left\{ \exp \left( -\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right) + \exp \left( -\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right) \right\}, \quad (2)$$

Де  $x, y, z$  – координати точки у просторі;

$V$  – швидкість вітру, м/с;

$t$  – час, який минув після викиду, с;

$H$  – висота хмари викиду над землею на відстані  $x$ , м;

$F(x)$  – функція виснаження хмари;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – стандартні відхилення розподілу домішки в хмарі димового викиду у напрямку відповідних координатних осей, м. Ці коефіцієнти характеризуються монотонно зростаючими функціями часу, їхній вид і розмір залежать від погодних умов і визначаються за наступними формулами:

$$\sigma_i^2 = S^2 + 0,02(1 + 0,03k_f)HVt + ss_i^2(Vt)^2, \quad (3)$$

$$G_0(x, y, t) = \frac{2F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(x-V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} + \frac{H^2}{\sigma_z^2(t)} \right) \right]. \quad (4)$$

Для концентрації радіоактивного забруднення приповерхневого шару повітря навколо об'ємного джерела викиду (Бк/м<sup>3</sup>) маємо:

$$Cv(x, y, t) = \frac{Mat \left( t - T_0 - \frac{x - At}{V} \right)}{\pi \cdot sy(x + x_0) \cdot sz(x + x_0) \cdot V} \cdot \exp \left[ \frac{-y^2}{2 \cdot sy(x + x_0)^2} \right]. \quad (5)$$

Для оцінки густини поверхневого забруднення ґрунту внаслідок сухого осадження до моменту  $T$  на-

Таблиця 1. Нуклідний склад і активність окремих нуклідів

Радіонуклід	Активність, Бк
Sr-90	$9,8 \cdot 10^{13}$
Y-90	$9,8 \cdot 10^{13}$
Ru-106	$2,1 \cdot 10^{12}$
Rh-106	$2,1 \cdot 10^{12}$
Cs-134	$5,0 \cdot 10^{12}$
Cs-137	$1,2 \cdot 10^{14}$
Ce-144	$1,3 \cdot 10^{12}$
Pr-144	$1,3 \cdot 10^{12}$
Pm-147	$3,0 \cdot 10^{13}$
Pu-238	$5,4 \cdot 10^{12}$
Pu-239	$4,5 \cdot 10^{11}$
Pu-240	$6,2 \cdot 10^{11}$
Am-241	$8,5 \cdot 10^{11}$

Де  $k_f$  – коефіцієнт фонової турбулентності;

$ss_i$  – кутові дисперсії напрямку вітру, що залежать від стану стійкості атмосфери;

$H$  – висота центру хмари;

$V$  – розрахункова швидкість вітру.

Варто підкреслити, що у зазначених формулах для дисперсії перша складова  $S^2$  характеризує дисперсію домішки в початковий момент часу, друга – відповідає за механізм розсіювання домішки дрібномасштабною турбулентністю, а третя – враховує внесок великомасштабних вихорів.

Для чинника розведення  $G_0 [m^{-3}]$  хмари викиду на рівні землі, вважаючи  $z=0$ , отримаємо формулу:

ми отримана така формула:

$$E(x, y) = \frac{1}{\pi \cdot sy(x) \cdot sz(x) \cdot V} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot sy(x)^2}\right), \quad (6)$$

$$FT(T) = \int_0^T F(t) dt, \quad (7)$$

$$Slv(x, y, T) = Vg \cdot lat \cdot Qat \cdot E(x + x_0, y) \cdot FT\left(T - T_0 - \frac{x - At}{V}\right). \quad (8)$$

Вважаючи  $z=H$ , отримаємо:

$$G_0(x, y, t) = \frac{F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left( \frac{(x - V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} \right)\right] \times \left( 1 + \exp\left(-\frac{2H^2}{\sigma_z^2(t)}\right) \right). \quad (9)$$



Рисунок 2. Блок-схема організації розрахунків характеристик забруднення повітря і ґрунту при аварійному викиді.

Параметр стійкості атмосфери  $s$  [с<sup>-2</sup>], для різних категорій можна прийняти:  $s=8,7 \cdot 10^{-4}$  – для категорії Д;  $s=1,75 \cdot 10^{-3}$  – для категорії Ф.

Інтенсивність осідання домішки на поверхню  $C'_s$  [Бк/с · м<sup>2</sup>] внаслідок сухого осідання дорівнює:

$$C'_s(x, y, t) = V_g \cdot C(x, y, t), \quad (10)$$

де  $C$  – приземна об'ємна активність в точці  $x, y$ , Бк/м<sup>3</sup>;

$V_g$  – швидкість сухого осідання, м/с.

При практичних розрахунках розсіювання викидів можна приймати  $V_g=2$  см/с для газоподібного йоду і 0,8 см/с для інших нуклідів. Для інертних радіоактивних газів  $V_g=0$ .

Густину поверхневого забруднення одержимо інтегруванням за часом загальної інтенсивності осідання домішки на поверхню землі:

$$S(x, y) = \int_0^{\infty} C'_s(x, y, t) dt. \quad (11)$$

Обчислення  $S(x,y)$  можна організувати більш раціонально, якщо визначити верхню і нижню межі інтегрування по  $t$ , враховуючи, що хмара впливає на точку  $(x, y)$  тільки у період, коли вона проходить поблизу від цієї точки (рисунок 3):

$$S(x,y) = \int_{g^l(x)}^{g^2(x)} C_s'(x,y,t) dt, \quad (12)$$

$$g^1(x) = \frac{1}{V} \cdot (x - 3\sigma_x(x)), \quad (13)$$

$$g^2(x) = \frac{1}{V} \cdot (x + 3\sigma_x(x + 3\sigma_x(x))). \quad (14)$$

Аналіз радіаційного впливу при ЗПА показав (рисунок 3), що максимальне додаткове поверхневе забруднення ґрунтового покриву Cs-137 досягне величини  $500 \text{ кБк/м}^2$  і буде спостерігатися вже на відстані  $\sim 3000 \text{ м}$  від об'єкта; тобто в разі розміщення СВЯП-1 не на території ЧЗВ, а в іншому районі України, такий розвиток подій призвів би до радіоактивного забруднення призначених для забудови територій і значного матеріального і морального збитку.

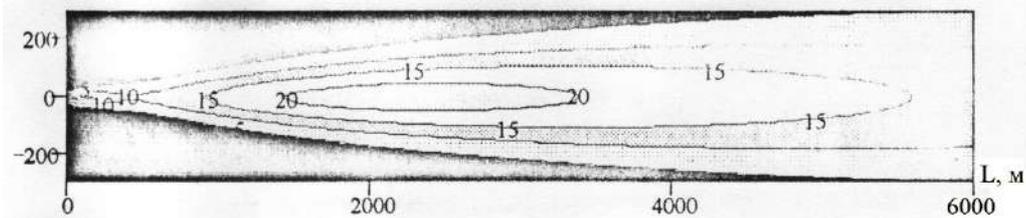


Рисунок 3. Лінії рівнів щільності поверхневого забруднення ( $\text{Бк/км}^2$ )

Таблиця 2. Додаткові дозові навантаження на персонал сусідніх об'єктів при нормальній експлуатації і можливих аваріях в СВЯП-1

Об'єкт	Контрольні рівні на підприємствах ЧЗВ [12], мЗв/рік	Існуючі дозові навантаження [13], мЗв/рік	Додаткові дозові навантаження в нормальних умовах, мЗв/рік	МПА, мЗв/рік	ЗПА, мЗв/рік
СВЯП-1	17	3,01	$7 \cdot 10^{-5}$	4,7	98,4
Головні корпуси ЧАЕС	17	3,01	$7 \cdot 10^{-5}$	2,9	34,8
Комплекс «Вектор»	18	0,14	$5 \cdot 10^{-3}$	1,3	12,3
ПЗРВ «Буряківка»	18	1,64	$2 \cdot 10^{-3}$	0,8	7,5
ЗПРРВ, ПКОТРВ	17	3,01	$7 \cdot 10^{-5}$	0,3	4,3
Підприємства в м. Чорнобиль	2,3-15	0,1-3,9	$3 \cdot 10^{-5}$	0,02	1,2

Таблиця 3. Додаткові дозові навантаження на населення в разі можливої аварії з максимальними наслідками

Відстань від СВЯП-1, км	Межа дози опромінення населення [13], мЗв/рік	Додаткові дозові навантаження на населення при нормальній експлуатації, мЗв/рік	МПА, мЗв/рік	ЗПА, мЗв/рік
30	1,0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	1,6
40	1,0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,9
70	1,0	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,07

Аналіз радіаційного впливу на поверхневі води показав, що при такому розвитку подій, на території затоплюваної заплави р. Прип'ять осяде близько  $7,5 \cdot 10^{+9}$  Бк ізотопів цезію, що значно менше величини сумарного виносу з річним стоком -  $10^{+13}$  Бк.

Специфіка виробничих умов на підприємствах, розташованих на території ЧЗВ, сприяє формальному «пом'якшенню» радіаційних впливів на їх персонал у разі виникнення МПА і ЗПА (таблиця 2).

Величина індивідуальної ефективної еквівалентної дози внаслідок МПА на кордоні 10-кілометрової зони ЧАЕС (на відстані 2 км від СВЯП-1) в залежності від метеорологічних умов складе від 1,3 до 4,7 мЗв., а для ЗПА від 12,3 до 98,4 мЗв.

При цьому на найближчому кордоні ЧЗВ (на відстані 12 км від СВЯП-1) індивідуальні ефективні еквівалентні дози для МПА будуть варіювати в інтервалі від 0,02 до 0,8 мЗв., а для ЗПА від 1,2 до 7,5 мЗв [14].

Дані про ймовірність перевищення річного ліміту дози внаслідок МПА і ЗПА для населення наведено в таблиці 3.

## Висновки

Отже, з наведених в таблицях 2 і 3 даних видно, що тривала безаварійна нормальна експлуатація СВЯП-1, практично не чинила радіаційних впливів на навколишнє середовище. Однак, у випадку можливої запроектованої радіаційної аварії тяжкість

екологічних наслідків буде значна для довкілля і необхідно застосовувати превентивні заходи захисту. Також необхідно здійснювати регулярне вдосконалення системи попередження надзвичайних ситуацій на СВЯП-1 і системи реагування на радіаційні аварії.

## Список використаної літератури

1. Катастрофа на АЕС «Фукусіма» [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/fukushima/index.html>.
2. О.Л. Коцуба Аналіз важких аварій в басейні витримки відпрацьованого ядерного палива АЕС «Фукусіма-Даїчі» / О.Л. Коцуба, Ю.Ю. Воробйов, О.І. Жабін, Д.В. Гуменок // Ядерна та радіаційна безпека 4(72).2016 с.13 -20.
3. Азаров С.І. Порівняльний аналіз радіоекологічних наслідків аварій на ЧАЕС та «Фукусіма-1» / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серета Ю.П. // "Радіоекологія-2017". Збірник статей Науково-практичної конференції із міжнародною участю, м. Київ, 24-26 квітня 2017 року. – Житомир: Вид-во ЕЦ «Укрекобіокон», 2017.- с.29-33
4. 50-SG-D10 «Системы обращения с топливом и хранения его на атомных электростанциях», МАГАТЭ.
5. Эксплуатация установок хранения отработанного топлива. Серия изданий МАГАТЭ по безопасности. № 117, МАГАТЭ, Вена, 1994.
6. Оценка безопасности установок хранения отработанного топлива. Серия изданий МАГАТЭ по безопасности. № 118 МАГАТЭ, Вена 1994.
7. Халатов С. Промежуточное хранение облученных топливных элементов // Атомная техника за рубежом. - 2004. - № 2. - С.17 - 21.
8. Азаров С.І. Сучасні підходи до оцінювання ризику ураження АЕС повітряним терактом / Азаров С.І., Евланов В.М. // Моделювання та інформаційні технології. - 2016. - Вип. 76. - С. 3-9.
9. Сорокин Г.А., Азаров С.И. Анализ уязвимости инфраструктуры ЧАЭС к воздушным терактам // Тези доп. VI конф. Міжнародного Чорнобильського центру, Славутич, 2003. – С. 286 - 287.
10. Азаров С.І. Вразливість АЕС по відношенню до повітряних терактів / С.І. Азаров, Г.А. Сорокін // Проблеми безпеки атомних електростанцій і чорнобиля.- 2009.- ВИП. 12.-с. 15-23
11. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. Safety series No. 50-SG-S3. - Vienna: IAEA,1980. – 94 p
12. Нормы радиационной безопасности Украины. Государственные гигиенические нормативы. ГН 6.6.1.-6.5.001-98. НРБУ–97. - Киев, 1998. - 135 с.
13. Основні контрольні рівні, рівні звільнення та рівні дії щодо радіоактивного забруднення об'єктів зони відчуження. ГН 6.6.1. 076-01. - Київ, 2001.
14. Справка о состоянии радиационной безопасности в ЗОиЗБ(О)В в 2002 г. - Чернобыль: ГД АЗО, 2003. - 50 с.

*Отримано 10.05.2018*

УДК : 539.4

Т. В. Пирогов<sup>1</sup>, А. С. Колядюк<sup>1</sup>, В. В. Шелофаст<sup>2</sup><sup>1</sup>Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования, г. Киев  
<sup>2</sup>ООО «Научно-технический центр «АППМ», г. Королев (Московская область, РФ)МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ ДВУХУЗЛОВЫМИ  
ГНУТЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ТИПА «PIPE»

Рассматривается криволинейный двухузловой трубопроводный пространственный элемент. Элемент имеет по шесть степеней свободы в каждом узле и обеспечивает приложение к нему различных нагрузок, таких как, собственный вес, внешнее и внутреннее давление, равномерные распределенные по длине силы, термические нагрузки. Рассмотрены вопросы вывода матрицы жесткости элемента, получения эквивалентных узловых усилий от распределенных внешних усилий.

**Ключевые слова:** Трубопроводный конечный элемент, гиб, матрица жесткости, матрица податливости, матрица масс, вектор узловых нагрузок, функции формы, реакции, перемещения, напряжения, собственные частоты.

**Введение.** Конечный элемент (далее – КЭ) прямолинейного участка трубы не представляет больших трудностей при выводе матриц жесткости и вектора эквивалентных узловых усилий. Элемент работает на растяжение-сжатие, изгиб и кручение и поэтому для него можно использовать давно разработанные модели балочных элементов. Основное внимание в данной статье уделено получению основных соотношений для гнутых трубопроводных элементов.

**Получение матрицы жесткости изогнутого участка трубы с постоянным радиусом.** Схема элемента представлена на рисунке 1.

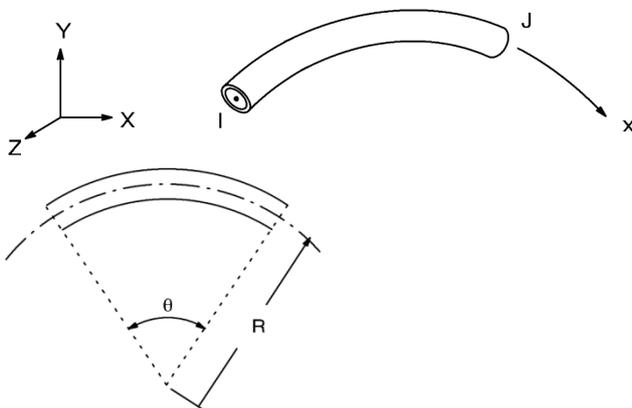


Рисунок 1. Криволинейный участок трубы

Вывод матрицы жесткости гнутого элемента основан на применении теоремы Кастелиано, связывающей приложенные силы и вызываемые ими перемещения. Для получения полной матрицы применяется принцип суперпозиции обобщенных сил.

Теорему Кастелиано запишем как

$$u_i = \partial U / \partial F_i,$$

где  $U$  – энергия деформации,  $F_i$  – сила в направлении  $i$ -той степени свободы элемента,  $u_i$  – перемещение в направлении  $i$ -той степени свободы от

обобщенной силы  $F_i$ .

Рассмотрим часть полной матрицы, отвечающей за изгиб в плоскости элемента. Вклад от действия изгибающего момента с плоскости элемента, согласно [1]:

$$U = \int_0^l \frac{M^2}{2EJ_z} dx = \int_0^\varphi \frac{M(\theta)^2}{2EJ_z} R d\theta; \quad (1)$$

$M(\theta)$  – момент, возникающий в сечении  $x$  от силовых факторов в узле;

Применяя теорему Кастелиано, получим выражения узловых перемещений:

$$u_1 = \partial U / \partial F_{x1} = \int_0^\varphi \frac{M_1(\theta)}{EJ_z} \frac{\partial M_1(\theta)}{\partial F_{x1}} R d\theta; \quad (2)$$

$$v_1 = \partial U / \partial F_{y1} = \int_0^\varphi \frac{M_1(\theta)}{EJ_z} \frac{\partial M_1(\theta)}{\partial F_{y1}} R d\theta; \quad (3)$$

$$\theta_{z1} = \partial U / \partial M_{z1} = \int_0^\varphi \frac{M_1(\theta)}{EJ_z} \frac{\partial M_1(\theta)}{\partial M_{z1}} R d\theta; \quad (4)$$

Где  $u_1, v_1, \theta_{z1}$  – перемещения и угол поворота узла 1 в локальной системе координат в плоскости элемента.

**Учет осевых (касательных) сил.** Вклад в общую энергию от касательных сил из выражения (1)

$$U = \int_0^l \frac{N^2}{2EF} dx; \quad (5)$$

$N_1(\theta) = F_{x1} \cos(\theta) + F_{y1} \sin(\theta)$  – касательная сила, возникающая в сечении  $x$  от силовых факторов в узле 1,

$N_2(\theta) = F_{x2} \cos(\theta) + F_{y2} \sin(\theta)$  – касательная сила, возникающая в сечении  $x$  от силовых факторов в узле 2.

$$u_1 = \frac{\partial U}{\partial F_{x1}} = \int_0^\varphi \frac{N_1(\theta)}{EF} \frac{\partial N_1(\theta)}{\partial F_{x1}} R d\theta = \frac{R(F_{x1}\varphi + F_{x1}\cos[\varphi]\sin[\varphi] + F_{y1}\sin[\varphi]^2)}{2EF}; \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{\partial U}{\partial F_{x2}} = \int_0^\varphi \frac{N_1(\theta)}{EF} \frac{\partial N_1(\theta)}{\partial F_{x2}} R d\theta; \quad (7)$$

**Расчет коэффициентов матрицы жесткости гнутого элемента трубы для степеней свободы из плоскостигиба.** Общий подход к нахождению соответствующих подматриц жесткости остается таким же, как и описанный выше для жесткости в плоскостигиба.

Схема нагружениягиба из его плоскости представлена ниже на рисунке 2.

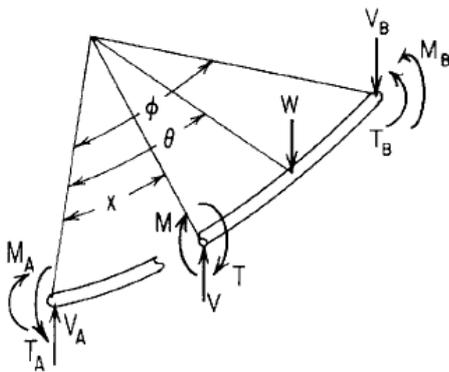


Рисунок 2 – Гнутый участок нагруженный из плоскостигиба

$$w_1 = \frac{\partial U}{\partial F_{z1}} = \frac{\partial U}{\partial V_a} = \int_0^\varphi \frac{M(\theta)}{EJ} \frac{\partial M(\theta)}{\partial V_a} R d\theta + \int_0^\varphi \frac{M_{tor}(\theta)}{GJ_{tor}} \frac{\partial M_{tor}(\theta)}{\partial V_a} R d\theta; \quad (9)$$

Угол изгиба

$$\theta_2 = \frac{\partial U}{\partial M_{z1}} = \frac{\partial U}{\partial M_a} = \int_0^\varphi \frac{M(\theta)}{EJ} \frac{\partial M(\theta)}{\partial M_a} R d\theta + \int_0^\varphi \frac{M_{tor}(\theta)}{GJ_{tor}} \frac{\partial M_{tor}(\theta)}{\partial M_a} R d\theta; \quad (10)$$

Для угла закручивания

$$\theta_1 = \frac{\partial U}{\partial M_{x1}} = \frac{\partial U}{\partial T_a} = \int_0^\varphi \frac{M(\theta)}{EJ} \frac{\partial M(\theta)}{\partial T_a} R d\theta + \int_0^\varphi \frac{M_{tor}(\theta)}{GJ_{tor}} \frac{\partial M_{tor}(\theta)}{\partial T_a} R d\theta; \quad (11)$$

**Вектор узловых нагрузок.** Получение эквивалентного вектора узловых нагрузок от температурного воздействия, внешнего и внутреннего давления представляет определенные сложности, поскольку у элемента отсутствуют функции формы и стандартный подход метода конечных элементов (МКЭ) в данном случае неприменим. Вектор сил от различных силовых факторов можно получить, используя уравнения равновесия и метод сил, согласно [3]. Однако, существуют определенные трудности в применимости полученных результатов, а именно, наличие эмпирических коэффициентов, размытость границы в результатах между тонкими и толстыми трубами, большая

$M(x) = V_a \sin(x) * R + M_a \cos(x) - T_a \sin(x)$   
– изгибающий момент, в сечении x от силовых факторов в узле 1.

$$M_{tor}(x) = V_a(1 - \cos(x)) * R + M_a \sin(x) + T_a \cos(x)$$

– крутящий момент, возникающий в сечении x от силовых факторов в узле 1.

Энергии деформации

$$U = \int_0^l \frac{M^2}{2EJ} dx + \int_0^l \frac{M_{tor}^2}{2GJ_{tor}} dx; \quad (8)$$

Применяя теорему Кастелиано [4], [5], получим выражения узловых перемещений (9-11).

Как уже было сказано выше, применяя принцип суперпозиции обобщенных сил, полная матрица жесткости получается суммированием подматриц от полученных от учета различных силовых факторов в выражении энергии.

чувствительность коэффициентов матрицы системы уравнений метода сил при малых углахгиба, общая громоздкость финальных выражений. Поэтому для нагрузок, приводящих к осевым деформациямгиба, таких как внешнее/внутреннее давление, температурное воздействие, предварительное натяжение предлагается использовать вычисление реакций в узлах непосредственно через матрицу жесткости элемента. Для этого вычисляется удлинениегиба от действия нагрузки, строится локальный вектор перемещений в касательных направлениях элемента с компонентами полученных удлинений (см. рисунок ниже) и далее вычисляется вектор узловых реакций, где [K] – матрица

жесткости элемента,  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений, составленный в соответствии с представленной ниже схемой (см. рисунок 3).

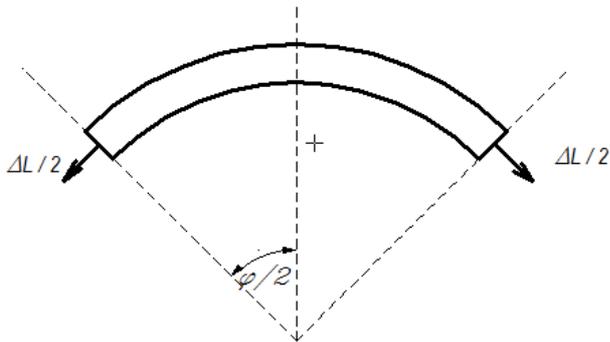


Рисунок 3. К вычислению вектора узловых усилий

Такой подход к вычислению усилий является простым и эффективным, кроме того реакции получаются согласованными по матрице жесткости.

**Тестовая задача 1. Гнутый участок трубопровода под действием сосредоточенной силы в плоскостигиба.** Для проверки полученной матрицы жесткости элемента произведем расчет гнутого участка трубопровода, представленного на рисунке 4.

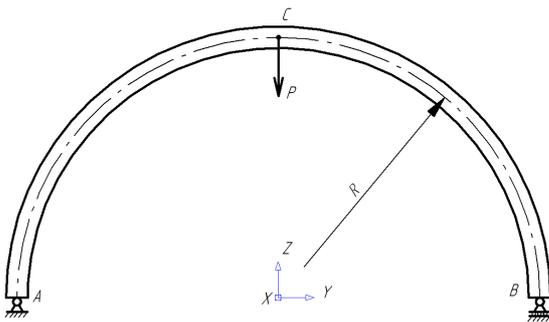


Рисунок 4. Арочный участок трубы, нагруженный сосредоточенной силой

**Постановка задачи.** Изогнутый в виде арки участок трубы, имеющий внешний диаметр  $D_0$  и толщину стенки  $t$ , изогнутый с радиусом изгиба  $R$ , шарнирно опертый с обоих концов, нагружается сосредоточенной вертикальной силой в плоскости арки, в ее верхней точке (точка  $C$ ) величиной  $P$ . В одной из опор (точка  $B$ ) разрешается горизонтальное перемещение. Определить угол поворота трубопровода в точках опоры, прогиб в среднем сечении и горизонтальное смещение опоры  $B$ , а также возникающие при этом нормальные напряжения в сечении трубопровода.

**Исходные данные.**  $E = 2,0 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости,  $\mu = 0,3$  – коэффициент Пуассона,  $R = 1000$  мм – радиус изгиба арки трубопровода,  $D_0 = 20$  мм – внешний диаметр трубы,  $t = 2$  мм – толщина стенки трубы,  $P = 100$  Н – сосредоточен-

ная сила в плоскостигиба.

**Аналитическое решение.** Максимальные перемещения возникают на перемещающемся конце арки и определяется по формулам из [2].

Величина нормальных напряжений в зависимости от изгибающего момента вычисляется по формулам [6].

$$\sigma_{max} = M_{изг} / W_{изг} = 5 \cdot 10^4 / 463,699 = 107,83 \text{ МПа} \quad (12)$$

$$\text{Где: } M_{изг} = P \cdot \frac{R}{2} = 5 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{мм} \text{ – величина}$$

изгибающего момента в среднем сечении арки;  $W_{изг} = \pi(D_0^4 - D_i^4) / (32 \cdot D_0) = 463,699$  мм – момент сопротивления сечения;  $D_0 = 20$  мм и  $D_i = 16$  мм – соответственно внешний и внутренний диаметры трубы.

Результаты расчетов конечно-элементной модели с помощью двухузлового пространственного элемента «pipe», конечного элемента «пластина» в программном коде АРМ «Structure 3D», двухузлового пространственного элемента «pipe» в программном коде «ANSYS» представлены ниже.

Сравнение численных результатов расчета конечно-элементных моделей с теоретическими представлено в таблице 1.

Обращает внимание то, что точность результатов не отличается сколько-нибудь заметно для различного количества конечных элементов, используемых при моделировании.

**Тестовая задача 2. Расчет на собственные частоты гнутого участка трубопровода в плоскостигиба.** Из-за отсутствия функций форм, в динамических расчетах для гнутого трубопроводного элемента предлагается использовать матрицу масс в виде диагональной матрицы сосредоточенных масс. В задаче сравниваются собственные частоты колебаний гнутого участка трубопровода из предыдущей задачи, полученные на расчетной модели с разным количеством конечных элементов. Для сравнения результатов кроме криволинейных элементов при моделировании используются также прямолинейные балочные КЭ с распределенной матрицей масс. Все исходные данные соответствуют Тестовой задаче 1, плотность материала была задана  $7800 \text{ кг/м}^3$ . Для рассмотрения колебаний только в плоскостигиба накладывались дополнительные ограничения на соответствующие степени свободы.

Полученный спектр частот при моделировании 16 криволинейными и 16 прямолинейными элементами представлен в таблицах 2 и 3.

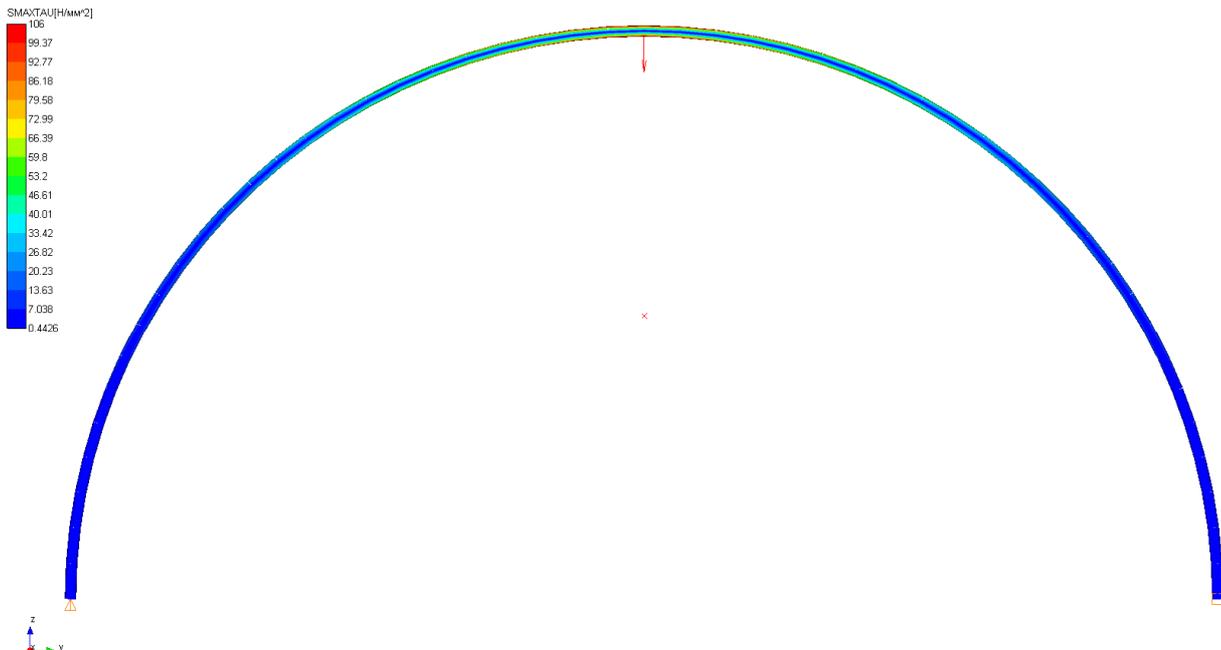


Рисунок 5. Нормальные напряжения по длине трубопровода построенного с помощью двух-узлового пространственного элемента «pipe» в программном коде APM «Structure 3D»

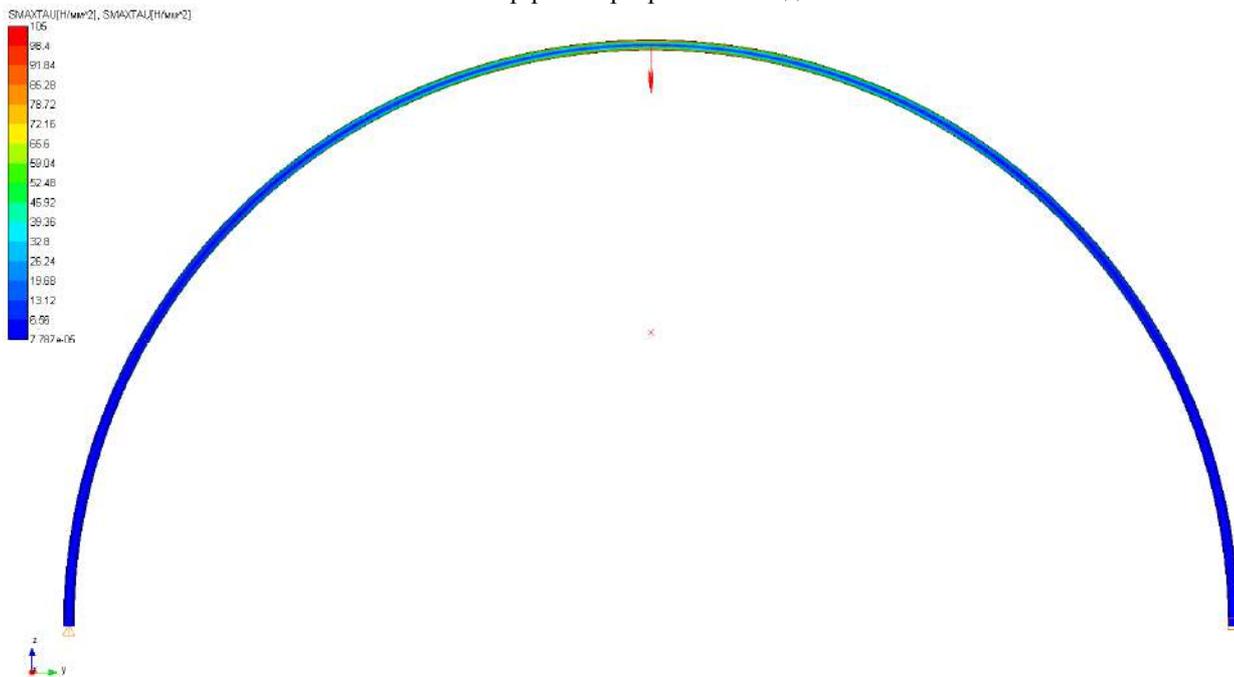


Рисунок 6. Нормальные напряжения по длине трубопровода построенного с помощью конечного элемента «пластина» в программном коде APM «Structure 3D»

A: Static Structural  
Maximum Combined Stress  
Type: Maximum Combined Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
30.01.2018 18:32

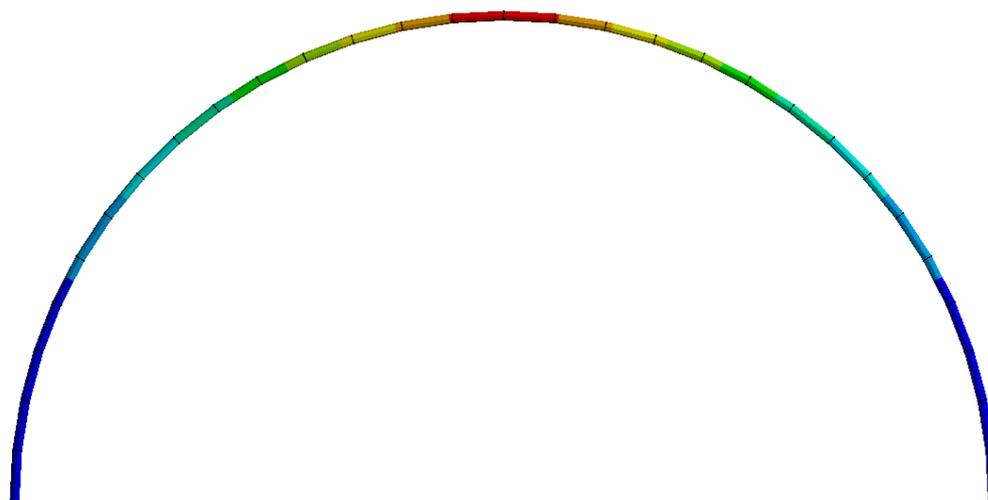
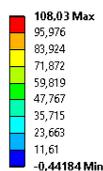


Рисунок 7. Нормальные напряжения по длине трубопровода построенного с помощью двух-узлового пространственного элемента «pipe» в программном коде «ANSYS».

Таблица 1. Сравнение численных результатов расчета конечно-элементных моделей с теоретическими

Параметр	Теоретическое значение	Элемент «Pipe».		ANSYS	Пластинчатая модель
		Количество элементов			
		2	8		
Угол поворота сечения трубы в опоре, радиан	$\pm 0,03077$	0,03076	0,03076	0,03087	0,03081
Максимальное перемещение по оси Z, мм	-19,20	-19,21	-19,21	-19,26	-16,59
Перемещение по оси Y в опоре В арки, мм	53,91	53,88	53,88	54,01	46,57
Максимальное нормальное напряжение в середине участка, МПа	107,83	106	106	108,03	105

Таблица 2. Собственные частоты при использовании 16 прямолинейных элементов

N	[рад/с]	[Гц]	[с]	м.м.* X [%]	с.м.м.** X [%]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]
1	24.4483	3.89107	0.2569994	0	0	80.7	80.7	7.37	7.37
2	118.056	18.7892	0.0532221	0	0	12	92.7	15.8	23.2
3	293.812	46.7617	0.2138546	0	0	3.34	96	1.78	25
4	534.645	85.0913	0.0117521	0	0	1.54	97.6	2.41	27.4
5	844.042	134.333	0.0074434	0	0	0.813	98.4	0.685	28.1
6	1217.78	193.816	0.0051576	0	0	0.481	98.8	1.03	29.1
7	1659.77	264.16	0.0037816	0	0	0.29	99.1	0.274	29.4
8	2166.32	344.781	0.0029004	0	0	0.185	99.3	0.701	30.1
9	2744.17	436.749	0.0022805	0	0	0.113	99.4	0.103	30.2
10	3386.14	538.921	0.0018550	0	0	0.0766	99.5	0.835	31
11	4107.53	653.734	0.0015211	0	0	0.0415	99.6	0.0133	31

\* – модальная масса;

\*\* – сумма модальных масс.

Таблица 3. Собственные частоты при использовании 16 гнутых элементов

N	[рад/с]	[Гц]	[с]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]
1	24.3074	3.86864	0.258489	0	0	80.3	80.3	7.04	7.04
2	116.506	18.5425	0.05393	0	0	12	92.3	15	22.1
3	288.059	45.8461	0.0218121	0	0	3.43	95.7	2.27	24.4
4	521.683	83.0285	0.0120441	0	0	1.62	97.3	1.94	26.3
5	817.979	130.185	0.0768135	0	0	0.903	98.3	1.31	27.6
6	1173.75	186.808	0.0053531	0	0	0.556	98.8	0.611	28.2
7	1585.65	252.364	0.0039625	0	0	0.364	99.2	0.96	29.2
8	2052.62	326.685	0.0030610	0	0	0.242	99.4	0.264	29.4
9	2564.23	408.11	0.0024503	0	0	0.168	99.6	0.92	30.4
10	3118	496.245	0.0020151	0	0	0.111	99.7	0.156	30.5
11	3684.94	586.476	0.0017051	0	0	0.079	99.8	1.33	31.8

Таблица 4. Низшие частоты собственных колебаний при различном количестве и типах элементов

Кол-во КЭ	Номер частоты/Значение, Гц								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	3,53	18,28	33,24	—	—	—	—	—	—
4	3,79	16,63	38,10	139,76	158,04	251,12	256,13	—	—
8	3,85	18,14	44,13	78,90	121,34	168,27	209,03	530,32	687,74
16	3,87	18,54	45,85	83,03	130,19	186,81	252,36	326,69	408,11
16 прям	3,89	18,79	46,76	85,09	134,33	193,82	264,16	344,78	436,75
ANSYS	3,86	18,63	46,32	84,24	132,78	191,33	260,14	338,77	427,54
Пластичны	4,06	19,59	48,70	88,57	139,56	1201,09	273,26	355,75	448,53

Как видно из таблицы 4, использование гнутых трубопроводных элементов с сосредоточенной матрицей масс дает приемлемую точность на низших частотах даже с меньшим количеством элементов. С ростом номера частоты погрешность увеличивается. Поскольку в реальных случаях трубопроводы состоят не только из криволинейных участков, но и из большого количества прямолинейных участков, то на практике погрешность будет меньше из-за наличия элементов с распределенной массой.

**Заключение.** Рассмотрен двухузловой пространственный элемент с 6 степенями свободы в каждом. Получена матрица жесткости элемента с использованием метода Кастелиано. Учитывая отсутствие функций форм, рассмотрены способы получения вектора реакций от различных воздей-

ствий. Предложен простой способ получения этого вектора для нагрузок характерного типа. Произведено тестирование полученной матрицы жесткости на примере изгиба арки с известным теоретическим решением при различном количестве конечных элементов. Полученные результаты расчетов по перемещениям и углу поворота сечения хорошо согласуются с аналитическим решением, при этом погрешность не превышает 0,1%. Произведен анализ поведения элемента при решении динамических задач.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что представленный конечный элемент гнутого участка трубы применим при моделировании трубопроводных систем как при статических нагрузках, так и при решении динамических задач.

### Список использованной литературы

1. Bathe K-J Finite element procedures. - Englewood, New Jersey : Prentice Hall, 1996.
2. Mecaniciens Societe Francaise des Guide de validation des progiciels de calcul de structures. - Paris : Afnor Technique, 1990. - Test No. SSSL08/89.
3. Warren C. Young Richard G. Budynas Roark's Formulas for Stress and Strain. - New York : McGraw-Hill, 2002. - 7-th.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Solid mechanics: Butterworth-Heinemann, 2000. - 5 : Т. 2. - 476 p.
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. The basis: 5-th ed. Butterworth-Heinemann, 2000. - Т. 1. - 708 p.
6. В.И. Феодосьев Соппротивление материалов. - М : Наука, 1972..

Получено 02.02.2018

УДК 544.723+546.732

*М. А. Кеймиров**Институт химии Академии наук Туркменистана, г. Ашхабад***ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИАМИНОМ МОНТМОРИЛЛОНИТА ОГЛАНЛЫНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ТУРКМЕНИСТАН) ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ КОБАЛЬТА (II)**

Представлены результаты изучения сорбционного извлечения кобальта (II) природным и модифицированным полиамином (низкомолекулярным полиэтиленимином разветвленной структуры) монтмориллоном Огланлынского месторождения (Туркменистан) из водных сред в зависимости от pH, времени контакта, начальной концентрации кобальта (II), ионной силы раствора и дозы сорбентов в статическом режиме. На основании рассчитанных с помощью модели Ленгмюра предельных значений адсорбции установлено, что наибольшая эффективность наблюдается для модифицированного полиамином монтмориллонита (178,6 мкмоль/г), в отличие от природного (117,6 мкмоль/г). Показано, что наличие в водном растворе комплексообразующего реагента (этилендиаминтетрауксусной кислоты) существенно подавляет сорбцию кобальта (II) на модифицированном сорбенте. Установлены диапазон pH и доза модифицированного сорбента для получения максимально возможной степени очистки вод от соединений кобальта (II).

**Ключевые слова:** кобальт (II), модифицированный монтмориллонит, очистка воды, полиамин, сорбция.

В результате деления ядерного топлива в реакторах атомных электростанций образуется около 200 разных радионуклидов. Среди радионуклидов, которые создают опасность внутреннего облучения человека – изотопы йода, цезия, стронция, циркония, бария и рутения.

Кроме продуктов деления в активной зоне реактора присутствуют также продукты активации, которые образуются в результате воздействия потоков нейтронов, которые выходят из активной зоны, на конструкционные материалы реактора и теплоноситель. Среди продуктов активации в водо-водяных реакторах наибольшее значение имеют изотопы цезия, марганца, кобальта, железа и др.

Радиоизотоп  $^{60}\text{Co}$  ( $^{59}\text{Co} + n \rightarrow ^{60}\text{Co}$ ) образуется преимущественно в результате нейтронного облучения конструкционных материалов I контура реактора и является одним из основных загрязняющих компонентов кубовых остатков АЭС [1-3]. Следует отметить, что радиоизотоп  $^{60}\text{Co}$ , как и  $^{137}\text{Cs}$ , относится к реперным радионуклидам для оценки уровня радиоактивного загрязнения окружающей среды. Кроме того, кобальт, имеющий степень окисления +2, относится к токсичным тяжелым металлам, склонным к биоаккумуляции и биомагнификации.

Известно [4, 5], что в природных водных средах Co(II) находится преимущественно в виде катионной формы ( $\text{Co}^{2+}$ ), что способствует его миграции в окружающей среде. Авторы [4] утверждают, что в условиях природных вод соединения кобальта подвержены гидролизу в незначительной степени.

Интерес вызывает сорбционная очистка водных сред от Co(II) материалами на основе природных минералов, как наиболее широко используемая и

простая в технологическом плане. Применение природного сырья (бентонита, каолинита, цеолита), доступного в больших количествах и обладающего относительно хорошей сорбционной способностью к радионуклидам и тяжелым металлам, позволяет снизить экономические затраты при очистке значительных объемов как природных, так и сточных вод.

Природный монтмориллонит (бентонит), обладающий химической и радиационной устойчивостью, большой удельной поверхностью, слоистой структурой и низкой стоимостью, зарекомендовал себя как достаточно доступный сорбент и защитный радиационный барьер при хранении радиоактивных отходов.

Для повышения сорбционных свойств материалов на основе природного монтмориллонита часто используют модифицирование поверхности матрицы данного алюмосиликата неорганическими или органическими реагентами [6]. В работе [7] приведены сведения о модифицировании додецилсульфатом натрия монтмориллонита, предварительно пилларированного железом, для извлечения Co(II) из водных растворов. Установлено, что максимальное удаление Co(II) происходит при pH=5,0–6,0. Предельное значение адсорбции Co(II) на модифицированном монтмориллоните составило (13,2÷20,2) мг/г (в зависимости от способа модифицирования поверхности) при pH=5,0. Сорбционное равновесие достигается через 30–45 минут.

Авторами [8] для извлечения Co(II) предложен монтмориллонит, модифицированный хитозаном. Показано, что высокая эффективность данного модифицированного сорбента по отношению к Co(II) (150 мг/г) достигается в течение 12 ч и обу-

словлена наличием в его структуре значительного количества амино- ( $-\text{NH}_2$ ) и гидроксогрупп ( $-\text{OH}$ ).

Исследовано [9] удаление  $\text{Co(II)}$  из водных сред монтмориллонитом, модифицированным дигидрофосфат-ионами ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ). Сорбционное извлечение кобальта резко возрастает при  $\text{pH}=4,0\div 8,0$ , что связано с ростом доли гидролизных форм  $\text{Co(II)}$ , и достигает максимума при  $\text{pH}=8,0\div 12,0$  (при  $\text{pH}=9,0$  около 95 %  $\text{Co(II)}$  осаждается в виде  $\text{Co(OH)}_2$ ). Значение максимальной сорбции для этого сорбента при  $\text{pH}=5,0$  составляет 0,202 ммоль/г. Показано, что при извлечении  $\text{Co(II)}$  из многокомпонентного раствора наблюдается значительное конкурентное влияние ионов других металлов ( $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cs}^+$ ), подавляющих сорбцию  $\text{Co(II)}$  на модифицированном монтмориллоните (за счет экранирования функциональных групп).

Авторами [10] изучена возможность использования модифицированного хелатирующим реагентом (8-гидроксихинолином) бентонита для сорбционного извлечения  $^{60}\text{Co}$  из водного раствора. Значительное увеличение степени извлечения  $^{60}\text{Co}$  – (42,87÷71,78) %, характерно для области  $\text{pH}=5,0\div 7,0$ . Предельное значение адсорбции  $\text{Co(II)}$  составило 4,42 ммоль/г при  $\text{pH}=6,0$ . Сорбционное равновесие достигается примерно через 120 мин.

Известно [4, 5, 11], что образование комплексов  $\text{Co(II)}$  с неорганическими лигандами в водных растворах при их низких концентрациях почти не наблюдается, о чем свидетельствуют низкие константы устойчивости этих комплексов. Однако с органическими лигандами, в особенности, содержащими аминогруппы (например, полиаминокислоты),  $\text{Co(II)}$  образует достаточно прочные комплексы [4, 12].

В связи с этим заслуживает внимания получение и применение для извлечения из водных сред соединений  $\text{Co(II)}$  монтмориллонитом, модифицированным полимерными аминоксодержащими реагентами.

Цель данной работы – исследование возможности сорбционной очистки вод от  $\text{Co(II)}$  как полного химического аналога радиоизотопа  $^{60}\text{Co}$  природным и модифицированным полиамином монтмориллонитом Огланлынского месторождения (Туркменистан).

**Методика проведения сорбционных экспериментов.** Получение очищенной Na-формы монтмориллонита. Очищенную фракцию указанного Na-монтмориллонита получали методом седиментационного разделения [13]. Для этого измельченную глинистую породу, состоящую преимущественно из монтмориллонита (86,2 % глинистых частиц), а также некоторого количества клиноптилолита и опала, засыпали в стеклянный бутыль (10  $\text{дм}^3$ ) и заливали дистиллированной водой в соот-

ношении минерал:жидкость=1:20, тщательно перемешивали и отстаивали в течение 24 ч. После отстаивания воду с частицами, которые не осели ( $< 0,001$  мм), сливали. Процесс осаждения интенсифицировали добавкой электролита (20  $\text{см}^3$  1 моль/ $\text{дм}^3$  раствора  $\text{NaCl}$  на 1  $\text{дм}^3$  суспензии). Суспензию многократно отмывали дистиллированной водой до негативной реакции на хлорид-ионы в промывном растворе (контролировали количественно по реакции с  $\text{AgNO}_3$ ). Далее суспензию центрифугировали в течение 30 мин со скоростью вращения 6000 об/мин. Полученный осадок высушивали при 75 °С, растирали в агатовой ступке и просеивали через сито для получения фракции  $\leq 0,25$  мм.

*Получение модифицированного полиамином монтмориллонита.* Модифицирование монтмориллонита в Na-форме проводили путем сорбции полиамина поверхностью алюмосиликата (Mont-PEI) согласно [14]. Суспензию воздушно-сухого природного минерала массой 35 г (фракция  $\leq 0,25$  мм) и раствора ПЭИ концентрацией 0,05 моль/ $\text{дм}^3$  встряхивали в течение 24 ч и  $T=20$  °С. При этом поддерживали постоянное значение  $\text{pH}=9,0$  с помощью добавления определенных порций  $\text{NaOH}$ . После декантации суспензии и ее центрифугирования при 6000 об/мин полученные растворы дополнительно фильтровали (мембранный фильтр 0,45 мкм). Полученный осадок многократно (примерно 7 раз) промывали дистиллированной водой, высушивали при 75 °С и растирали в агатовой ступке (фракция  $\leq 0,25$  мм). Концентрацию полиамина в растворе после сорбции определяли в отобраных аликвотах спектрофотометрически в УФ-области при  $\lambda=200$  нм на спектрофотометре UNICO UV/VIS 2800 с использованием кварцевых кювет [15]. Количество сорбированного ПЭИ рассчитывали по разнице концентраций в исходном растворе и в растворах после фильтрования. Содержание ПЭИ в модифицированном сорбенте Mont-PEI составляло 250,7 мг/г сорбента.

Водные растворы  $\text{Co(II)}$  с концентрацией  $1\cdot 10^{-4}$  моль/ $\text{дм}^3$  (5,9 мг/ $\text{дм}^3$ ) готовили растворением навески соли  $\text{Co(NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  квалификации (ч.д.а.) в определенном объеме дистиллированной воды.

Для создания ионной силы ( $I$ ) водных растворов использовали соль  $\text{KNO}_3$  (х.ч.), соответствующую навеску которой растворяли в дистиллированной воде в мерной колбе емкостью 200  $\text{см}^3$ .

Растворы низкомолекулярного ( $M_r=10$  кДа) ПЭИ разветвленной структуры готовили разбавлением исходных коммерческих 50 % растворов фирмы «Fluka» (Швейцария). Элементарное звено макромолекулы используемого полиамина содержит три атома азота разной основности. Коммерческий ПЭИ разветвленной структуры содержит первичный, вторичный, и третичные аминогруппы

в соотношении 25 %, 50 % и 25 % [16]. Анализ растворов на содержание ПЭИ проводили спектрофотометрическим методом [15].

Для проведения экспериментов по сорбционному извлечению кобальта (II) в статическом режиме предварительно подготовленные воздушно-сухие навески сорбентов помещали в конические колбы емкостью 100 см<sup>3</sup> с исследуемыми растворами при соотношении V/m = 500 см<sup>3</sup>/г. Суспензии перемешивали в течение 1 ч при комнатной температуре (T=20 °C) на лабораторном встряхивателе LOIP LS-110. Затем твердую и жидкую фазу разделяли центрифугированием (5000 об/мин). Жидкую фазу анализировали на содержание кобальта (II) фотометрически с использованием нитрозо-R-соли в видимой области спектра при λ=520 нм на спектрофотометре UNICO 2100UV по методике [17].

Эффективность сорбционного извлечения кобальта (II) определяли по величине сорбции ( $a_s$ , мкмоль/г), и степени очистки водных растворов (R, %), которые рассчитывали по формулам:

$$a_s = (C_0 - C_k) \frac{V}{m}, \quad (1)$$

$$R = \frac{(C_0 - C_k)}{C_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $C_0$ ,  $C_k$  – концентрация кобальта (II) в исходном растворе до и после его очистки, мкмоль/дм<sup>3</sup>; V – объём жидкой фазы, дм<sup>3</sup>; m – навеска сорбента, г.

Для анализа результатов сорбции кобальта (II) в статических условиях применяли уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха [18, 19]:

$$a_s = \frac{K_L \cdot a_\infty \cdot C_k}{1 + K_L \cdot C_k}, \quad (3)$$

$$a_s = K_F \cdot C_k^{1/n}, \quad (4)$$

где  $K_L$  – константа Ленгмюра,  $1/n$ ,  $K_F$  – константы Фрейндлиха.

Эксперименты по изучению кинетики сорбции кобальта (II) в статическом режиме проводили с использованием модельных растворов с концентрацией кобальта (II)  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>. Навеску предварительно подготовленного воздушно-сухого сорбента (0,100 г) помещали в коническую колбу с 50 см<sup>3</sup> исследуемого раствора. Затем через определенные промежутки времени проводили отбор проб раствора и их анализ.

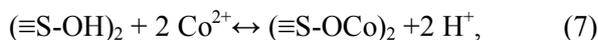
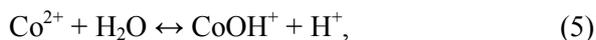
Для контроля значения pH исходного водного раствора использовали иономер pH-340 со стеклянным электродом ЭСЛ-43-07. Путем добавления

к модельным растворам 0,01 или 0,1 моль/см<sup>3</sup> NaOH или HNO<sub>3</sub> устанавливали необходимые величины pH.

**Влияние pH водных растворов на сорбцию Co(II) природным и модифицированным полиамином монтмориллонитами.** На рисунке 1 показано влияние pH модельного водного раствора ( $I(KNO_3)=0,01$ ) на сорбцию Co(II) исследуемыми сорбентами. Как видно, с ростом pH наблюдается существенное увеличение величин сорбции Co(II) на образце Mont-PEI по сравнению с природным Na-монтмориллонитом, что указывает на связывание ионов данного металла с аминогруппами полиамиона, закрепленными на поверхности матрицы сорбента.

Следует отметить, что резкое увеличение сорбции Co(II) в диапазоне pH=6,0÷9,0 является типичным при сорбции гидролизующихся ионов переходных металлов на поверхности монтмориллонита. Как видно из рисунка 2, в кислой и нейтральной областях pH водного раствора кобальт преимущественно находится в виде катиона и мономерных катионных гидроксоформ [4]. Гидролиз Co(II) начинается при pH>8,0 с образованием гидроксоформ CoOH<sup>+</sup>, Co(OH)<sub>2</sub> и Co(OH)<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Часть кобальта сорбируется в результате электростатического взаимодействия CoOH<sup>+</sup> с отрицательно заряженной поверхностью монтмориллонита. Также возможно связывание Co(II) с гидроксильными группами монтмориллонита. Характер сорбции Co(II) на природной форме монтмориллонита обусловлен ионным обменом в межслоевом пространстве с образованием внешнесферных комплексов на базальной поверхности минерала и комплексообразованием на боковой поверхности минерала с образованием внутрисферных комплексов (≡S – поверхность монтмориллонита) [9, 20]:



Следует отметить, что при pH>10,0 имеет место практически полное удаление Co(II) из раствора, что, очевидно, происходит за счет осаждения Co(OH)<sub>2</sub>.

**Влияние продолжительности контакта на сорбцию Co(II) природным и модифицированным полиамином монтмориллонитами.** Влияние продолжительности контакта сорбента с раствором на сорбцию Co(II) на образцах Na-монтмориллонита и Mont-PEI показано на рисунке 3.

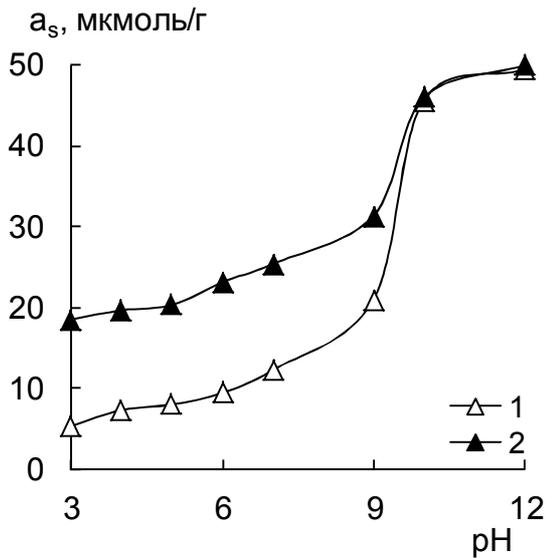


Рисунок 1. Влияние pH на сорбцию Co(II) из водного раствора ( $I(\text{KNO}_3)=0,01$ ;  $C_{\text{Co(II)}}=1 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>) сорбентами: 1 – Mont-PEI; 2 – Na-монтмориллонит

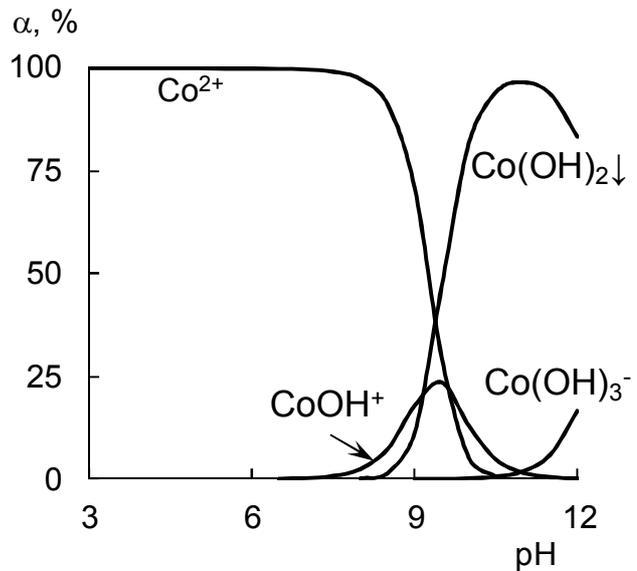


Рисунок 2. Формы нахождения Co(II) в водных растворах ( $I(\text{KNO}_3)=0,01$ ;  $C_{\text{Co(II)}}=1 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>)

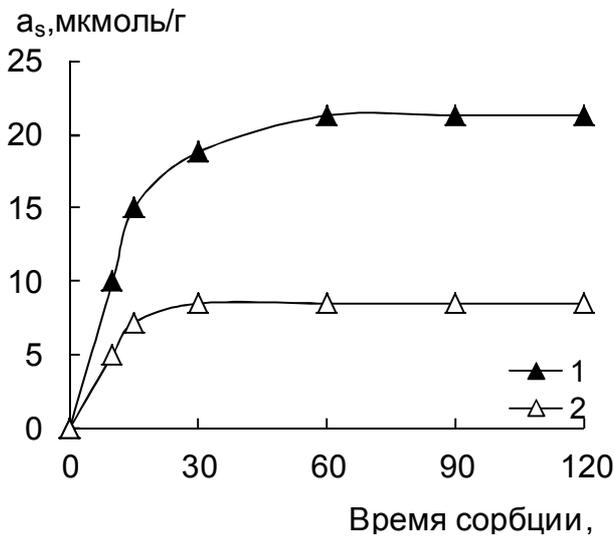


Рисунок 3. Влияние продолжительности контакта сорбента с раствором на сорбцию Co(II) образцами Na-монтмориллонита и Mont-PEI (pH=5,5;  $I(\text{KNO}_3)=0,01$ ;  $C_{\text{Co(II)}}=1 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>): 1 – Mont-PEI; 2 – Na-монтмориллонит

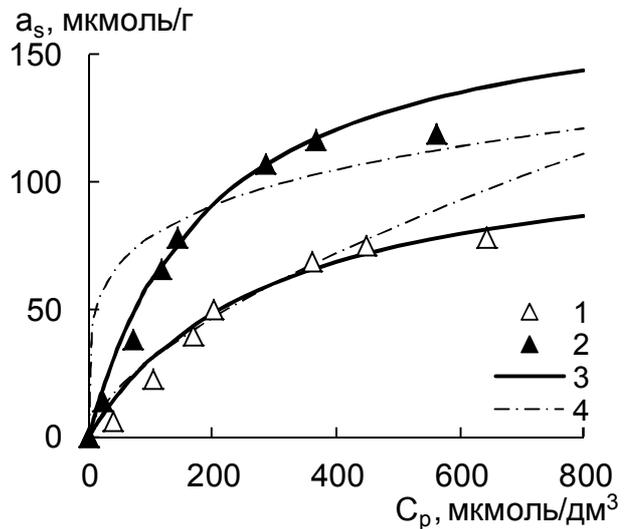


Рисунок 4. Изотермы сорбции Co(II) из водных растворов ( $I(\text{KNO}_3)=0,01$ ; pH=5,5): 1 – Mont-PEI; 2 – Na-монтмориллонит; 3 – изотермы, полученные на основании уравнения Ленгмюра; 4 – то же для уравнения Фрейндлиха

Как видно, величины сорбции Co(II) резко возрастают в первые 30 мин на обоих сорбентах и через 1 ч достигается сорбционное равновесие. Максимальная величина сорбции Co(II) из водного раствора достигается на образце Mont-PEI (~21 мкмоль/г), что свидетельствует о большей селективности по отношению к исследуемому иону кобальта модифицированного алюмосиликата, чем природного.

**Изотермы сорбции Co(II) на природном и модифицированном полиамином монтмориллонитах.** Экспериментально получены изотермы сорбции Co(II) для исследуемых сорбентов, обработанные соответственно по моделям Ленгмюра и Фрейндлиха (рисунок 4, таблица 1).

Таблица 1. Коэффициенты уравнений сорбции Co(II) из водных растворов ( $I(\text{KNO}_3)=0,01$ ; pH=5,5) на природном и модифицированном полиамином монтмориллоните

Сорбент	По Фрейндлиху $a_s = K_F \cdot C_k^{1/n}$			По Ленгмюру $a_s = \frac{K_L \cdot a_\infty \cdot C_k}{1 + K_L \cdot C_k}$		
	$K_F$	$1/n$	$r$	$K_L$	$a_\infty$ , мкмоль/Г	$r$
Na-монтмориллонит	1,68	0,627	0,97	0,004	117,6	0,96
Mont-PEI	30,2	0,208	0,90	0,005	178,6	0,99

Примечание.  $r$  – коэффициент корреляции.

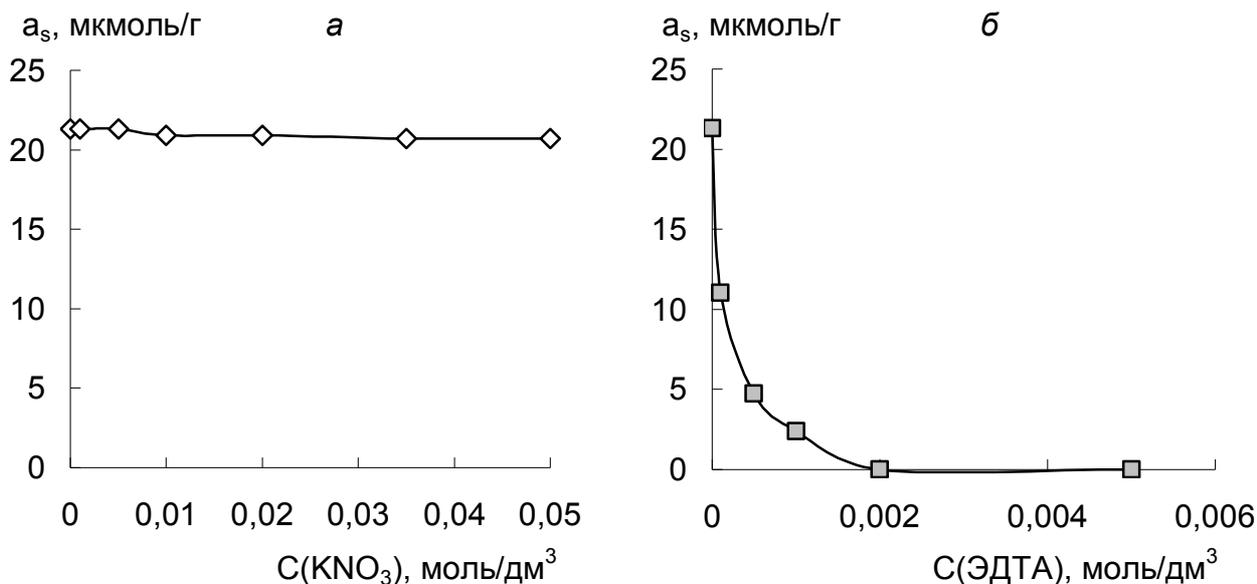


Рисунок 5. Зависимость величины сорбции Co(II) на Mont-PEI от ионной силы раствора (а) и концентрации ЭДТА (б) ( $\text{pH}=6,5$ ;  $C_{\text{Co(II)}}=1 \cdot 10^{-4}$  моль/ $\text{дм}^3$ )

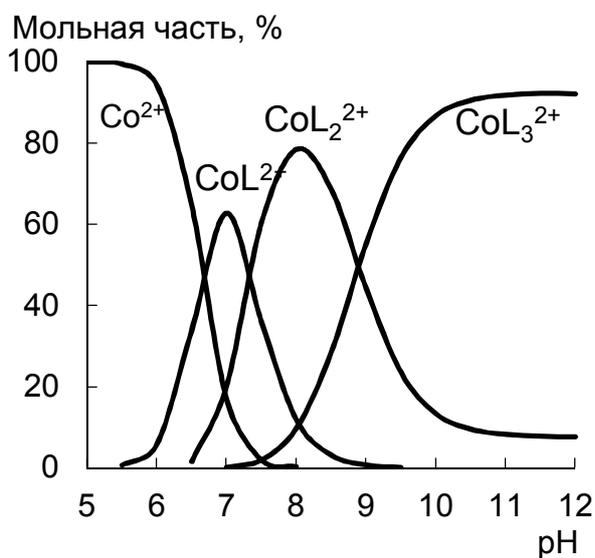


Рисунок 6. Формы нахождения Co(II) в растворе при контакте с воздухом в присутствии ЭДТА ( $C_{\text{Co(II)}}=1 \cdot 10^{-4}$  моль/ $\text{дм}^3$ ,  $C_{\text{ЭДТА}}=1 \cdot 10^{-2}$  моль/ $\text{дм}^3$ )

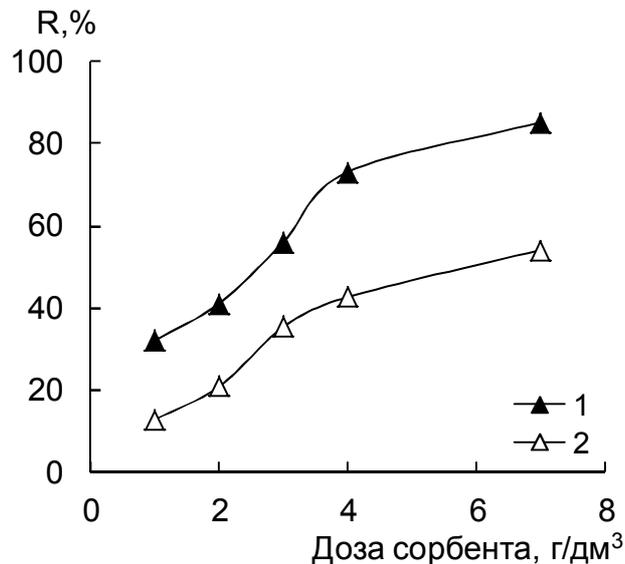


Рисунок 7. Влияние дозы сорбентов на степень очистки ( $R$ , %) водных растворов от Co(II) ( $\text{pH}=5,5$ ;  $I(\text{KNO}_3)=0,01$ ;  $C_{\text{Co(II)}}=1 \cdot 10^{-4}$  моль/ $\text{дм}^3$ ): 1 – Mont-PEI; 2 – Na-монтмориллонит

Как видно, используемые модели удовлетворительно описывают экспериментальные данные ( $R > 0,9$ ). Максимальная величина сорбции Co(II), рассчитанная исходя из уравнения Ленгмюра, при  $\text{pH}=5,5$  составляет большее значение для образца Mont-PEI (178,6  $\mu\text{mol/g}$ ), чем для природной Na-формы монтмориллонита (117,6  $\mu\text{mol/g}$ ). Влияние ионной силы раствора и концентрации этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) на сорбцию Co(II) на модифицированном полиамином монтмориллоните. Из рисунка 5а следует, что ионная сила ( $\leq 0,05$ ) практически не влияет на сорбционную способность Mont-PEI по отношению к Co(II) при  $\text{pH}=6,5$  (близком к значению природ-

ных вод), что свидетельствует о его связывании за счет комплексообразования с аминогруппами полиамина. Также изучено влияние ЭДТА, как наиболее часто используемого комплексообразующего реагента, на сорбцию Co(II) из модельного водного раствора (рисунок 5б).

Как видно, с ростом концентрации ЭДТА в водном растворе наблюдается резкое снижение величин сорбции Co(II). Так, при эквимольном соотношении данного иона кобальта и указанного лиганда наблюдается снижение сорбции примерно на 50%. При дальнейшем увеличении концентрации ЭДТА ( $> 0,001$  моль/ $\text{дм}^3$ ) сорбция Co(II) образцом Mont-PEI полностью подавляется, что,

по-видимому, обусловлено формированием прочных комплексов Co(II)–ЭДТА (рисунок 6).

**Влияние дозы природного и модифицированного полиамином монтмориллонитов на извлечение Co(II).** Как видно из рисунка 7, с увеличением дозы исследуемых сорбентов степень очистки водных растворов от Co(II) ( $I(KNO_3)=0,01$ ) при pH=5,5 возрастает. Установлено, что увеличение дозы природного Na-монтмориллонита с 1 до 7 г/дм<sup>3</sup> не приводит к значительному увеличению степени очистки вод от Co(II) (менее 60 %), в отличие от Mont-PEI. Показано, что применение монтмориллонита, модифицированного полиамином, в количестве 7 г/дм<sup>3</sup> позволяет достигать высоких степеней очистки вод от Co(II) (более 85 %), что позволяет рекомендовать данный сорбционный материал для очистки больших объемов загрязненных вод.

## Выводы

На основании полученных результатов установлено, что монтмориллонит Огланлынского месторождения (Туркменистан), модифицированный полиамином, является более эффективным при сорбционной очистке вод от соединений Co(II) по сравнению с природной формой алюмосиликата. Установлено, что модифицированный монтмориллонит обладает высокой сорбционной способностью при очистке слабо- и среднеминерализованных вод с нейтральным значением pH. Учитывая высокую эффективность и низкую стоимость сорбента, а также возможность получения его из местного сырья, указанный сорбент может найти применение для очистки вод, содержащих радиоизотоп <sup>60</sup>Co, в различных технологических схемах.

## Список использованной литературы

- Granados F. 60Co aqueous speciation and pH effect on the adsorption behavior on inorganic materials / F. Granados, V. Bertin, S. Bulbulian, M. Solache-Rios // Appl. Radiat. Isot. – 2006. – Vol. 64. – P. 291–297.
- Enhanced sorption of radiocobalt from water by Bi(III) modified montmorillonite: A novel adsorbent / Z. Guo, Y. Li, S. Zhang, H. Niu, Z. Chen, J. Xu // J. Hazard. Mater. – 2011. – Vol. 192. – P. 168–175.
- Синицын В.И. Радиоактивный кобальт <sup>60</sup>Co / В.И. Синицын – М.: Атомиздат, 1967. – 111 с.
- Линник П.Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П.Н. Линник, Б.И. Набиванец – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 269 с.
- Bürgisser C.S. Determination of EDTA, NTA and other aminocarboxylic acids and their complexes Co(II) and Co(III) in capillary electrophoresis / C.S. Bürgisser, A.T. Stone // Env. Sci. Technol. – 1997. – Vol. 31, № 9. – P. 2656–2664.
- Bhattacharyya K.G. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review / K.G. Bhattacharyya, S.S. Gupta // Adv. Colloid Interf. Sci. – 2008. – Vol. 140, № 2. – P. 114–131.
- Li S.-Z. Characterization of sodium dodecyl sulfate modified iron pillared montmorillonite and its application for the removal of aqueous Cu(II) and Co(II) / S.-Z. Li, P.-X. Wu // J. Hazard. Mater. – 2010. – Vol. 173. – P. 62–70.
- Removal of cobalt(II) ion from aqueous solution by chitosan–montmorillonite / H. Wang, H. Tang, Z. Liu et al. // J. Environ. Sci. – 2014. – Vol. 26. – P. 1879–1884.
- Removal of Co<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> and Cs<sup>+</sup> from aqueous solution by phosphate-modified montmorillonite (PMM) / B. Ma, S. Oh, W.S. Shin, S.-J. Choi // Desalination. – 2011. – 276. – P. 336–346.
- Metwally S.S., Ayoub R.R. Modification of natural bentonite using a chelating agent for sorption of <sup>60</sup>Co radionuclide from aqueous solution // Appl. Clay Sci. – 2016. – 126. – P. 33–40.
- Girvin D.C. Adsorption of nitrilotriacetate (NTA), Co and CoNTA by gibbsite / D.C. Girvin, P.L. Gassman, H. Jr. Bolton // Clays Clay Miner. – 1996. – Vol. 44, № 6. – P. 757–768.
- Инцеди Я. Применение комплексов в аналитической химии / Я. Инцеди – М.: Мир, 1979. – 376 с.
- Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды / Ю. И. Тарасевич – К.: Наукова думка, 1981. – 208 с.
- Adsorption of polyethyleneimine from aqueous solutions on bentonite clays / N. Öztekin, A. Alembar, N. Güngör, F. B. Erim // Mater. Lett. – 2002. – Vol. 55, N 1–2. – P. 73–76.
- Гембицкий П.А. Полиэтиленимин / П. А. Гембицкий, Д. С. Жук, В. А. Каргин. – М.: Наука, 1971. – 203 с.
- Chelating properties of linear and branched poly(ethyleneimines) / S. Kobayashi, K. Hiroishi, M. Tokunoh, T. Saegusa // Macromolecules. – 1987. – Vol. 20, N 7. – P. 1496–500.
- Марченко З. Фотометрическое определение элементов / З. Марченко. – М.: Мир, 1971. – 547 с.
- Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum / I. Langmuir // J. Am. Chem. Soc. – 1918. – Vol. 40. – P. 1361–1403.
- Freundlich H. Concerning adsorption in solutions / H. Freundlich // Z. Phys. Chem. – 1906. – Vol. 57. – P. 385–470.
- Chen L. Sorption and desorption of radiocobalt on montmorillonite – Effects of pH, ionic strength and fulvic acid / L. Chen, S. Lu // Appl. Radiat. Isot. – 2008. – Vol. 66. – P. 288–294.

Получено 18.01.2018

© М.А. Кеймиров, 2018

УДК 621.039

*В. И. Скалозубов, О. А. Чулкин., Д. С. Пирковский**Одесский национальный политехнический университет*

## ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И ПОСЛЕДСТВИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УДАРОВ В ОБОРУДОВАНИИ И ТРУБОПРОВОДАХ СИСТЕМ, ВАЖНЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Проведен обзорный анализ известных подходов моделирования гидродинамических ударов на оборудование и элементы трубопроводов систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок в нормальных условиях эксплуатации, при нарушениях нормальных условий и в аварийных режимах. Определена необходимость усовершенствования и разработки методов моделирования условий возникновения и последствий гидродинамических ударов вследствие различных видов теплогидродинамической неустойчивости одно- и двухфазных потоков.

Анализ опыта эксплуатации по статистике зарегистрированных гидродинамических ударов показал приоритетность моделирования и анализа запроектной аварии с межконтурными течами в парогенераторах ядерных энергетических установок с учетом различных видов гидродинамических ударов вследствие теплогидродинамической неустойчивости.

**Ключевые слова:** гидродинамический удар, теплогидродинамическая неустойчивость, ядерная энергетическая установка.

**Введение.** Под гидродинамическим ударом (ГУ) обычно подразумевается импульсное высокоамплитудное динамическое воздействие потока на энергооборудование (насосы, арматура, теплообменники и т.п.) и элементы трубопроводных систем, которое существенно влияет на их надежность, работоспособность, вибрационное состояние и износ [1-9].

Причины условий возникновения ГУ разнообразны:

- импульсное увеличение локальных гидравлических сопротивлений (например, ускоренное закрытие клапанов арматуры);
- теплогидродинамическая колебательная и апериодическая неустойчивость одно- и двухфазных потоков;
- негомогенность структуры двухфазных потоков;
- импульсы давления в результате интенсивных процессов конденсации;
- импульсы давления в процессе трансзвуковых режимов течения одно- и двухфазных потоков, которые сопровождаются т.н. «скачками уплотнения»;
- резонансные эффекты и другое.

Традиционно в энергетике используется известная классификация видов ГУ [1].

**Изложение основного материала. Волна давления в однофазном потоке.**

Это классическое явление ГУ. Резкое изменение скорости потока приводит к возникновению волны давления, которая распространяется в жидкости. ГУ может быть полным, когда скорость потока изменяется скачком или за определенное время, которое меньше удвоенного времени прохода ударной волной данного трубопровода [10].

При увеличении времени изменения скорости сверх указанного предела ГУ становится неполным и далее вырождается совсем. Амплитуду волны давления обычно определяют по известной формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta P_g = \rho \cdot c \cdot \Delta V, \quad (1)$$

где  $\Delta P_g$  - интенсивность гидроудара, Па;

$\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V$  - скачок скорости в трубопроводе, м/с;

$c$  - скорость распространения ударной волны (звука) без учета податливости стенок, м/с.

Поэтому, основные разработки по определению динамических нагрузок при ГУ этого вида направлены в основном на моделирование пространственно-временных полей распределения скорости потока на локальных (местных) гидравлических сопротивлениях [11-25].

**Ускорение пробки воды в паропроводе.** Это явление наблюдается в тех случаях, когда в дренажный трубопровод, в котором остались остатки конденсата, подается большой расход пара. Это возможно, например, при открытии предохранительного клапана парогенератора [10]. Пробка воды, разогнанная потоком пара до большой скорости, при своем движении по трубопроводу создает повышенные механические нагрузки на элементы трубопровода, такие как гибы, сужения проходного сечения и т.д. Такие ситуации наблюдались в паровых и вспомогательных системах атомных станций. Основную неопределенность при моделировании такого вида ГУ создает размер пробки. Для предотвращения подобных ГУ рекомендуется установка дренажей в нижних точках

трубопровода, внедрение уклонов на горизонтальных участках трубопроводов и корректировка процедур прогрева трубопроводов. Наличие малых байпасных линий параллельно основным клапанам позволяет постепенно прогреть сбросную линию и предотвратить возникновение ГУ [10].

**Конденсация паровых пузырей, приводящая к гидроударам.** Этот вид ГУ, называемый конденсационным, возникает тогда, когда изолированный паровой объем оказывается окруженным более холодной жидкостью. Быстрая конденсация и схлопывание парового объема приводят к резкому ускорению объемов жидкости, окружающих паровой пузырь. При столкновении этих объемов в зоне конденсации возникает ударная волна, которая распространяется по системе. Это явление чаще всего наблюдалось в системах питательной воды как в реакторах PWR, так и ВВЭР, где быстрая конденсация парового объема при контакте с холодной водой, подаваемой от систем аварийной подачи питательной воды, приводила к ГУ [10].

В работе [2] рассмотрены несколько ситуаций, связанных с конденсационными ГК.

1) **Первая ситуация**, когда с одной стороны горизонтальный трубопровод присоединен к сосуду, в котором находится пар, а с другой стороны в этот трубопровод подается холодная вода с малым расходом. При встречном движении воды и пара на поверхности воды образуются волны, которые могут привести к образованию изолированных паровых пузырей. Если температура жидкости меньше температуры насыщения, то происходит схлопывание парового пузыря с образованием ударной волны. Процесс взаимодействия пара и воды иллюстрируется на рисунке 1.

Согласно [2] имеется несколько критериев, при одновременном достижении которых возможно появление конденсационных ГУ при движении стратифицированного пароводяного потока в горизонтальных трубопроводах. Рассмотрим их.

**Первым условием** является достаточно большая длина трубопровода. Образование паровых пузырей, способных спровоцировать конденсационный ГУ, возможно лишь при:  $L/D > 24$

где  $L$  - длина трубопровода, м;  $D$  - внутренний диаметр, м.

Изгибы трубопровода в горизонтальном плане в этом случае не учитываются. Учитываются только прямые участки.

**Вторым условием** является разница температуры поступающей воды и температуры насыщения. Конденсационный ГУ возникает тогда, когда  $(T_s - T) > 20^{\circ}C$ .

**Третьим условием** является скорость воды в в трубопроводе.

ГУ возникает тогда, когда критерий Фруда:

$$Fr = \frac{V_{жс}}{\sqrt{g \cdot D}} < 1$$

где  $V_{жс}$  - скорость жидкости, отнесенная к полному сечению трубопровода, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>.

**Четвертым условием** возникновения конденсационного ГУ является наличие достаточно низкого объемного паросодержания:

$$\varphi < 0,8$$

2) **Вторая ситуация** – это когда холодная вода подается сверху в вертикальный трубопровод, наполненный паром. При малом расходе вода стекает по стенке либо пленкой, либо ручейком. Однако при увеличении расхода воды возможно появление переходного режима, когда образуются большие паровые пузыри, окруженные холодной водой. Их быстрая конденсация может привести к ГУ. Такой способ подачи воды нежелателен на практике.

3) **Третья ситуация** – это когда холодная вода подается в вертикальный трубопровод снизу. Если скорость подъема воды невелика, то на поверхности фронта движения воды быстро образуется тонкий слой нагретой до насыщения воды, который препятствует быстрой конденсации пара. В этом случае гидроудар невозможен. При большом расходе воды возможно образование изолированных паровых пузырей и их конденсация.

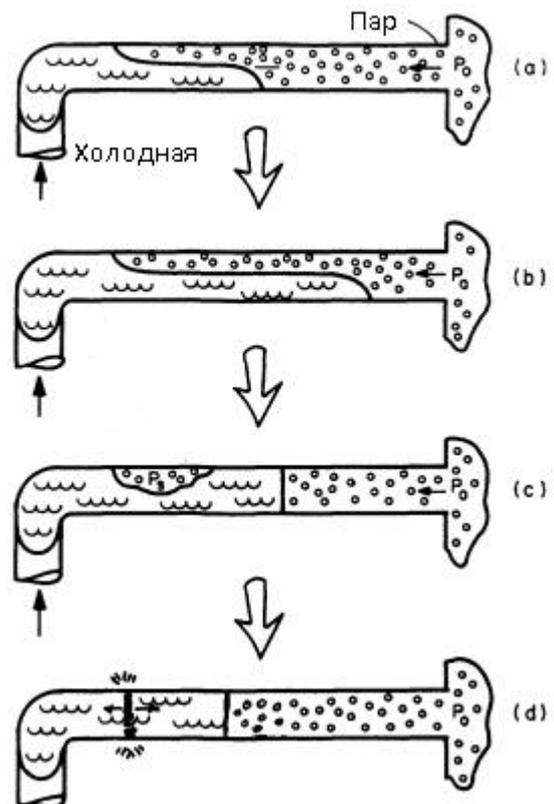


Рисунок 1. Взаимодействие паровых пузырей с водой, приводящее к гидроудару

Возникновение таких ГУ предотвращается двумя способами [10]:

- принимаются проектные решения, заведомо исключающие образование изолированных паровых объемов в холодной жидкости;

- принимается такой регламент эксплуатации, который дает тот же результат.

В общем случае, расчетное моделирование условий и последствий конденционных ГУ затруднительно. Поэтому, в основном, решение этого вопроса проводят на основе экспериментальных исследований при атмосферных давлениях (например, [3-5]).

Анализ известных подходов моделирования ГУ в энергооборудовании и элементах трубопроводных систем позволяет сделать следующие основные **выводы**:

1. Традиционно используемое известное соотношение (1) для определения динамических нагрузок при ГУ обосновано для частного случая возникновения ГУ при импульсном торможении однофазного потока вследствие резко увеличения локального (местного) гидравлического сопротивления (например, ускоренное закрытие клапана арматуры). Этот частный случай фактически соответствует одной из разновидностей аperiodической гидродинамической неустойчивости однофазных потоков, при которой происходит скачкообразное (или импульсное) изменение гидродинамических параметров (давления и скорости).

В случае возникновения колебательной гидродинамической неустойчивости, которая сопровождается высокоамплитудными колебаниями значений гидродинамических параметров, динамические нагрузки  $\Delta P_g$  должны, как минимум, зависеть от амплитудно-частотных характеристик колебательной неустойчивости. Соотношение (1) не учитывает этих факторов и поэтому не обосновано для моделирования динамических нагрузок при ГУ, вызванных колебательной неустойчивостью гидродинамических параметров.

2. Определяющими параметрами условий возникновения разных видов ГУ являются скорость и время роста  $t_n$  импульса давления:

$$\Delta P'_g = \frac{dP}{dt}(\vec{\Phi}), \quad (2)$$

где  $\vec{\Phi}$  - набор определяющих факторов разных видов ГУ.

Тогда, максимальная динамическая нагрузка при ГУ за время  $t_n$ :

$$\Delta P_g = \int_0^{t_n} \frac{dP}{dt} \cdot dt \quad (3)$$

При ГУ, вызванных ускоренным закрытием арматуры, основными определяющими факторами

являются скорость закрытия клапана и ускорение торможения потока.

При ГУ, вызванных колебательной гидродинамической неустойчивостью, основным определяющим фактором является амплитудно-частотные характеристики колебаний гидродинамических параметров.

При ГУ, вызванных неомогенностью структуры двухфазных потоков, основным определяющим фактором является скорость движения паровой фазы.

При ГУ, вызванных конденсацией паровой фазы, основным определяющим фактором является скорость движения межфазной границы.

При ГУ, вызванных трансзвуковыми режимами одно- и двухфазных потоков, основным определяющим фактором является амплитуда «скачков уплотнения» в зоне достижения скорости потока, скорости звука в среде потока.

При резонансных эффектах основным определяющим фактором ГУ является условия совпадения собственной частоты трубопроводной системы с частотой вынужденных возмущений.

Указанные выше определяющие параметры и факторы отражают основной эффект при различных видах ГУ, который заключается в переходе кинетической энергии торможения потока перед оборудованием и/или элементами трубопроводных систем в энергию импульса давления ГУ.

Во всех известных нам подходах моделирования различных видов ГУ основной эффект перехода кинетической энергии торможения потока в энергию импульса давления ГУ изучен крайне недостаточно. Формально этот вывод связан с тем, что при расчетном моделировании условий возникновения ГУ обычно рассматриваются только уравнения сплошности и движения потоков.

3. В представленной выше известной классификации видов ГУ [1] отсутствуют виды ГУ, вызванные теплогидродинамической неустойчивостью (ТГН).

Причинами возникновения теплогидродинамической колебательной неустойчивости могут быть: инерционность, напорно-расходной характеристики насосов; инерционность теплообменных процессов в двухфазных потоках; резонансные эффекты и другие определяющие факторы ГУ на энергооборудовании и элементы трубопроводных систем. Причинами аperiodической ТГН могут быть импульсное увеличение локального гидравлического сопротивления; конденсационные «скачки уплотнения» при трансзвуковых режимах течения парожидкостных потоков; снарядно-пробковые режимы течения двухфазных потоков в оборудовании /трубопроводах и другие.

При этом, необходимо учитывать возможность одновременной или последовательной реализации

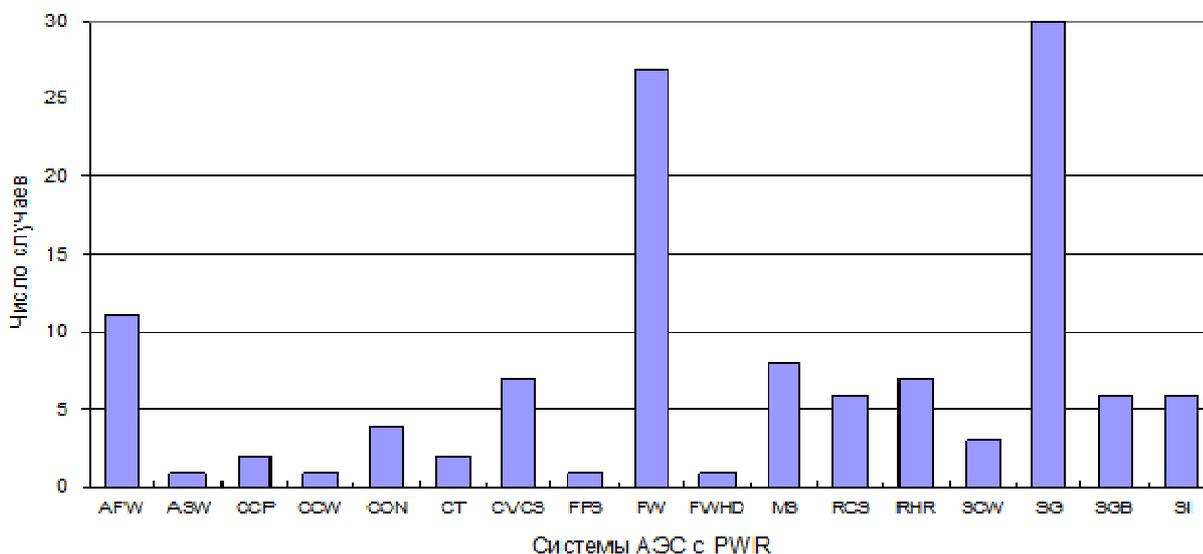
разных видов ГУ, вызванных ТГН. Например, при ускоренном закрытии отсечной /запорной арматуры могут реализоваться условия ГУ как при импульсном увеличении локального гидравлического сопротивления, так и «скачков уплотнения».

В настоящее время, вопросы моделирования ГУ, вызванных различными видами ТГН одно- и двухфазных потоков изучены крайне недостаточно. Необходимо разрабатывать методическое обеспечение определения параметров ГУ, учитывающих определяющие факторы возникновения различных видов ТГН и основной эффект ГУ – переход кинетической энергии торможения потока в энергию импульса давления ГУ.

Особенно актуальны вопросы определения условий возникновения и последствий ГУ для систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ). «Жесткие» требования

по обеспечению ядерной и радиационной безопасности, предъявляемые в ядерной энергетике, определяют повышенные требования к надежности и работоспособности оборудования и трубопроводов систем, важных для безопасности ядерных энергоустановок. ГУ могут быть как следствием нарушения безопасной эксплуатации, так и исходными аварийными событиями. Кроме того, общепринятая в ядерной энергетике концепция «Течь перед разрушением» определяет необходимость учитывать весь спектр нагрузок (в т.ч. и ГУ), которым подвергается оборудование и трубопроводы в течение всего срока эксплуатации для прогнозирования роста дефектов [10].

В качестве примера ниже представлены количество зарегистрированных случаев с ГУ, имевших место на реакторах PWR [6].



Тип системы	Число случаев
AFW – вспомогательная питательная вода	11
ASW – вспомогательная соленая вода	1
CCP – охлаждающая вода компонентов	2
CCW – охлаждающая вода конденсатора	1
CON – система конденсата	4
CT – впрыск в противоаварийную оболочку	2
CVCS – подпитка – продувка	7
FFS – противопожарная	1
FW – питательная вода	27
FWHD – дренажи подогревателей питательной воды	1

Рисунок 2. Число случаев с ГУ, имевшее место на реакторах PWR[6]

Как следует из приведенных данных наибольшее количество ГУ наблюдалось в системе парогенераторной установки (включая непосредственно парогенератор (ПГ); системы основной и вспомогательной питательной воды ПГ, а также система продувки ПГ). Относительный вклад количества ГУ в системах парогенераторной установки PWR к общему их количеству в системах ЯЭУ составляет более 60%. Имеются также сведения об измерении интенсивности ГУ в питательном трубопроводе французской АЭС Tihange [7]. Конденсационные ГУ в питательной линии отмечались и на отечественных АЭС с горизонтальными ПГ [10].

Проведенный в работе ОКБ «Гидропресс» [10] анализ возможности возникновения ГУ в 1-м контуре ЯЭУ с реакторами типа ВВЭР показал, что при нормальной эксплуатации (когда параметры теплоносителя первого контура не выходят за проектные пределы) в первом контуре нет условий для возникновения конденсационного ГУ. Рассмотренные в [10] случаи нарушения нормальной эксплуатации и аварий со снижением давления показали, что возможность появления конденсационных ГУ в проектах РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 исключена. Возможен лишь «классический» ГУ с небольшой интенсивностью при мгновенном заклинивании главного циркуляционного насоса (ГЦН).

Анализ представленных выше известных результатов опыта эксплуатации и моделирования ГУ в оборудовании и трубопроводах ЯЭУ с реакторами под давлением (PWR/ВВЭР) позволяет сделать следующие выводы:

1. Дополнительного исследования требует анализ условий и последствий ГУ в реакторном контуре, вызванных различными видами ТГН в нормальных условиях и при нарушении нормальных условий эксплуатации.

При **нормальных условиях эксплуатации** причины возникновения ГУ в реакторном контуре могут также быть вызваны:

- термоакустической неустойчивостью (ТАН) при поверхностном (недогретом) кипении теплоносителя в активной зоне реактора [12];

- колебательной гидродинамической неустойчивостью теплоносителя, связанной с инерционностью напорно-расходной характеристики ГЦН [14];

- резонансными эффектами в переходных режимах пуска/остановка реактора [15] и другие.

В частности, возникновение ТАН сопровождается высокоамплитудными (до 50% от среднего давления) и высокочастотными (порядка частоты прохождения звуковой волны) колебаниями давления теплоносителя и ГУ, которые могут приводить к повреждению/искривлению оболочек

ТВЭЛ. На основе разработанного в [12] расчетно-экспериментального метода определения границ областей ТАН установлено, что термоакустические колебания возможны в переходных режимах реактора и при работе реактора на повышенной мощности. Возникающие условия ТАН можно классифицировать как один из видов конденсационных ГУ.

При **нарушениях нормальной эксплуатации** или **аварийных режимах** причины возникновения ГУ в реакторном контуре, могут также быть вызваны:

- низкочастотной колебательной гидродинамической неустойчивостью при авариях с течами реакторного контура, обусловленной инерционностью тепломассообменных процессов в двухфазных потоках [13];

- колебательной гидродинамической неустойчивостью, связанной с инерционностью напорно-расходной характеристики насосов активной части систем аварийного охлаждения реактора [14] и другими видами ТГН теплоносителя.

2. В отчетах по анализу безопасности украинских АЭС с ВВЭР при детерминистском моделировании аварий вопросы условий и последствий возможных ГУ не рассматриваются. Вместе с тем, возможные ГУ могут быть как исходным аварийным событием, так и вследствие развития аварийных процессов с переходом проектных аварий в статус запроектных аварий с множественными отказами систем, важных для безопасности.

3. По опыту эксплуатации АЭС с PWR наибольшее количество зарегистрированных ГУ связано с парогенераторной установкой. Поэтому, повышенную актуальность в отношении учета возможных ГУ имеют аварийные события, связанные с парогенераторной установкой. В качестве такого обобщающего исходного аварийного события может быть детерминистское моделирование запроектной аварии при межконтурных течах с множественными отказами, вызванными ГУ:

- отказ на закрытие арматуры систем основной питательной подпитки ПГ вследствие ГУ, вызванных инерционностью напорно-расходной характеристики насосов и/или ускоренным закрытием клапаном арматуры;

- отказ системы аварийной подпитки ПГ, вследствие ГУ вызванного инерционностью напорно-расходной характеристики аварийных насосов;

- отказ быстродействующего запорно-отсечного клапана (БЗОК) вследствие ГУ, вызванных ускоренным закрытием клапана и/или «скачками уплотнения» при аварийном переполнении ПГ.

**Выводы**

1. Проведенный обзорный анализ известных подходов моделирования гидродинамических ударов на оборудование и элементы трубопроводов систем, важных для безопасности ядерных энергетических установок в нормальных условиях эксплуатации, при нарушениях нормальных условий и в аварийных режимах, определил необходимость усовершенствования и разработки методов моделирования условий возникновения и последствий гидродинамических ударов вследствие различных видов теплогидродинамической неустойчивости одно- и двухфазных потоков: колебательная неустойчивость вследствие инерционности напорно-расходной характеристики насосов и теплообменных процессов в двухфазных потоках; аperiodическая неустойчивость вследствие импульсного увеличения локального гидравлического сопротивления и трансзвуковых режимов течения одно- и двухфазных потоков, а также других видов теплогидродинамической неустойчивости.

2. При моделировании условий и последствий

гидродинамических ударов необходимо учитывать, что основным определяющим параметром гидроударов является скорость роста импульса давления при переходе кинетической энергии торможения потока в энергию импульса гидроудара. При этом также необходимо учитывать возможность одновременной или последовательной реализации разных видов гидродинамических ударов.

3. При моделировании и анализе аварий на ядерных энергетических установках необходимо учитывать возможность возникновения гидродинамических ударов и как исходное аварийное событие, и как вследствие развития аварийных процессов с переходом проектных аварий в статус запроектных аварий с множественными отказами. Анализ опыта эксплуатации по статистике зарегистрированных гидродинамических ударов определяет приоритетность моделирования и анализа запроектной аварии с межконтурными течами в парогенераторах ядерных энергетических установок с учетом различных видов гидродинамических ударов вследствие теплогидродинамической неустойчивости.

**Список использованной литературы**

1. Hemmat H. Safwat, Asif H. Arustu and Syed M. Husaini Systematic methodology for diagnosis of water hammer in LWP power plants. Nucl. Eng. And Design 122, 1990, pp. 365-376.
2. Screening Reactor Steam/Water Piping Systems for Water Hammer. NUREG/CR-6519, 1997.
3. R.W. Bjorge, P. Griffith. Возникновение гидравлического удара в горизонтальных и практически горизонтальных трубах с паром и недогретой водой. Теплопередача, 1984, т. 106, №4, издательство «Мир».
4. S.C. Lee, S.G. Bankoff. Устойчивость пароводяного потока в наклонном канале. Часть II. Конденсационный гидравлический удар. Теплопередача, 1984, т. 106, №4, издательство «Мир».
5. H.-M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau, G. Baranyai and Gy Ezsol. Thermal effects during condensation induced water hammer behind fast acting valves in pipelines. 11th International conference on Nuclear Engineering, Tokyo, JAPAN, April 20-23, 2003, ICONE11-36310.
6. Van Duyn D.A., W. Yow, J.W. Sabin, Water Hammer Prevention, Mitigation and Accommodation. Volume 1: Plant Water Hammer Experience. EPRI Report NP-6766, July 1992.
7. J.A. Block. Condensation-driven fluid motions. Int. Journal on Multiphase Flow, vol. 6, 1980, pp. 113-129.
8. Дж. Делайе, М. Гио, М. Ратмюллер. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. Москва, Энергоатомиздат, 1984.
9. S. Savolainen, S. Katajala, B. Elsing, P. Nurkkala, J. Hoikka, J. Pullinen, S.A. Logvinov, N.B. Trunov, Yu. K. Sitnik. Condensation driven water hammer studies for feed water distribution pipe. Fourth International Seminar on Horizontal Steam Generators, 11-13 March 1997, Lappeenranta, Finland.
10. Безруков А.Ю., Лисенков Е.А., Селезнев А.В. Анализ возможности гидроударов в первом контуре реакторов ВВЭР//«МНТК-2009». – ОАО ОКБ «Гидропресс». – Подольск.-2009г.
11. Ghidaoui M. S. et al. A review of water hammer theory and practice //Applied Mechanics Reviews. – 2005. – Т. 58. – №. 1. – С. 49-76.
12. Коврижкин Ю.Л., Скалозубов В.И. Термоакустическая неустойчивость теплоносителя в активной фазе ВВЭР. – Одесса: ТЭС. –2003 г. – 172 с.
13. Герлига В.А., Хабенский В.Б. Нестабильность потока теплоносителя в энергооборудовании АЭС. – М.:Атомэнергоиздат, 1994 г. – 288 с.
14. Hydrodynamic Impacts in Pipeline Systems Piston Pumps as a Consequence of Oscillatory Instability//V.I. Skalozubov, A.S. Mazurenko, O.A. Chulkin, D.S. Pirkovskiy – Problem Energetici i Regionale N Electroenergetica.
15. Korolev A.V., Zhou Hui Yu. Dynamic Damper Pressure Fluctuation in the Pumping Systems.//Pratsi OPU.-Issue 1(48) -2016, pp. 35-41.

*Получено 09.02.2018*

УДК :[574.586:62-757.7]:658.265

А. А. Протасов, И. А. Морозовская, Н. Н. Ласковенко

Институт гидробиологии НАН Украины, г. Киев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СУБСТРАТОВ В МОНИТОРИНГЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОМЕХ В РАБОТЕ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИИ НЕОБРАСТАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Приведены результаты исследований зооперифитона на экспериментальных субстратах в условиях различных водоемов, включая водоемы-охладители АЭС и ТЭС. Рассмотрены процессы формирования сообществ на экспериментальных субстратах и методические приемы в использовании экспериментальных субстратов для гидробиологического мониторинга.

**Ключевые слова:** зооперифитон, обрастание, экспериментальные субстраты, водоем-охладитель.

Перифитон (обрастание) – это совокупность организмов, обитающих на разделе жидкой (вода) и твердой (субстраты различной природы) фаз. Сообщества этих организмов формируются как из подвижных, так и прикрепленных форм. Развитие обрастания наносит большой вред деятельности человека в различных сферах, связанных с использованием [1–7]. В силу того, что в основе проблемы формирования обрастания лежит развитие живых организмов в тех или иных условиях, меры по ограничению обрастания должны учитывать биологические особенности организмов-обрастателей, периодичность их жизненных циклов. Мониторинг развития обрастания непосредственно в системах водоснабжения, как правило, затруднен из-за малой доступности. Использование экспериментальных субстратов (ЭС) позволяет получать гидробиологическое сообщество-аналог вне систем водоснабжения, проводить анализ состава, динамики и обилия. Одно из направлений в разработке мер по ограничению обрастания – это использование специальных необрастающих покрытий, которые могут применяться на различных субстратах, в тех или иных системах водоснабжения, при покраске теплообменных поверхностей. Они могут применяться в сочетании с антикоррозионными покрытиями. Тест на эффективность покрытий целесообразно проводить на контрольных экспериментальных субстратах. Мониторинг влияния АЭС на окружающую среду и гидробионтов, в частности, на организмы сообществ перифитона необходимо проводить в динамике. Эти задачи могут успешно решаться при помощи методов экспериментальных субстратов [8, 9].

**Материалы и методы исследований.** Исследования динамики обрастания на экспериментальных субстратах (прямоугольные пластины размером 8,0×2,6 см, закрепленные на специальном погруженном в воду стенде – фото 1), проводились в нижней части Киевского водохранилища в 2010

году, в подводном канале водоема-охладителя Хмельницкой АЭС (2007-2008 гг.), на Каневском водохранилище в районе Жукова острова (2010-2014 гг.). В качестве относительно инертного материала использовали пластины из нержавеющей стали (НС) и винипласта. Также применяли субстраты из оцинкованной стали (ОС).

Были испытаны на предмет защиты от обрастания некоторые составы, разработанные в Институте химии высокомолекулярных соединений НАНУ. На Каневском водохранилище использовались: модифицированная полиуретановая эмаль (ЭМПУ), ОС+ЭМПУ, полиуретановый (ПУ) лак УР-167, полиуретановая эмаль (ПУЭ)+хром+антисептик, ПУ-лак УР-167+цинк+антисептик1234, ПУ-лак УР167+цинк, ПУЭ+хром, ПУЭ+цинк. На водоем-охладителе Хмельницкой АЭС выставляли пластины из нержавеющей стали без покрытия. На Киевском водохранилище пластины были из нержавеющей стали, винипласта, оцинкованной стали, а также с покрытием НС+ЭМПУ+Si. Отбор проб на водоем-охладителе ХАЭС осуществлялся водолазами. На Каневском и на Киевском водохранилищах пробы отбирали при кратковременном подъеме стенов из воды [9].



Фото 1. Общий вид установки для экспонирования субстратов в воде на Каневском водохранилище, дата установки стенда 5.06.2014

**Результаты исследований.** На Киевском водохранилище проводили исследования с целью оценки эффективности ограничения обрастания на экспериментальных субстратах с различным составом полимерного покрытия, а также исследования динамики развития сообществ (таблица 1).

Было отмечено, что при экспозиции 2,5 месяца (с 21.04.2010 по 13.07.2010) на винипласте и нержавеющей стали доминировали гидра и дрейссена [10]. В ноябре биомасса дрейссены на этих субстратах достигала  $1240 \pm 474$  г/м<sup>2</sup>, в то время как на покрытиях ЭМПУ с добавкой соединений кремния, нанесенных на стальные пластины биомасса была всего  $11 \pm 6$  г/м<sup>2</sup>. Важно отметить, что при определенном угнетении поселений дрейссены на покрытии, не было отмечено такого же действия на губок. В период исследований формировалось почти чистое дрейссенное обрастание (фото 3 А). Из двух видов дрейссены по биомассе преобладала *Dreissena polymorpha* Pall. –  $4511,0$  г/м<sup>2</sup> против показателей биомассы *Dreissena bugensis* Andr. –  $402,4$  г/м<sup>2</sup>. Так как обрастание состояло почти только из дрейссены, то и меры борьбы с обрастанием, а также разработка необрастающих покрытий, могут быть направлены на борьбу с поселением этого моллюска. На сороулавливающих решетках водозабора ГЭС было отмечено значительное обрастание, состоящее почти полностью из моллюсков-дрейсенид. Также как и на внутренних поверхностях фильтров систем воздушного охлаждения.

Исследования обрастания на Каневском водохранилище проводили с целью оценки эффективности необрастающих покрытий, а также изучения динамики формирования сообществ (таблица 2).

Динамика формирования сообществ на Каневском водохранилище была следующей. В августе пластины из винипласта были покрыты колониями мшанки. На субстратах из винипласта обрастание было достаточно неравномерным. Биомасса обрастания была  $1167,2$  г/м<sup>2</sup>, основу биомассы составляла мшанка *Plumatella fungosa* Pallas –  $1077,3$  г/м<sup>2</sup>. Также на пластинах была отмечена дрейссена –  $67,1$  г/м<sup>2</sup>. Пластины с покрытием ПУЭ+хром+антисептик и ПУ-лакУР167+цинк+антисептик были заселены организмами обрастания крайне неравномерно. Один субстрат имел 100% покрытие одного вида мшанки, второй – мощное развитие колоний двух видов, на остальных субстратах мшанки почти не было. Биомасса обрастания на этих субстратах формировалась в основном за счет мшанки *P. fungosa* (биомасса мшанки *P. fungosa* на двух субстратах была  $2272,0$  и  $2811,3$  г/м<sup>2</sup>, на субстрате ПУ-лакУР167+цинк+антисептик1234 биомассу определял и второй вид мшанки *Hyallinella punctata* Jullien –  $1793,3$  г/м<sup>2</sup>) – фото 2.



Фото 2. Общий вид экспериментальных субстратов с покрытием ПУ-лак УР-167+Zn+антисептик1234 при 57-суточной экспозиции на Каневском водохранилище, 2014 г. На одной из пластин отмечена крупная колония мшанки *Hyallinella punctata* Jullien

В конце сентября произошло отмирание мшанки, что повлияло на снижение биомассы обрастания. Наибольшая биомасса  $554,4$  г/м<sup>2</sup> была отмечена на винипласте. Доминантами были *D. polymorpha* и *P. fungosa* с биомассой  $413,0$  и  $116,3$  г/м<sup>2</sup>, соответственно. Несколько ниже была биомасса на субстрате ПУЭ+хром –  $519,1$  г/м<sup>2</sup>, но доминировала кроме дрейссены не мшанка, а губка ( $280,1$  г/м<sup>2</sup> и  $136,7$  г/м<sup>2</sup>, соответственно). В начале ноября характерным для общего габитуса экспериментальных субстратов было очень незначительное обрастание и в большей или меньшей мере присутствие на пластинах дрейссены.

Таким образом, до начала августа на пластинах формировались группировки с доминированием мшанки (фото 3 Б), которая достигала высоких значений биомассы. Но уже к концу августа – началу сентября на пластинах происходило отмирание колоний мшанки, и отмечалось формирование колоний губок, покрытие субстрата до 50%, на некоторых пластинах, кроме губок доминировала и дрейссена. В начале ноября на пластинах было очень незначительное обрастание дрейссеной, отмечены отдельные зоарии мшанки и небольшие колонии губок.

Исследования на подводном канале Хмельницкой АЭС были начаты в весенний период. Задачей при постановке ЭС было выяснение динамики формирования обрастания, при этом предполагалось, что характер динамики на ЭС близок к таковому в системах водоснабжения, куда доступ весьма затруднен.

В весенний период на экспериментальных субстратах отмечалось незначительное количество организмов (рисунок 1, экспозиция 35–40 сут). Численность и биомасса формировались в основном за счет гидр –  $86,5$ – $90,8\%$  покрытия.

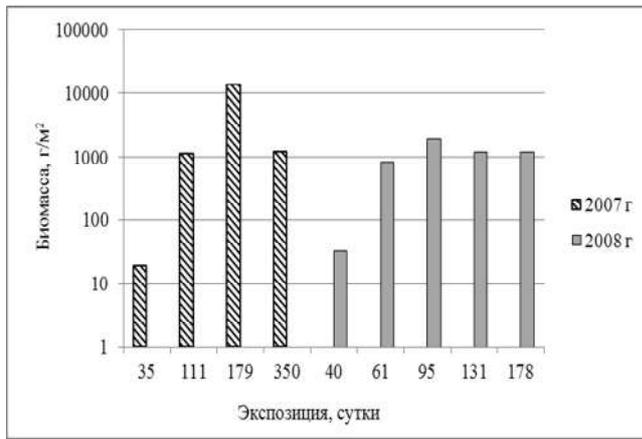


Рисунок 1. Динамика биомассы организмов перифитона на экспериментальных субстратах водоема-охладителя ХАЭС в 2007–2008 гг.

В летний период в большем количестве появлялась дрейссена (в 2007 г.) и губка (2008 г.). Происходило усложнение пространственной структуры. В 2007 г. на субстратах формировались сообщества с доминированием дрейссены, до 99% покрытия субстрата. В 2008 г. в этот же период вместо дрейссены, пластины были покрыты губкой (в отдельных случаях покрытие субстрата до 90%), толщина колонии достигала 2,0 см. На субстратах, которые были покрыты губкой, дрейссена почти полностью отсутствовала. Кроме этого, формировались сообщества с доминированием дрейссены, численность которой достигала 66,1%, а биомасса – 72,1%. В осенний период губка практически отсутствовала. По численности доминировали гидры – 80,2%, по биомассе – дрейссена (97,2%).



А



Б

Фото 3. Стенд с экспериментальными субстратами: А – Киевское водохранилище, экспозиция 210 суток (дата съемки 17.11.2010), доминирование дрейссены; Б – Каневское водохранилище, экспозиция 57 суток (дата съемки 01.08.2014), доминирование мшанки

Таблица 1. Характер обрастания ЭС при разных экспозициях на Киевском водохранилище

Начало экспозиции, дата	Время экспозиции, сут	Субстрат	Биомасса обрастания, г/м <sup>2</sup>	Характер сообщества (общий габитус, доминирующие макроформы)
13.07.2010	83	Цинк	8,8	Обрастание незначительное: гидры, велигеры и молодь дрейссены
		Винипласт	111,9	
5.10.2010	167	НС	5037,9	Скопления особей дрейссены
17.11.2010	210	Винипласт	12687,1	Массивное обрастание дрейссеной

**Обсуждение.** Исследования на Киевском водохранилище показали, что в качестве контрольного субстрата целесообразно использовать винипласт, поскольку на нем развивается наиболее интенсивное обрастание. Испытуемые покрытия показали определенные антиобрастающие свойства, однако, по мере увеличения экспозиции эти свойства ослабевали. Контроль динамики формирования обрастания показал, что обрастание формируется достаточно быстро и на экспериментальных субстратах сформировалось сообщество, сходное по составу доминантов с теми, что отмечены в системах водоснабжения.

В отличие от Киевского водохранилища, где дрейссена изначально была доминантом, на Каневском водохранилище была получена сложная динамика формирования сообществ, с доминированием как одного, так и двух видов-субэдификаторов, в частности, дрейссены и мшанки. На Хмельницкой АЭС формировались сообщества в основном с доминированием дрейссены, однако именно на экспериментальных субстратах было установлено, что губка может вытеснять прикрепленных моллюсков с субстрата. В дальнейших исследованиях это подтвердилось.

Таблица 2. Характер обрастания ЭС при разных экспозициях на Каневском водохранилище

Начало экспозиции, дата	Время экспозиции, сут	Субстрат	Биомасса обрастания, г/м <sup>2</sup>	Характер сообщества (общий габитус, доминирующие макроформы)
1.08.2014	57	Винипласт	1167,2	Слизистые комки мшанки, маленькие колонии губки, единичная дрейссена, доминант – <i>Plumatella fungosa</i> L.
		ПУЭ+хром+антисептик	2284,3	Однослойные и многослойные колонии мшанки, доминант – <i>P. fungosa</i> Pallas
		ПУ-лак УР167+цинк+антисептик1234	4613,8	Мощное развитие колоний мшанки, доминанты – <i>P. fungosa</i> и <i>Hyalinella punctata</i> Hanning
		ПУ-лакУР167+цинк	2447,0	Многослойные колонии мшанки и единичная дрейссена, доминант – <i>P. fungosa</i>
7.11.2014	156	Винипласт	290,6	Зоарии мшанки, колонии губки, друзы дрейссены, доминант
		ПУЭ+хром	949,8	Колонии губки, друзы дрейссены
7.11.2014	156	ПУЭ+цинк	324,5	Маленькие колонии губки, домики личинок двукрылых, отдельные колонии губки
		ПУЭ+хром+ антисептик	415,0	Отдельные особи дрейссены, небольшие колонии губки

### Выводы и рекомендации

Таким образом, на основании результатов исследований динамики обрастания экспериментальных субстратов в водоеме-водоисточнике, подводившем канале можно судить о процессах, которые происходят и в системах водоснабжения АЭС или ГЭС. Было выяснено, что в обрастании исследованных водных объектах имеется три основных группы беспозвоночных, которые доминируют в сообществах: дрейссена, мшанки и губки. Следует применять необрастающие покрытия, ориентированные на ограничение развития каждой из этих групп. Следует учитывать, что такие важные организмы-обрастатели как мшанки имеют быстро растущие колонии, в то же время они довольно быстро отмирают и разрушаются. Необходи-

димо учитывать роль биоценологических связей в оценках эффективности покрытия, поскольку некоторые организмы не развиваются на субстратах не из-за влияния субстрата, а из-за взаимодействия с другими организмами. Необходима разработка покрытий не только с токсичными добавками, но и имеющих малоадгезионные свойства. Такие покрытия, как ПУ-лак УР-167+цинк, ПУЭ+хром, ПУЭ+цинк можно считать наиболее перспективными, обрастания на этих субстратах были меньше чем в контроле. В качестве контрольного субстрата целесообразно использовать винипласт, поскольку на нем развивается наиболее интенсивное обрастание. Перспективным можно считать пластины из оцинкованного металла, на которых обрастание развивалось в минимальном количестве.

### Список использованной литературы

1. Биологические обрастания в системе питьевого и технического водоснабжения и меры борьбы с ними / Под ред. Г.И. Долгова. – М.: Наука, 1969. – 110 с.
2. Лебедева Г.Д. Экология обрастаний в пресных водах // Экологические основы защиты от биоповреждений. – М.: Наука, 1985. – С. 78–85.
3. Разумов А.С. Биологические обрастания в системе питьевого и технического водоснабжения и борьбы с ним. – М.: Наука, 1969. – 53 с.
4. Раилкин А. И. Колонизация твердых тел бентосными организмами. – СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2008. – 427 с.
5. Шиманский Б.А. Биологические помехи в эксплуатации систем технического водоснабжения тепловых электростанций и методы борьбы с ними // Гидробиол. журн. – 1968. – Т. 4, № 3. – С. 93–94.
6. Smith A.L., Muya R.A. Identify and control microbiological organisms in cooling Water systems // Power. – 1973. – Vol. 117, N 7. – P. 17–19, 91–93.
7. Морозовская И.А., Протасов А.А. Зооперифитон и обрастание в водоемах-охладителях атомных и тепловых электростанций. – Ядерная энергетика та довкілля. – 2013. – № 2. – С. 55–58.
8. Протасов А.А. Пресноводный перифитон / А.А. Протасов. – К.: Наук. Думка, 1994. – 307 с.
9. Методи гідробіологічних досліджень поверхневих

вод. Киев: Логос. – 2006. – С. 408

журн. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 88–99.

10. Протасов А.А., Гурьянова Г.А., Силаева А.А., Ласковенко Н.Н. Динамика зооперифитона на экспериментальных субстратах в условиях приплотинного участка Киевского водохранилища // Гидробиол.

*Получено 15.02.2018*

Работа выполнена при поддержке МОН Украины, проект М/22–2018 совместного Украинско-Белорусского сотрудничества.

УДК 556.012(581.526.325:556.113)(574.63)

Т. Н. Новоселова<sup>1</sup>, А. В. Голод<sup>2</sup>, А. В. Левицкий<sup>2</sup>, А. А. Протасов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт гидробиологии НАН Украины, г. Киев<sup>2</sup>ОП «Хмельницька АЭС»

## КОНТРОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ АЭС НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ПО ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ

Представлены результаты многолетних исследований прозрачности воды (по диску Секки) в водоеме-охладителе АЭС. Исходя из величин прозрачности воды, на основании установленных ранее зависимостей рассчитана биомасса фитопланктона. На основе изучения динамики биомассы фитопланктона сделан вывод о постепенной эвтрофикации водоема, связанной с поступлением биогенных веществ из внешних источников и внутриводоемными процессами. Методика определения прозрачности вод по диску Секки рекомендована для экологического мониторинга водоемов-охладителей АЭС.

**Ключевые слова:** водоем-охладитель АЭС, эвтрофикация, фитопланктон, прозрачность воды, диск Секки, биогенные элементы.

Экологический мониторинг водных объектов техноэкосистемы Хмельницкой АЭС проводится с 1989 года силами сотрудников отдела охраны окружающей среды (ОООС) ОП ХАЭС.

Мониторинг базируется на «Регламенті контролю складу і властивостей поверхневих, підземних і стічних вод ВП «Хмельницька АЕС» [1] и других документах.

Согласно «Регламенту ...» периодически осуществляются измерения гидрохимических и гидрофизических параметров водной среды, в том числе прозрачности воды. В методике [2], применяемой для проведения экологического мониторинга на водоемах в районе расположения АЭС используется метод определения прозрачности по шрифту, который не является чувствительным при низкой мутности (высокой прозрачности воды).

**Материалы и методы исследований.** Стандартные измерения ряда гидрохимических и гидрофизических параметров, проводимые на водных объектах техноэкосистемы ХАЭС, включают в себя, в частности, определение содержания нитратов и фосфатов. Начиная с 2013 г. сотрудниками эколого-химической лаборатории (ЭХЛ) ОООС дополнительно к стандартным, проводились измерения прозрачности воды в водоеме-охладителе (ВО) ХАЭС с помощью диска Секки [3] в районе выхода подводящего канала. В период с 2013 по 2017 гг. было осуществлено пять гидробиологических съемок на ВО ХАЭС, даты которых не совпадали с датами мониторинга прозрачности. Пробы фитопланктона отбирали на нескольких станциях на акватории ВО, в том числе и на станции, где проводился мониторинг показателя прозрачности воды. Отбор, консервирование и обработка проб осуществлялись общепринятыми методами [4].

**Результаты исследований.** Прозрачность во-

ды в период исследований 2013–2017 гг. изменялась в широком диапазоне (1,4–4,8 м). Максимальные значения регистрировались в холодное время года, минимальные – в конце лета – начале осени (рисунок 1).

Если на рисунке 1 ограничить графическое изображение динамики прозрачности линиями, опирающимися сверху на пики максимальных значений, а снизу – на пики минимальных, то можно наблюдать уменьшение прозрачности в период с 2013 г. по 2017 г. приблизительно на 0,5 м в диапазонах и верхних и нижних значений. Особенно четко эта тенденция видна, если динамику минимальных значений рассмотреть отдельно (рисунок 2). Тенденция снижения показателя прозрачности такова, что в 2017 г он стал меньше значения 1,5 м, которое соответствует границе между категориями качества воды [5]

Постепенное снижение прозрачности указывает на переход в 2017 г. показателей качества воды в ВО по этому показателю из категории 1, I класса «очень чистые» в категорию 2 II класса «чистые» воды [5].

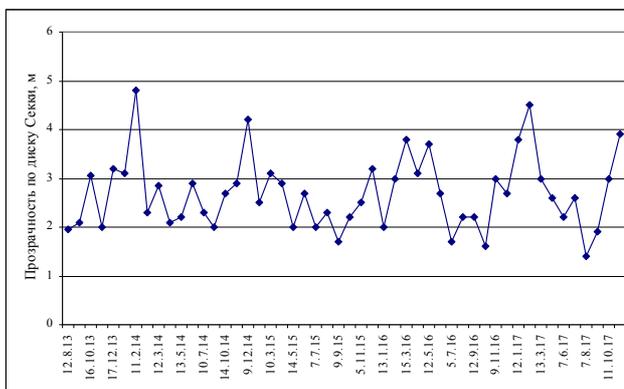


Рисунок 1. Динамика прозрачности воды ВО ХАЭС по диску Секки в 2013–2017 гг.

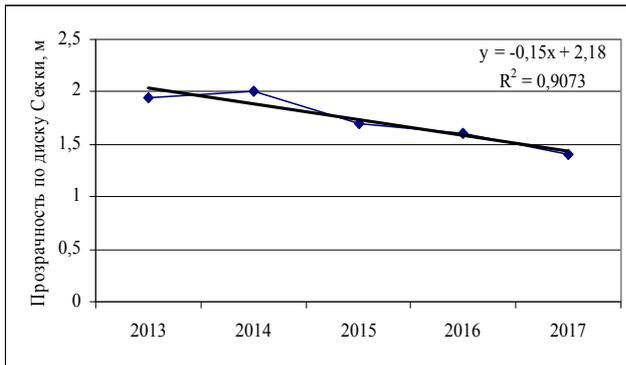


Рисунок 2 Динамика минимальных в течение года значений прозрачности воды ВО ХАЭС по диску Секки в 2013–2017 гг. Пунктирной линией обозначена граница между первой (сверху от пунктира) и второй категорией качества вод по [5]

Такая тенденция изменения прозрачности может свидетельствовать об определенных процессах эвтрофирования, происходящих в водоеме, поскольку категории качества воды соответствуют: первая – «олиготрофным олигомезотрофным», вторая – «мезотрофным» водам.

Как было отмечено нами [6], мутность воды в данном водоеме, соответственно, и прозрачность воды непосредственно связаны с обилием фитопланктона согласно полученной зависимости:

$$y = -0,2721 \ln(x) + 2,1398 \quad (1)$$

где  $y$  – прозрачность по диску Секки,  $x$  – биомасса фитопланктона в точке измерения прозрачности, [6].

Используя эту зависимость можно на основании данных по прозрачности воды с некоторыми допущениями рассчитать биомассу фитопланктона в период определения прозрачности (рис. 3). Для вычисления биомассы фитопланктона была использована степенная функция, которая следует из вышеприведенной зависимости (1):

$$y = 14,536 * x^{-3,6812} \quad (2)$$

где  $y$  – биомасса фитопланктона в точке измерения прозрачности,  $x$  – прозрачность по диску Секки.

По расчетным данным биомасса фитопланктона в 2013–2017 гг. изменялась в диапазоне от 0,045 до 4,212 мг/дм<sup>3</sup>. В разные годы минимальные значения наблюдались с октября по март, максимальные – с августа по ноябрь (рис. 3). По результатам гидробиологических исследований биомасса фитопланктона в 2013–2017 гг. в точке проведения мониторинга прозрачности составляла 0,11–3,37 мг/дм<sup>3</sup>.

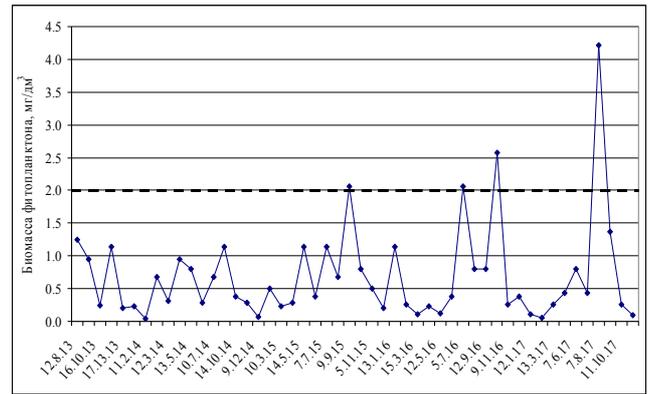


Рисунок 3. Динамика биомассы фитопланктона, восстановленной по значениям прозрачности воды ВО ХАЭС в 2013–2017 гг. Пунктирной линией обозначена граница между третьей (ниже пунктира) и четвертой категорией качества вод по [5]

Диапазоны колебаний биомассы, рассчитанной по показателям прозрачности, и биомассы фитопланктона, полученной в результате обработки альгологических проб, довольно близки. Однако, показатели рассчитанной биомассы в 2013 и 2014 гг. были несколько ниже, в 2015 и 2016 гг. – несколько выше, а в 2017 г. совпадали с реальной биомассой.

Анализ натурных данных по фитопланктону ВО ХАЭС за 2012–2017 гг. позволяет предположить, что пики биомассы, приходящиеся на сентябрь – ноябрь (2013, 2015 и 2016 гг.) вероятнее всего были обусловлены развитием диатомовых водорослей, преимущественно *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen. Во время экспедиционного выезда в начале сентября 2014 г. по всей акватории водоема доминировал *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing (цианобактерии) и логично предположить, что эта же водоросль составляла основу биомассы и тремя неделями ранее в середине августа, когда производились измерения прозрачности сотрудниками ЭХЛ. В августе 2017 г. в формировании биомассы основную роль, скорее всего, играли диатомовые водоросли и/или цианобактерии.

По полученным расчетным данным биомассы фитопланктона качество воды в ВО по этому показателю изменялось в диапазоне от 1 категории I класса «очень чистые» до 4 категории III класса «слабо загрязненные» воды. Пиковые значения биомассы в 2013 и 2014 гг. соответствовали 3 категории II класса «достаточно чистые», а с 2015 по 2017 гг. – 4 категории III класса «слабо загрязненные» воды [5]. Согласно результатам гидробиологических исследований, которые проводятся на ВО ХАЭС с 1998 г., уровень максимальных значений биомассы фитопланктона подобный тому, который по нашим расчетным данным наблюдался в 2015–2017 гг., был зарегистрирован в 2001 г. в

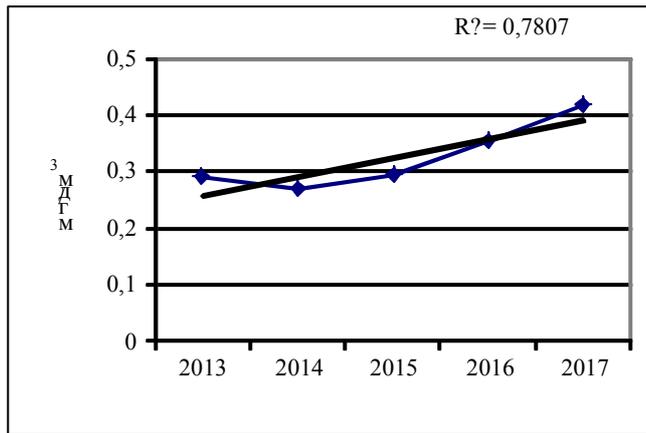
период работы одного энергоблока [7, 8].

Следует отметить, что оценка качества воды ВО по рассчитанной нами биомассе фитопланктона, вполне совпадала с оценкой по комплексу гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических показателей, сделанной ранее [9].

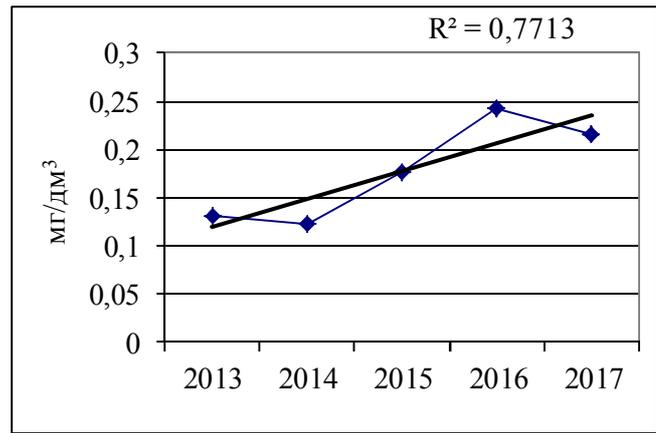
Формально можно констатировать, что качество воды сохранялось на достаточно высоком уровне, однако, отмеченная тенденция заставляет обратить внимание на существующие процессы возрастания трофности, то есть снижения качества воды. Причины этого могут быть в возрастании

поступления в водоем биогенных веществ.

Так, за исследованный период среднегодовые показатели концентрации азота нитратов и фосфора фосфатов в водоеме-охладителе достоверно увеличивались (рисунок 4). По концентрации азота в 2016 г. качество воды ВО из 2 категории «чистые» перешло в 3 категорию «достаточно чистые» в пределах II класса, по концентрации фосфора – из 5 категории «умеренно загрязненные» III класса – в 6 категорию «грязные» воды IV класса.



А



Б

Рисунок 4. Динамика среднегодовых показателей концентрации азота нитратов (А) и фосфора фосфатов (Б) в воде ВО ХАЭС в 2013–2017 гг. Пунктирной линией обозначена граница между второй и третьей (А) и пятой и шестой (Б) категорией качества вод по [5]

Основными источниками биогенных элементов для ВО являются очистные сооружения, сток которых сбрасывается в отводящий канал, и р. Гнилой Рог, впадающая в ВО (таблица 1).

Таблица 1. Объем вод, поступающих в ВО с очистных сооружений и р. Гнилой Рог, и поступление азота нитратов и фосфора фосфатов в ВО

Среднегодовые показатели	2013	2014	2015	2016	2017
Очистные сооружения					
Объем вод, млн. м³/год	4,44	4,34	3,66	3,31	3,42
Азот нитратов, т/год	53,03	48,68	40,48	43,34	57,42
Фосфор фосфатов, т/год	12,59	11,34	8,08	10,51	11,47
р. Гнилой Рог					
Объем вод, млн. м³/год	27,94	17,35	9,82	9,85	10,97
Азот нитратов, т/год	32,41	6,49	4,60	8,30	9,47
Фосфор фосфатов т/год	0,55	0,56	0,43	0,25	0,34

В исследуемый период количество азота нитратов, попадающего в водоем со сточными водами, изменялось в пределах от 40,48 до 57,42 тонн в год, фосфора фосфатов – от 8,08 до 12,59 тонн в год. Межгодовая динамика сбросов этих ионов была подобной: с 2013 по 2015 гг. наблюдалось снижение, а с 2015 по 2017 – рост (табл. 1). ледует отметить, что динамика поступления воды в ВО с очистных сооружений в промежутке 2015–2017 гг. не совпадала с динамикой поступления азота и фосфора (табл. 1). В целом поступление нитрат- и фосфат-ионов с очистных сооружений не зависело от величины стока с очистных сооружений. Коэффициенты корреляции между этими гидрохимическими показателями и общим объемом стока не достигали значимых величин:  $r=0,22$  для азота и  $r=0,48$  для фосфора. Основным определяющим фактором была концентрация азота и фосфора в сбрасываемых водах.

Количество азота нитратов и фосфора фосфатов, поступающее в ВО со стоком р. Гнилой Рог в 2013–2017 гг., изменялось в широком диапазоне: от 4,60 до 32,41 тонн в год – нитрат-ионы и от 0,25 до 0,56 тонн в год – фосфат-ионы. Поступление

азота нитратов було связано с водністю реки положительной линейной зависмостью ( $r = 0,90$ ). Экстремумы динамики стока реки и привносимого фосфора фосфатов не совпадали по времени, однако, корреляция между этими показателями была достаточно высокой ( $r = 0,75$ ).

**Обсуждение результатов.** В ВО ХАЭС за период с 2013 по 2017 гг. наблюдалось уменьшение прозрачности воды как в диапазонах минимальных, так и максимальных значений, которое составляло около 0,5 м. В этот период увеличение биомассы фитопланктона, рассчитанной исходя из величин прозрачности воды, происходило на фоне роста внутригодовых колебаний биомассы относительно ее средних значений. Такие процессы свидетельствуют о постепенном эвтрофировании водоема и возможном ухудшении качества воды и экологического состояния в целом. Основной причиной повышения трофности в ВО служит, вероятно, увеличение биогенной нагрузки в основном за счет поступления нитрат- и фосфат-ионов со стоком с очистных сооружений. Общая картина эвтрофикации, которую можно наблюдать по изменению прозрачности воды, определяется схемой, при которой увеличивающаяся нагрузка на водоем биогенными элементами приводит к росту биомас-

сы фитопланктона, а это, в свою очередь, к уменьшению прозрачности воды.

**Заклучение.** Применение в экологическом мониторинге ВО ХАЭС недорогого и нетрудоемкого метода определения одного из важных гидрофизических параметров – мутности воды, определяемой по диску Секки [3], позволило выявить направленность и тенденцию экологических процессов, происходящих в водоеме, а также процессов формирования качества воды. Практический вывод состоит в том, что необходимо внедрить данный метод определения прозрачности воды на всех контролируемых водных объектах атомной энергетики Украины. В качестве ограничения применения метода можно указать на то, что в точке измерения должна быть достаточно большая глубина, не менее 3–4 м, поскольку в холодное время года показатели прозрачности могут быть высокими, хотя, измерение прозрачности воды в теплое время года имеет большее значение для мониторинга. Измерения с плавсредств не всегда выполнимы, поэтому возможно обустройство специальных мостков, с обязательным учетом того, что в данном месте не должно быть влияния каких-либо процессов взмучивания.

### Список использованной литературы

1. Регламент контролю складу і властивостей поверхневих, підземних і стічних вод ВП «Хмельницька АЕС» №0.ЛО.2691.ІЭ-15. – Нетішин, 2015. – 32 с.
2. СЭВ Унифицированные методы исследования качества воды ч.1. М. 1987, стр. 750-752. Прозрачность. Определение с помощью шрифта.
3. Національний стандарт України. Визначання каламутності (ISO 7027:1999, IDT) ДСТУ ISO 7027:2003. — Київ: Держспоживстандарт України, 2004.
4. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод. Киев: Логос, 2006. – 408 с.
5. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. – К.: Символ-Т, 1998. – 28 с.
6. Протасов А.А., Новоселова Т.Н. Взаимосвязь между показателями прозрачности воды и развитием водорослей планктона в водоеме-охладителе Хмельницкой АЭС// Ядерна енергетика та довкілля. – 2015, №1 (5). – С. 50–52
7. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки [А. А. Протасов, В. П. Семенченко, А. А. Силаева и др.] ; под ред. А. А. Протасова. — Киев: Ин-т гидробиологии НАН Украины, 2011. – 234 с.
8. Протасов А.А., Силаева А.А., Новоселова Т.Н., Громова Ю.Ф., Морозовская И.А., Степанова Т.И. Техноэкосистема АЭС: 18 лет гидробиологических наблюдений // Journ. of Siberian Federal University. – 2017. – Biology. – Vol. 10, N 3. – P. [в печати].
9. Protasov A., Sylaieva A., Novosolova T., Stepanova T. New approaches to assessment of the ecological and technical potential of aquatic technoecosystems, using the principles of the Water Framework Directive EU. – Proceed. V Intern. Scientific and Technical Conf. «Pure water. Fundamental, applied and industrial aspects», 26–27 Oct., 2017. – Kyiv, 2017. – P. 48–50..

Получено 09.02.2018

Робота виконана при підтримці МОН України, проект М/22–2018 спільного Українсько-Білоруського співробітництва.

УДК 574.5+621.311.22

В. А. Яковенко<sup>1</sup>, А. А. Силаева<sup>2</sup>, А. А. Протасов<sup>2</sup><sup>1</sup> Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара<sup>2</sup> Інститут гідробіології НАН України, г. Київ**ИНВАЗИВНЫЕ БРЮХОНОГИЕ МОЛЛЮСКИ В ТЕХНОЭКОСИСТЕМЕ ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС**

Рассмотрены вопросы, связанные с вселением и развитием инвазивных видов брюхоногих моллюсков *Melanooides tuberculata* (Müller, 1774) и *Tarebia granifera* (Lamarck, 1822) в водных объектах техноэкосистемы АЭС. Обсуждается вопрос роли видов-инвайдеров в техноэкосистемах.

**Ключевые слова:** Запорожская АЭС, водоем-охладитель, инвазивные моллюски, зообентос, зооперифитон, *Melanooides tuberculata*, *Tarebia granifera*.

**Вступление.** Надежность и безопасность работы оборудования атомных и тепловых электростанций, связанного с использованием воды как естественных, так и специально созданных водоемов, определяется, кроме технических, также различными экологическими факторами.

Практически все обитатели водоемов-охладителей (ВО), других технических водоемов, в своей жизнедеятельности испытывают прямое или опосредованное воздействие самых различных техногенных факторов. С другой стороны, большая часть популяций водных организмов в той или иной мере (в некоторых случаях – крайне значительно) могут выступать агентами возникновения биологических помех в работе технических систем электростанций [1].

Каждый из блоков или участков техноэкосистемы характеризуется своеобразными условиями, которые определяют наличие здесь биоценозов различных организмов, приспособленных к этим условиям. Часть из этих организмов оказывает негативное воздействие на работу систем водоснабжения, однако развитие их происходит не изолированно, поскольку они объединены биоценотическими связями в сообществах. В связи с этим, причины формирования локальных биологических помех следует искать в функционировании всей системы в целом.

Формирование сообществ перифитонных организмов (обрастание) на различных субстратах в водозаборных сооружениях и водоводах, снижает эффективность их работы [2]. Для техноэкосистем АЭС и ТЭС эта проблема имеет особенное значение, поскольку наличие подогрева в таких водоемах создает благоприятные условия для интенсивного развития многих видов гидробионтов, в том числе субтропического и тропического происхождения [3–5]. На протяжении 2000–2008 гг. в разных странах мира произошло около 40 аварийных остановок ядерных энергоблоков в результате проблем с поступлением охлаждающей воды, большинство причин имело именно биогенную при-

роду [6].

В настоящее время вселение новых видов в различные водоемы происходит постоянно. Распространение вида за пределы его ареала (инвазивный процесс) важен в связи с тем, что многие из чужеродных (инвазивных) видов, изменяя структуру биоценозов, могут оказывать негативное влияние на деятельность человека, в частности, создавать биопомехи в работе различных технических систем.

Одной из причин вселения, в частности экзотических моллюсков, в водоемы может являться аквариумистика – при попадании гидробионтов с водой или грунтом из любительских, демонстрационных и исследовательских аквариумов. При этом, наиболее теплолюбивые виды, вероятно, способны выживать в зимний период в технических водоемах на участках влияния подогретых вод.

В водных объектах техноэкосистем АЭС и ТЭС Украины наиболее распространенным видом, вызывающим наибольшие биопомехи является дрейссена [3, 7]. Эти моллюски каспийского происхождения уже широко распространились в водоемах Европы и Северной Америки. Однако, список инвазивных видов, первичные ареалы которых находятся за пределами Украины, достаточно велик. Например, в ВО Хмельницкой АЭС обнаружено около 20 видов вселенцев [7]. Одним из видов-вселенцев в водоемы Украины, том числе и в ВО, стал тропический брюхоногий моллюск сем. Thiaridae *Melanooides tuberculata* (Müller, 1774) [8–12]. В 2006 г. в плавневой части р. Молочная был обнаружен второй вид этого семейства – *Tarebia granifera* (Lamarck, 1822) [13], а несколько позднее – в ВО Запорожской АЭС [14]. В настоящее время эти моллюски уже широко распространены в водоемах Южной, Центральной и Северной Америки, в водоемах юга Европы [8, 15, 16 и др.].

**Материалы и методы исследований.** Исследования беспозвоночных бентоса и перифитона техноэкосистемы Запорожской АЭС (ЗАЭС) про-

водили в сентябре (водоем-охладитель) и октябре (технические объекты) 2017 г., в марте 2018 г. При исследовании уровня развития моллюсков-тиарид особое внимание было уделено техногенным твердым субстратам – бетонным откосам подводного канала (ПК), внутренним поверхностям трубопроводов, бетонной поверхности аванкамеры градирни. Также исследовали природные субстраты, в частности, стебли тростника, который вегетировал в ПК до глубины 0,6–0,7 м, с шириной полосы зарослей 10 и более метров. Температура в осенний период в технических объектах была достаточно высокой (в градирне более 35°, в трубопроводе 24–30°C), в ПК – 19°. В фоновом водном объекте (Каховское водохранилище) – около 12°C.

В техноэкосистему ЗАЭС входит водоем-охладитель, подводный и отводящий каналы, системы водоснабжения АЭС, связанные с водоисточником – Каховским водохранилищем. Источником подпитки системы циркуляционного водоснабжения ЗАЭС является отработанная вода из сбросного канала Запорожской ТЭС, а также технический водозабор из Каховского водохранилища.

Особенностью системы охлаждения является то, что часть воды из отводящего канала поступает непосредственно в подводный канал через брызгальные устройства. Часть сбросной подогретой воды из отводящего канала попадает в ВО через два струераспределительных устройства. ВО ЗАЭС эксплуатируется в режиме практически постоянной продувки (9 мес.) с водовыпуском в Каховское водохранилище.

В 2015 г. в ВО ЗАЭС были зафиксированы два вида пресноводных моллюсков *M. tuberculata* и *T. granifera* [12, 13]. (фото 1). Ареал тиарид весьма обширен, их можно встретить практически во всей Африке – от Марокко до Мадагаскара, в Азии – от Турции до Малайзии, а также в Австралии. Естественное расселение моллюсков в водоемы может происходить, вероятно, за счет птиц. В естественных условиях в пределах своего ареала они населяют небольшие водоемы со слабым течением, обитают преимущественно в литоральной зоне на глубине до 1 м, иногда встречаются и на глубине до 3–4 м. Тиариды предпочитают мягкие грунты, состоящие из смеси ила, песка, глинистых наносов. Моллюски могут образовывать достаточно плотные поселения (до 20–35 тыс. экз/м<sup>2</sup>) как на дне, так и на подводных частях макрофитов [17]. Они способны активно перемещаться по поверхности дна и углубляться в его толщу. Основу пищевого рациона тиарид составляют водоросли (преимущественно диатомовые), полуразложившаяся органика и пр., то есть эти виды являются типичными собирателями-детритофагами.

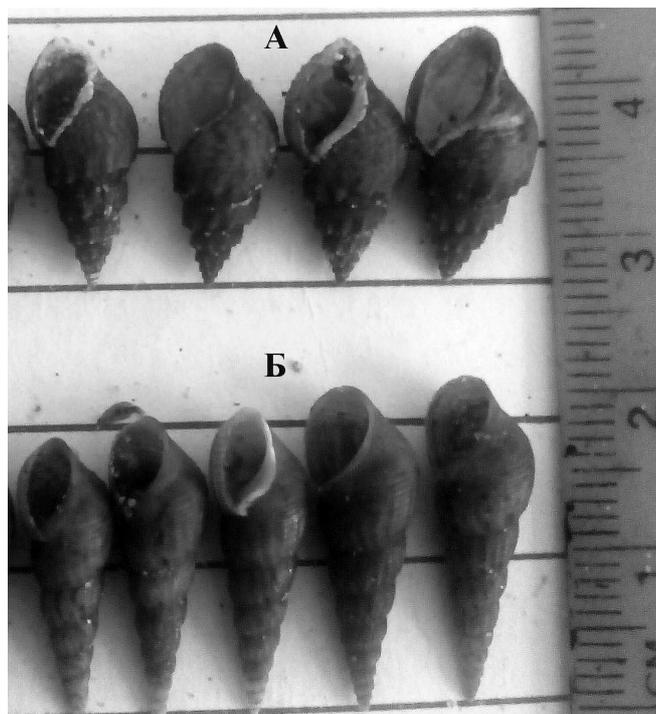


Фото 1. Брюхоногие моллюски-тиариды, обитающие в техноэкосистеме ЗАЭС, октябрь 2017 г. А – *Tarebia granifera*, Б – *Melanoides tuberculata*

Размножаются моллюски в основном партеногенетически, являются живородящими. Моллюск вынашивает яйца, из которых появляются уже полностью сформированные маленькие особи, которые сразу же зарываются в грунт. Количество новорожденных тиарид может колебаться в зависимости от размера самого моллюска и составлять от 10 до 60 шт. *M. tuberculata* и *T. granifera* теплолюбивые организмы, при температуре воды ниже 7–10°C они погибают.

#### Результаты исследований и их обсуждение.

По данным исследования зообентоса (сентябрь 2017 г.) в ВО ЗАЭС тиариды были обнаружены лишь в южном районе ВО на глубине 1,0 и 4,5 м. При этом, на грунте были отмечены оба вида, а на твердых субстратах, лежащих на дне (ветки) – только *T. granifera*. Температура воды в этих биотопах составляла 28 °C. Численность и биомасса *M. tuberculata* были невысокими: на глубине 1,0 м соответственно, (80 экз/м<sup>2</sup> и 12,32 г/м<sup>2</sup>), а на глубине 4,5 м – в 2 раза ниже (40 экз/м<sup>2</sup> и 6,40 г/м<sup>2</sup>). Показатели обилия *T. granifera* были выше, особенно в перифитоне с такой же тенденцией увеличения показателей обилия на меньшей глубине: на 1,0 м – 240 экз/м<sup>2</sup> и 36,00 г/м<sup>2</sup>, на глубине 4,5 м – 120 экз/м<sup>2</sup> и 12,70 г/м<sup>2</sup>, в перифитоне на глубине 1 м – 367 экз/м<sup>2</sup> и 57,96 г/м<sup>2</sup>.

В октябре обследование техногенных субстратов показало достаточно высокий уровень развития тиарид, особенно на участках ВО с повышенной температурой воды (таблица 1). Максимальная плотность моллюсков отмечена на поверхнос-

ти бетона в аванкамере градирни, где, вероятно, популяции обоих видов моллюсков существует постоянно, поскольку здесь круглогодично поддерживается достаточно высокая температура воды. Из-за замкнутой системы циркуляционного водоснабжения эта часть популяции может служить постоянным источником распространения моллюсков в других водных объектах техноэкосистемы ЗАЭС. Так как популяции тиарид отмечаются в техноэкосистеме ЗАЭС уже несколько лет и на участках с подогретой водой обитают и в холодное время года, то можно предположить, что эти моллюски натурализовались в техноэкосистеме ЗАЭС. Так, по результатам водолазного обследования зимой поселения тиарид обнаруживаются в отводящем канале на большой глубине.

Как на техногенных, так и природных субстратах в техноэкосистеме ЗАЭС в совместных поселениях тиарид значительно преобладали *T. granifera*, их доля в общих показателях обилия составляла более 80% (рисунок 1).

Размерная структура популяций двух видов тиарид несколько различалась (рисунок 2). В популяции *M. tuberculata* было выделено 5 размерных групп 1–5 мм, 6–9 мм, 10–13 мм, 14–17 мм, 18–21 мм. В популяции *T. granifera* было определено 4 размерных группы – особи размерной группы 18–21 мм отсутствовали, преобладали моллюски размерной группы 6–9 мм. Средняя высота раковины *M. tuberculata* была  $14,33 \pm 6,12$  мм, варьируя от 2 до 21 мм, *T. granifera* –  $8,27 \pm 2,83$  мм (от 2 мм до 17 мм). Преобладание младшей размерной группы *T. granifera* подтверждает то, что популяция постоянно пополняется молодыми особями.

Значительного развития тиариды достигали и в других ВО АЭС Украины. По результатам исследований зообентоса ВО Южно-Украинской АЭС осенью 2005 года в приплотинной части на глубине 3–6 м на слабо заиленных песках и мелком щебне со створками отмершей дрейссены были обнаружены моллюски *M. tuberculata*.

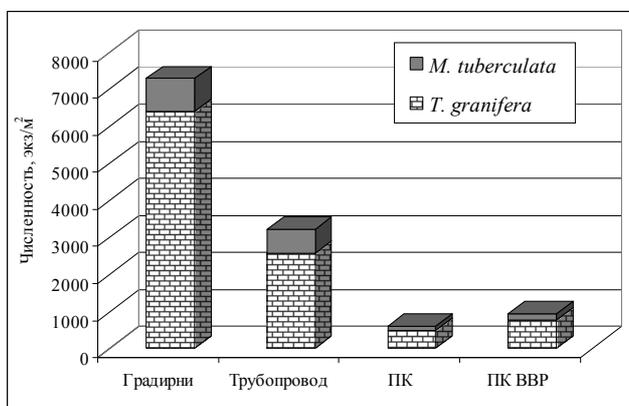


Рисунок 1. Соотношение численности тиарид на техногенных и природных субстратах в техноэкосистеме ЗАЭС, октябрь 2017 г. «ПК» – подводный канал; «ПК ВВР» – подводный канал, заросли высшей водной растительности – тростника

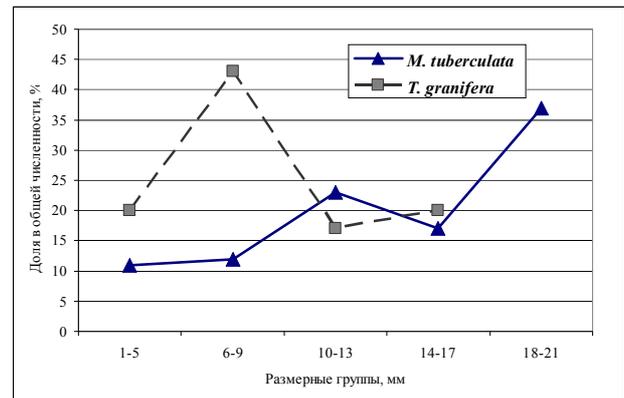


Рисунок 2. Размерная структура популяций тиарид в водных объектах техноэкосистемы ЗАЭС, октябрь 2018

Численность их составляла 100–400 экз/м<sup>2</sup>, биомасса – 6,0–35,0 г/м<sup>2</sup>, преобладали моллюски с высотой раковины 9–10 мм [10]. По результатам дальнейших исследований (2006, 2009–2011 гг.), можно было заключить, что этот моллюск натурализовался в ВО. Он постоянно встречается в зообентосе в средней и приплотинной части и доминирует по численности и биомассе, иногда достигая 99% показателей обилия. Так, летом 2009 г. на прибрежных участках количественные показатели моллюска *M. tuberculata* составляли на глубине 2 м – 2,6 тыс. экз/м<sup>2</sup> и 276,0 г/м<sup>2</sup>, а на глубине 5 м – 7,7 тыс. экз/м<sup>2</sup> и 623,0 г/м<sup>2</sup> [11].

Таким образом, как показали исследования водных объектов техноэкосистем АЭС Украины, вселившиеся виды тропических брюхоногих моллюсков-тиарид нашли здесь достаточно благоприятные условия обитания. При этом, уровень развития вида *Tarebia granifera* в техноэкосистеме ЗАЭС более высокий, чем *Melanoides tuberculata*.

В отличие от дрейсенид, которые прикрепляются к субстрату и могут образовывать мощное обрастание, брюхоногие моллюски могут создавать биопомехи в случае перенесения потоком воды скоплений моллюсков. Например, были отмечены биологические помехи в работе оборудования от живородок *Viviparus viviparus* на Змиевской ГРЭС [18].

По информации персонала ЗАЭС с 2015 г. тиариды вызвали существенные помехи в работе систем водоснабжения ЗАЭС (таблица 2). Биопомехи наблюдались практически на всех энергоблоках ЗАЭС. В частности, на вращающихся сетках блочных насосных станций (БНС) за сутки скапливалось до нескольких кубометров биогенного материала (живых моллюсков и большого количества пустых раковин). Поскольку сетки не задерживают полностью этого дрейфового биогенного материала, моллюски и их раковины отмечались и в системе техводоснабжения. Значительных биопомех на насосных станциях, обеспечивающих брызгальные устройства в ПК, отмечено не было.

Таблица 1. Показатели обилия брюхоногих моллюсков-тиарид в различных биотопах техноэкосистемы ЗАЭС, октябрь 2017 г.

Показатели	<i>M. tuberculata</i>		<i>T. granifera</i>	
	N, экз/м <sup>2</sup>	B, г/м <sup>2</sup>	N, экз/м <sup>2</sup>	B, г/м <sup>2</sup>
Градирни				
ср±σ	895±251	142,68±41,04	6382±1207	803,02±125,75
min-max	540-1400	86,40-225,80	4040-8500	515,90-967,30
Трубопровод техводоснабжения				
ср±σ	639±341	101,03±51,57	2568±1354	319,45±159,50
min-max	200-11400	30,50-171,50	900-5200	117,80-615,20
Подводящий канал, бетон				
ср±σ	83±40	13,17±6,18	427±151	59,87±21,36
min-max	40-120	6,30-18,30	320-600	44,70-84,30
Подводящий канал, тростник (показатели на м <sup>2</sup> дна)				
ср±σ	160±42	25,44±6,24	768±311	108,98±43,30
min-max	110-240	18,20-37,80	480-1480	71,40-208,70

Таблица 2. Биологические помехи в техноэкосистеме ЗАЭС (по данным технического персонала)

Период получения информации	Локализация	Характер биопомех
Сентябрь 2015 г.	Энергоблок № 6, трубопроводы охлаждающей и пожарной воды, теплообменное оборудование	Скопление влекомых наносов. Раковины (в основном пустые) моллюсков
Август 2016 г.	Энергоблок № 4, трубопроводы охлаждающей и пожарной воды, теплообменное оборудование	-*-
Июнь 2016 г.	Энергоблок № 5, конденсатор турбины, сетки, охладитель промконтура, аванкамеры циркуляционных насосов, мусоросборник	-*-
Июль 2016 г.	Энергоблок № 5, вращающиеся сетки, трубопроводы охлаждающей воды, теплообменное оборудование	-*-
Декабрь 2016 г.	Энергоблок № 1, фильтры предочистки	Раковины (в основном пустые) моллюсков дрейссена* и мелания
29.12.2016 г.	Подводящий канал, аванкамера циркуляционных насосов, вращающиеся сетки БНС 1- 6	
21.04.2017	Энергоблок № 3, ковш БНС 3	Моллюски мелания и дрейссена*, другой бытовой мусор с ориентировочным объемом 2 м <sup>3</sup>

Примечание. \* Персоналом было отмечено наличие дрейссены, хотя начиная с 2000-ных годов по данным гидробиологических исследований эти моллюски в техноэкосистеме ЗАЭС не фиксировались.

**Заключение.** Необходимо отметить, что фиксация биологических помех происходит в период, когда тот или иной их биологический агент уже достиг в техноэкосистеме значительного развития. Так, в свое время были зафиксированы биологические помехи, вызванные развитием дрейссены в период планово-предупредительного ремонта на Хмельницкой АЭС в 2004 и 2005 гг., хотя этот моллюск вселился в водоем-охладитель несколькими годами ранее [1, 5].

Из этого следует вывод, что гидробиологический мониторинг техноэкосистем АЭС должен проводиться постоянно, в том числе мониторинг,

направленный на выявление новых видов гидробионтов, которые могут быть нежелательными и/или опасными в плане создания биологических помех в работе оборудования. Кроме того, в период потенциальной или реальной угрозы биологических помех все системы водоснабжения должны работать в особом режиме, с учетом, в частности, периодов размножения, оседания личинок гидробионтов и т.п.

Очевидно, должен быть разработан специальный Регламент эксплуатации оборудования в период интенсивных биопомех, который должен учитывать сезонные аспекты, климатические фак-

торы, возможность механической очистки фильтров и сокращение периода между чистками и др. Необходимо также анализ экономической и технической эффективности мероприятий по борьбе с

источником биопомех в сравнении с мероприятиями по определенной адаптации систем водоснабжения к ним.

### Список использованной литературы

1. Protasov A. A., Panasenko G. A., Babariga S. P. Biological Hindrances in Power Stations Exploitation, Their Typization and Main Hydrobiological of Control // *Hydrobiol. J.* – 2009. – Vol. 45, N 1. – P. 32–46.
2. Звягинцев А.Ю., Мощенко А.В. Морские техноэкосистемы энергетических станций. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 310 с.
3. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины / Протасов А.А., Сергеева О.А., Кошелева С.И. и др. – К.: Наук. думка, 1991. – 192 с.
4. Sakaguchi I. An overview of the antifouling technologies in power plant cooling water systems // *Sessile Organisms.* – 2003. – Vol. 20, N 1. – P. 15–19.
5. Протасов А.А., Силаева А.А. Контурные группировки гидробионтов в техно-экосистемах ТЭС и АЭС. – Киев, 2012. – 274 с.
6. Гідроекологічна безпека атомної енергетики в Україні / В.Д. Романенко, М.І. Кузьменко, С.О. Афанасьєв та ін. // *Вісн. НАН України.* – 2012. – № 6. – С. 41–51.
7. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки. – Киев, 2011. – 234 с.
8. Grigorovich I.A., MacIsaac H.J., Shadrin N.V., Mills E.L. Patterns and mechanisms of aquatic invertebrate introductions in the Ponto-Caspian region // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* – 2002. – Vol. 59. – P. 1189–1208.
9. Сон М.О. Моллюски вселенцы в пресных и солоноватых водах Северного Причерноморья. – Одесса: Друк, 2007. – 132 с.
10. Ляшенко А.В, Слепнев А.Е. Находка *Melanooides tuberculata* (Muller, 1774) в водоеме-охладителе Южно-Украинской атомной электростанции // *Эколого-функціональні та фауністичні аспекти дослідження молюсків, їх роль у біоіндикації стану навколишнього середовища: Зб. наук. праць.* – Житомир: Вид-во ЖДУ, 2006. – Вип. 2.– С. 187–190.
11. Слепнев А.Е., Силаева А.А. О натурализации *Melanooides tuberculata* (Thiaridae, Gastropoda) в водоеме-охладителе Южно-Украинской АЭС // *Вестн. зоологии.* – 2013. – № 47. – С. 178.
12. Климчук А. Біологічні особливості інвазійного виду гастропод *Melanooides tuberculata*: Abstr. VIII Intern. Conf. «Zoocenosis-2015. Biodiversity and Role of Animals in Ecosystems», Dnipro, 21–23.12.2015. – Dnipro, 2015. – P. 78–79.
13. Халиман И.А., Анистратенко В.В. *Melanooides granifera* – еще один чужеродный вид моллюсков в фауне Украины // *Вестн. зоологии.* – 2006. – Т. 40, № 4. – С. 320.
14. Маренков О.Н. Биоинвазия моллюсков *Melanooides tuberculata* и *Tarebia granifera* (Thiaridae, Gastropoda) в водоеме-охладителе Запорожской АЭС: Abstr. IX Intern. Conf. «Zoocenosis-2017. Biodiversity and Role of Animals in Ecosystems», Dnipro, 20–22.11.2017. – Dnipro, 2017. – P. 44.
15. Murray H.D. 1964: *Tarebia granifera* and *Melanooides tuberculata* in Texas // *American Malacological Union Inc. Annual report.* – 1964. – P. 15–16.
16. Pointier J.P., Incani R.N., Balzan C., Chrosciechowski P., Prypchan S. Invasion of the rivers of the littoral central region of Venezuela by *Thiara granifera* and *Melanooides tuberculata* (Mollusca: Prosobranchia: Thiaridae) and the absence of *Biomphalaria glabrata*, snail host of *Scistosoma mansoni* // *The Nautilus.* – 1994. – Vol. 107. – P. 124–128.
17. Duggan I.C. First record of a wild population of the tropical snail *Melanooides tuberculata* in New Zealand natural waters // *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research.* – 2002. – Vol. 36. – P. 825–829.
18. Васенко О.Г. Екологічні основи водоохоронної діяльності в теплоенергетиці. Бібліотека журналу ІТЕ. Т. 1 – Харків: УкрНДІЕП, 2000. – 243 с.

Получено 13.03.2018

Работа выполнена при поддержке МОН Украины, проект М/22–2018 совместного Украинско-Белорусского сотрудничества.

УДК 621.039.9

О. П. Іщенко

Южно-Українська АЕС, м. Южноукраїнськ

## ВАЛІДАЦІЯ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ БАСЕЙНУ ВИТРИМКИ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ТА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВОДИ БАСЕЙНУ ВИТРИМКИ

При повному знеструмленні енергоблоку АЕС порушується режим охолодження відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) в басейні витримки (БВ), відбувається закипання води у відсіках БВ. Для запобігання порушення максимальної проектної межі пошкодження оболонки ТВЕЛ ядерного палива в БВ необхідно забезпечити альтернативну систему охолодження БВ. Усунення дефіциту безпеки має досягатися шляхом організації ефективної схеми подачі охолоджуючої води в БВ при повній непрацездатності штатних засобів. Вивчення процесів в БВ при втраті охолодження, як і визначення необхідних параметрів альтернативної системи охолодження виконувалося за допомогою розрахункового коду MELCOR. Виконано порівняння результатів моделювання втрати охолодження води БВ і результатів експерименту по нагріванню і подальшому охолодженню води БВ. Показано високу збіжність результатів моделювання з результатами експериментальних даних, отриманих на реальному обладнанні АЕС. Це підтвердило можливість використання побудованих розрахункових моделей для вивчення процесів нагріву води в БВ і при розробці альтернативної системи охолодження води БВ.

**Ключові слова:** басейн витримки, відпрацьоване ядерне паливо, розрахунковий код MELCOR, система охолодження.

**Вступ.** Актуальність досліджень БВ відпрацьованого ядерного палива стрімко зросла після аварії на АЕС Фукусіма, де дизельні генератори виявилися не здатні виконати свої функції, внаслідок чого знеструмлена система охолодження БВ не відновила свою роботу, а іншої системи охолодження БВ не було передбачено [1].

Після аналізу даної проблеми на п'ятій нараді з розгляду виконання зобов'язань за Конвенцією про ядерну безпеку (4-14 квітня 2011 року), країни-учасники Конвенції в спільній заяві про аварію на АЕС «Фукусіма-Даїчі» наголосили на необхідності проведення переоцінки безпеки АЕС та негайного впровадження додаткових заходів для підвищення безпеки АЕС.

На АЕС світу почали розроблятися заходи з охолодження води в БВ після знеструмлення. Так, в роботах [2] та [3] наведені результати моделювання поведінки БВ ВЯП. Одним з рішень є система пасивного охолодження ВЯП [4], [5], проте впровадження даної системи проблематично для вже діючого енергоблоку. Іншим рішенням є подача води в БВ для компенсації втрат води при випаровуванні її з басейну при нагріванні або кипінні, але в цьому випадку буде значно погіршено якість охолоджуючої води ВЯП в БВ, а також зменшена концентрація борної кислоти в охолоджуючій воді, яка сприяє зменшенню підкритичності в БВ. Альтернативним рішенням може бути організація охолодження наявної в БВ води.

**Метою** роботи було проведення валідації описаних в роботі [3] нодалізаційних схем БВ та системи охолодження БВ для визначення величини похибки результатів моделювання у порівнянні з результатами експерименту, проведеному на обладнанні АЕС.

**Матеріали та методи дослідження.** Розрахунки виконувалися за допомогою коду MELCOR [6]. БВ приймався ідентичний з басейном витримки енергоблоку №3 Южно-Української АЕС (ЮУАЕС), нодалізаційна схема БВ та схема системи охолодження описано в роботі [3]. Відсік TG21B03, що моделюється контрольним об'ємом CVH 488, в якому задається внутрішнє джерело енергії з потужністю 198 кВт. Відсік TG21B01 моделюється контрольним об'ємом CVH 486, в якому задається внутрішнє джерело енергії з потужністю 331 кВт.

Початкові умови для розрахунку наведені в таблиці 1.

Розрахунок часу підвищення температури води у відсіках TG21B01 і TG21B03 басейну витримки і перевантаження від 20 °С до 60 °С при відомій потужності залишкових енерговиділень в відсіках виконувався за умови:

- повної відсутності охолодження води у відсіках TG21B01 і TG21B03 БВ;
- теплообміну між водою і повітрям гермооболонки (ГО);
- сталості тепlopостачання в часі.

Таблиця 1. Початкові умови для розрахунку

Параметр	TG21B03 (Відсік «В»)	TG21B01 (Відсік «С»)
Об'єм води, м <sup>3</sup>	195,4	195,4
Тиск, Па	98066,5	98066,5
Початкова температура води, °С	20	20
Сумарне залишкове енерговиділення, кВт	198	331

Об'єм повітря ГО приймається рівним 66137,56 м<sup>3</sup> і температура 45 °С. Консервативно приймалося, що температура повітря в ГО не змінюється з плином часу.

**Результати розрахунків** зміни температури води у відсіках TG21B01 і TG21B03 БВ і перевантаження при відомій потужності залишкових енерговиділень у відсіках представлені на рисунку 1 та наведені у таблиці 2.

Також проводилась перевірка роботи системи охолодження, при цьому при вимкненій системі охолодження БВ на енергоблоці №3 ЮУАЕС, вода басейну підігрівалася до 31°С та 26,5°С у відсіках TG21B01 та TG21B03 відповідно. Після чого система охолодження вмикалася та вода басейну витримки охолоджувалася.

Ця ситуація була розрахована за допомогою моделі БВ, що перевіряється, та змодельованої системи охолодження (рисунок 2).

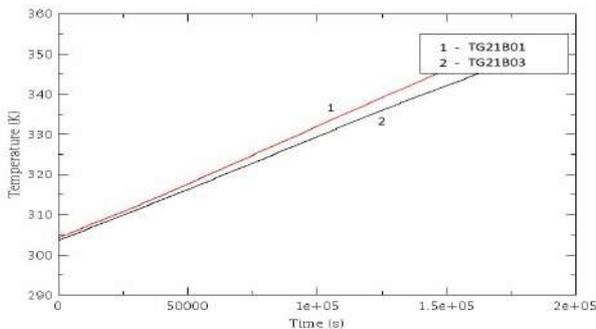


Рисунок 1. Графік зміни температури води у відсіках TG21B01 і TG21B03 БВ енергоблоку №3 ЮУАЕС при відомій потужності залишкових енерговиділень у відсіках

Таблиця 2. Результати розрахунків за допомогою MELCOR

Температура води, °С	TG21B03 (CVH 488)		TG21B01 (CVH 486)	
	Час досягнення заданої температури, год	Швидкість розігріву, °С/год	Час досягнення заданої температури, год	Швидкість розігріву, °С/год
20	0	0	0	0
30	5,70	1,75	4,20	2,10
40	10,05	1,43	7,42	2,07
50	30,14	0,50	16,83	1,06
60	більше 2-х діб	-	29,89	0,50

Результати експерименту та моделювання наведені в таблиці 3.

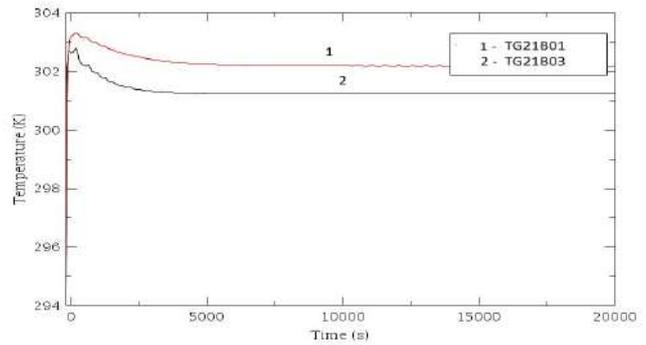


Рисунок 2. Охолодження води БВ, розраховане за допомогою MELCOR

Таблиця 3. Порівняльна таблиця результатів експерименту та моделювання роботи системи охолодження БВ

	Відсік			
	TG21B01		TG21B03	
	Експ-т	Модель	Експ-т	Модель
Температура до початку охолодження, °С	30,9	30,2	26,5	29,6
Температура стабілізації, °С	26,6	27,3	26,7	27,0
Час з початку охолодження до стабілізації, год	2,9	2,5	2,9	2,7

### Висновки

Розрахунки показали, що при відсутності відведення тепла з відсіків БВ температура води підвищується від 20 °С до 60 °С:

- у відсіку TG21B03 за час більше 2-х діб (за допомогою розрахункового коду MELCOR);
- у відсіку TG21B01 за час 29,89 годин (за допомогою розрахункового коду MELCOR).

Швидкість розігріву води у відсіках БВ, отримана при випробуваннях становить:

- у відсіку TG21B03 1,67 °С/годину при зміні температури води від 20,1 °С до 30,1 °С;
- у відсіку TG21B01 1,93 °С/годину при зміні температури води від 24,2 °С до 35,8 °С.

Порівнюючи ці дані з результатами, отриманими за допомогою коду MELCOR видно, що розрахункова швидкість розігріву на початковому етапі зростання температури води у відсіках БВ в діапазоні від 20 °С до 30 °С відрізняється від експериментальної. Це пояснюється наступними факторами:

- прийняті до уваги вихідні дані по енерговиді-

ленням в відсіках БВ відрізняються від фактичних значень на величину похибки визначення;

- датчик, що вимірює температуру води в відсіку БВ, встановлюється в певному місці і при відсутності перемішування води його показання мають похибку, при розрахунку це виключається, тому що розрахунковий код MELCOR є кодом з зосередженими параметрами, тобто температура води в будь-якій точці відсіку БВ однакова;

- в розрахунку не враховується тепловіддача від води до бетону стінок БВ;

- розрахунок виконаний з консервативною умовою - підтримання постійної високої температури повітря в ГО (45 °С);

- температура початку охолодження відрізняється від експериментальної, також температура у

відсіках майже однакова в моделі, та відрізняється в експерименті;

- розрахунковий код рахує стабільну витрату води, в той час як в реальному обладнанні цей показник має певний діапазон коливань;

- датчики вимірювання витрати води та температури мають похибку.

Отже розрахункова швидкість розігріву відрізняється на 4,5% та охолодження на 6,0 % в TG21B03 та на 9,0% та 11,5% в TG21B01 відповідно. Враховуючи досить високу збіжність результатів розрахунків, а також, що похибка результатів розрахунку не суперечить консервативному підходу до розрахунків аварій кодом MELCOR, результати розрахунків можна вважати достовірними.

### Список використаної літератури

1. Скалозубов В. І. Важкі аварії на атомних станціях з корпусними ядерними реакторами. Основи моделювання та аналіз: монографія / Скалозубов В.І., Ващенко В.М., Козлов І.Л., Клевцов С.В. - Одеса, 2015. - 319 с.
2. Воробьев Ю. Ю. Особенности моделирования бассейна выдержки отработанного ядерного топлива с использованием расчетного кода MELCOR 1.8.5 / А.Л. Коцуба, Ю.Ю. Воробьев // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — № 2. — С. 3-9.
3. Ищенко О. П. Автономная система охлаждения бассейна выдержки отработанного ядерного топлива на АЭС с реактором ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение" 2017, №2, с. 117-123
4. Подопригора А. В. Пасивна система аварійного ремонтного розхолодження ВВЕР-1000 / Подопригора А.В., Свириденко І.І., Шевельов Д.В. // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 119/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. - Севастополь, 2011 р.
5. Свириденко І. І. Застосування термосифонного теплообмінного обладнання в пасивних системах відводу тепла / Свириденко І.І., Шевельов Д.В., Виборнов С.С., Хаффаа Х. // Забезпечення безпеки АЕС з ВВЕР, матеріали конференції. - ОКБ "Гідропрес", 2013.
6. MELCOR Computer Code Manuals. Vol. 2: Reference Manuals. Version 1.8.5., 2000. - 538с. - (NUREG/CR-6119, Vol. 2, Rev. 2SAND2000-2417/2)..

Отримано 05.06.2018

УДК 620.92

*Я. О. Комарова-Ракова**Одесский национальный политехнический университет***ПОЛУЧЕНИЕ МАГНЕГАЗА В ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО В ПИКОВЫХ НАГРУЗКАХ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

В статье рассматривается получение магнегаза из водно-угольной смеси в период провала энергетической нагрузки в сети и использование этого газа для производства электроэнергии в период пиковой нагрузки. Приводится схема установки и показатели ее работы.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, пиковые и провальные нагрузки энергосистемы, угольные шахты, магнегаз.

**Введение.** Основной задачей эксплуатации электростанции является обеспечение отпуска электроэнергии в соответствии с диспетчерским графиком нагрузки при минимальных затратах топлива. Требования к продолжительности и экономичности работы энергоблоков учитывают конкретные условия их эксплуатации на электростанциях.

Базовым режимом работы энергоблока является режим его эксплуатации с периодическими остановами для ремонта, а в отдельных случаях, на ночное время и в нерабочие дни, для участия в регулировании графика нагрузки. В базовом режиме оборудование должно эксплуатироваться с максимальной продолжительностью и экономичностью, соответствующими техническим условиям на его поставку.

Нужно отметить, что проблема покрытия пиковых нагрузок сегодня является одной из важнейших в электроэнергетике. Одним из способов регулирования нагрузок является возможная добыча магнегаза в ночное время. Получение магнегаза в отработанных угольных шахтах

Активным развитием технологии производства магнегаза занимается американский ученый Р. М. Сантилли. Технология производства магнегаза основана на использовании плазменных реакторов PlasmaArcFlowTM, с расходуемыми углеродистыми стержнями. Реакторы Р. М. Сантилли разрабатываются корпорациями TTL, EFT, USMagnegas, IBR (США), а также подразделениями EuroMagnegas (Англия), AsiaMagnegas (Гонконг) [1].

Исследования Р. М. Сантилли по производству магнегаза проводились на чистой воде [2]. На базе кафедры АЭС Одесского национального политехнического университета (ОНПУ) была создана установка по производству этого газа из водно-угольной смеси. Результаты эксперимента показали, что добывать магнегаз таким способом гораздо эффективней, чем на чистой воде, выход газа увеличивается в два раза. Результаты эксперимента представлены на рисунке 1 и таблице 1 [3].

На сегодняшний день в Украине имеются отработанные угольные шахты, добыча угля в которых не целесообразна. Все отработанные угольные шахты затапливаются водой для предотвращения взрыва метана. Кафедрой АЭС ОНПУ была предложена новая установка (рисунок 2), позволяющая получать магнегаз в отработанных угольных шахтах в ночное время, то есть в период, когда потребление электроэнергии наименьшее. Таким образом, избыточная электроэнергия будет использоваться для производства магнегаза, что позволит выравнять график нагрузок энергопотребления. На данное изобретение была подана заявка в патентное ведомство Украины.

ботанные угольные шахты, добыча угля в которых не целесообразна. Все отработанные угольные шахты затапливаются водой для предотвращения взрыва метана. Кафедрой АЭС ОНПУ была предложена новая установка (рисунок 2), позволяющая получать магнегаз в отработанных угольных шахтах в ночное время, то есть в период, когда потребление электроэнергии наименьшее. Таким образом, избыточная электроэнергия будет использоваться для производства магнегаза, что позволит выравнять график нагрузок энергопотребления. На данное изобретение была подана заявка в патентное ведомство Украины.

Таблица 1. Результаты эксперимента по получению магнегаза

№	Объем полученного газа V, см <sup>3</sup>	Время горения дуги τ, с	Мощность дуги N, кВт	Выход газа G, см <sup>3</sup> /с
Вода				
1	17,12	57,32	0,69	0,29
2	17,02	31,47	1,03	0,54
3	17,22	29,00	0,99	0,59
4	17,12	14,57	1,73	1,18
5	17,12	15,00	1,68	1,14
6	17,22	14,56	1,98	1,18
7	17,22	17,80	1,82	0,96
8	17,22	8,00	1,11	0,75
9	17,22	22,72	1,20	0,73
Водно-угольная смесь				
1	17,22	16,50	1,09	1,04
2	17,22	19,80	0,90	0,87
3	17,27	18,90	1,14	0,90
4	17,22	11,00	1,63	1,57
5	17,22	11,56	1,24	1,49
6	17,52	10,10	1,85	1,73
7	17,32	14,30	1,26	1,21
8	17,32	18,31	0,63	0,50
9	17,02	22,00	1,02	1,00

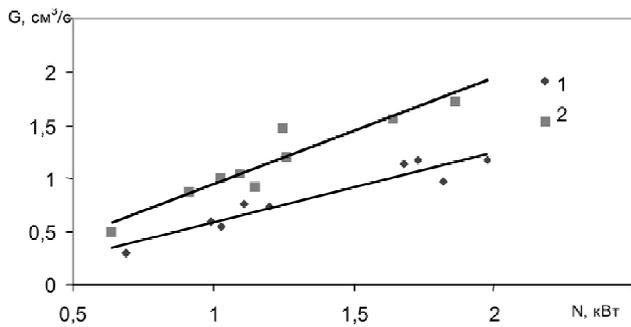


Рисунок 1. Залежність виходу магнегазу в чистій воді (1) і в водно-угольній суміші (2)

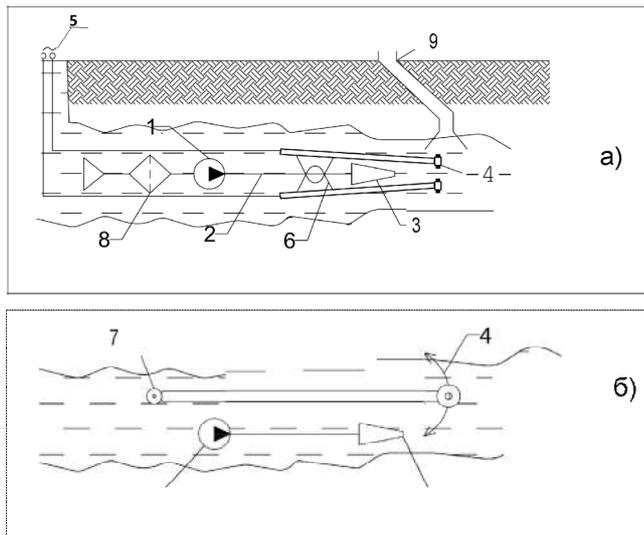


Рисунок 2. Схема установки для отримання магнегазу з оброблених вугільних шахт

Цілью пропонованого винаходу є максимальне використання енергії оброблених родовищ горючих ископаємих та вирівнювання графіка навантажень енергосистеми.

Спосіб отримання магнегазу реалізований на наступній установці, зображеній на рисунку 2. Установка складається з насоса (1), трубопроводу (2), підключеного до гідранту (3), призначеного для розмивання вугільних пластів високоскоростною струєю води. Графітові електроди (4), що служать для отримання електричної дуги, закріплені в токопроводячому пристрої (5). Для зміни відстані між електродами використовується пристрій (6) і (7). Для запобігання потраплянню в насос (1) вугілля встановлюється фільтр (8). Для реалізації заявленого способу установка розміщується нижче рівня води. Данна установка працює наступним чином: насос (1) забирає воду через фільтр (8) і направляє по трубі (2) до гідранту (3), який формує високоскоростний потік води, що розмиває вугільний пласт і створює вугільну суспензію, в місці установки пристрою. Через токопроводячий пристрій (5) на електроди (4) подається електричний струм, за рахунок якого між

електродами виникає електрична дуга. Вона ініціює реакцію розщеплення води, вугільної суспензії та графітових електродів на атоми, які об'єднуються в магнегаз (смісь  $\text{CO}$  і  $\text{H}_2$ ). Магнегаз, що виділяється при реакції, піднімається вгору, де через спеціальну шахтний ствол збирається в газгольдер (9).

Отриманий магнегаз має важливі, з точки зору екології, показателі. Це єдиний відомий горючий газ, який відновлює кисневий баланс атмосфери.

Після того як газ буде зібраний в газгольдер, його можна спалювати в період пікових навантажень на газотурбінних установках електростанцій. Також цей газ може використовуватися як паливо для машин.

Згідно нової Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, основною задачею країни є зменшення енергетичної залежності від сусідніх країн, підвищення ефективності видобування корисних ископаємих, будівництво нових атомних і модернізація теплових електростанцій, розвиток альтернативних джерел енергії і головне – покращення екологічного стану країни, за рахунок зменшення викидів парникових газів [4].

Найкращим способом вирішення поставлених завдань є використання магнегазу, який можна самостійно виробляти за допомогою розроблених установок на базі магнегазотехнології американського вченого Сантілі. Вміст шкідливих речовин в результаті спалення цього газу мінімальний (таблиця 2).

Використання магнегазу дозволить забезпечити виконання зобов'язань України в досягненні цілей Паризького угоди і Киотського протоколу про зміну клімату.

Таблиця 2. Склад продуктів спалення магнегазу

Продукт спалення	Відсоток, %
$\text{H}_2\text{O}$	65–70
$\text{O}_2$	9,5–10,5
$\text{CO}_2$	6–8
$\text{CO}$	0,00–0,01
Гідрокарбонати	2–5

## Висновки

Експерименти, виконані на розробленій кафедрою АЕС ОНПУ установці для отримання магнегазу, довели, що вихід магнегазу буде збільшений в 2 рази.

Новий спосіб отримання магнегазу дозволить максимально ефективно використовувати оброблені вугільні шахти, що для нашої країни

является позитивным фактором.

Использование полученного из угольных шахт

магнегаза позволит выравнять графики нагрузок

энергосистемы Украины.

### Список использованной литературы

1. A STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HADRONIC REACTOR OF MOLEKULAR TYPE [Электронный ресурс]/ R. M. Santilli and A. K. Aringazin, 2001. – Режим доступа: [www.usemagnegas.com](http://www.usemagnegas.com)
2. STRUCTURE AND COMBUSTION OF MAGNEGASES™ [Электронный ресурс]/ R. M. Santilli and A. K. Aringazin, 2001. – Режим доступа: [www.usemagnegas.com](http://www.usemagnegas.com)
3. Комарова-Ракова Я. О. Исследования возможности получения «магнегаза» из водно-угольной смеси/ Королёв А. В.// Ядерна енергетика та довілля №2 (8), 2016 – с. 64-66.
4. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. 2018.– Режим доступа: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=245239564](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564)

*Получено 04.06.2018*

## Реферати опублікованих статей / Summaries

**УДК/UDC 539.4: 621.039**

В.О. Куров, Ю. Муссаї, О. М. Сухоручко

**Особливості моделювання і розрахунку міцності залізобетонної гермооболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС в програмному комплексі APM Structure 3D**

В статті розглянуті основні підходи до оцінки сейсмостійкості захисної герметичної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС методом скінченних елементів в програмному комплексі APM Structure 3D.

V. Kurov, Y. Mussaui, A. Sukhoruchko

**Features of modeling and strength calculation reinforced concrete envelope of the reactor compartment of NPP in the APM Structure 3D software package**

The main approaches to the estimation of seismic resistance of the protective containment of the reactor compartment of the NPP by the finite element method in the APM Structure 3D software package is considered in the article.

**УДК/UDC 621.039**

О. А. Пуртов, О. М. Масько, О. В. Карашук

**Оновлена концепція зняття з експлуатації енергоблоків Рівненська АЕС**

Представлені основні положення оновленої Концепції зняття з експлуатації енергоблоків ВП «Рівненська АЕС». Розглянуто два основні варіанти зняття з експлуатації (ЗЕ) енергоблоків АЕС - негайний демонтаж і відкладений демонтаж. Оптимальним варіантом ЗЕ енергоблоків № 1,2,3,4 ВП РАЕС визначено відкладений демонтаж з тривалістю стадії витримки 18, 26, 30 і 21 рік відповідно. Оптимальний варіант ЗЕ з відкладеним демонтажем забезпечує суттєві переваги з точки зору рівномірності трудовитрат і завантаженості установок з переробки РАВ. Оцінені фінансові витрати на окремих стадіях ЗЕ енергоблоків № 1-4, розміри щорічних відрахувань на ЗЕ і на захоронення РАВ від ЗЕ енергоблоків відповідно до оновленої Концепцією.

O. Purto, A. Masko, A. Karaschuk

**Updated concept of Rivne NPP units decommission**

The main provisions of the updated Concept for Decommissioning of Rivne NPP Units are presented. Two main options for decommissioning (DE) of NPP power units are considered: immediate dismantling and deferred dismantling. Optimal version of the power units No. 1,2,3,4 of the RNPP is deferred dismantling with the duration of the aging stage of 18, 26, 30 and 21 years, respectively. The optimal version of DE with deferred dismantling provides significant advantages in terms of uniformity of labor costs and utilization of RW processing plants. The financial costs for the individual stages of DE of power units No. 1-4, the annual allocations for DE and for the disposal of radioactive waste from the power units in accordance with the updated Concept.

**УДК/UDC 621.039.7**

О. А. Корнілов, С. В. Барбашев

**Про включення комплексу плазмової переробки твердих радіоактивних відходів до складу комплексу з переробки радіоактивних відходів на Рівненській АЕС**

Проаналізовано ситуацію з надходженням і накопиченням РАВ на АЕС України, в т.ч. на Рівненській АЕС (РАЕС). Показана гостра необхідність вирішення проблеми зростання обсягів РАО в пристанційних сховищах АЕС. Описано створюваний на РАЕС в рамках проекту TACIS комплекс з переробки РАВ. Перераховано його переваги і недоліки. Удосконалити комплекс з переробки РАВ, який вводиться в експлуатацію на РАЕС, пропонується шляхом включення в його схему комплексу плазмової переробки, який є інноваційним підходом в галузі поводження з РАВ, що забезпечує зростання ефективності процесів переробки РАВ. Дано опис комплексу плазмової переробки твердих радіоактивних відходів. Такий модифікований комплекс дозволить скоротити обсяг низько- та середньоактивних відходів в десятки разів. Головними перевагами плазмового методу, в порівнянні з іншими, є розширення можливостей переробки відходів, різних з морфологічного складу, а також отримання на виході з установки кінцевого продукту (шлакового компаунда), який зберігає хімічну стійкість і механічну міцність протягом довгого часу, що виключить повторну переробку РАО в майбутньому.

A. Kornilov, S. Barbashev

**On inclusion of plasma complex of solid radioactive waste recycling in the composition of the complex for recycling of radioactive wastes at Rivne NPP**

The situation with the receipt and accumulation of radioactive waste (RW) at NPPs in Ukraine, including at the Rivne NPP (RNPP). It is shown that there is an urgent need to solve the problem of increasing the amount of RW in the near-station storages of nuclear power plants. The complex for the recycling of RW is being developed at the RNPP in the framework of the TACIS project. Its advantages and disadvantages are listed. To improve the RW processing complex put into operation at RNPP, it is proposed to include in its scheme a complex of plasma processing, which is an innovative approach in the field of radioactive waste management, which ensures the growth of the efficiency of the RW processing processes. A description of a complex of plasma processing of solid radioactive waste is given. Such a modified complex will reduce the volume of Low-Level Waste and Average Active Waste tenfold. The main advantages of the plasma method, in comparison with others, are the expansion of the possibilities for recycling waste, different in morphological composition, as well as obtaining at the output of the final product (slag compound), which retains chemical resistance and mechanical strength for a long time, which eliminates the reprocessing of radioactive waste in future.

**УДК/UDC 621.039:614.841.41**

С. И. Азаров., О. С. Задунай, В. М. Евланов

**Анализ возможных экологических последствий при эксплуатации мокрого хранилища отработавшего ядерного топлива**

На основании данных о площади и видах пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения, уровне радиоактивного загрязнения территории и горючего материала оценены ожидаемые эффективные дозы облучения и риски для участников пожаротушения. Приведены оценки радиационного и токсического риска для работников пожарно-спасательных подразделений при тушении пожаров в зоне отчуждения. Показано, что предел риска для здоровья пожарного в этих условиях может превышать предельный индивидуальный риск.

**УДК/UDC 539.4**

Т. В. Пірогов, А. С. Колядюк, В. В. Шелофаст

**Моделирование трубопроводов двовузловыми гнутыми элементами типа «pipe»**

Розглядається криволінійний двовузловий трубопровідний просторовий елемент. Елемент має по шість ступенів свободи в кожному вузлі і забезпечує прикладення до нього різних навантажень, таких як, власна вага, зовнішній і внутрішній тиск, рівномірні розподілені по довжині сили, термічні навантаження. Розглянуто питання виведення матриці жорсткості елемента, отримання еквівалентних вузлових зусиль від розподілених зовнішніх зусиль.

**УДК/UDC 544.723+546.732**

М. А. Кейміров

**Застосування природного і модифікованого поліаміномонтморилоніта Огланлінського родовища (Туркменістан) для очищення вод від сполук кобальту (II)**

Представлено результати дослідження сорбційного вилучення кобальту (II) природним та модифікованом поліаміном (низькомолекулярним поліетиленіміном розгалуженої структури) монтморилонітом Огланлінського родовища (Туркменістан) з водних середовищ у залежності від рН, тривалості контакту, початкової концентрації кобальту (II), іонної сили розчину та дози сорбентів у статичному режимі. На підставі розрахованих за допомогою моделі Ленгмюра граничних значень адсорбції встановлено, що найбільшу ефективність проявляє модифікований поліаміномонтморилоніт (178,6 мкмоль/г), на відміну від природного (117,6 мкмоль/г). Показано, що присутність у водному розчині комплексоутворювального реагенту (етилендіамінтетраоцтової кислоти) істотно пригнічує сорбцію кобальту (II) на модифікованому сорбенті. Встановлено діапазон рН та дозу модифікованого сорбенту для отримання максимально можливого ступеня очищення вод від сполук кобальту (II).

**УДК/UDC 621.039**

В. І. Скалозубов, О. А. Чулкин, Д. С. Пірковський

**Оглядовый анализ умов і наслідків гідродинамічних ударів в устаткуванні та трубопроводах систем, важливих для безпеки ядерних енергетичних установок**

Проведено оглядовий аналіз відомих підходів моделю-

S. Azarov, O. Zadunay, V. Yevlanov

**Analysis of environmental consequences in operation of storage facilities for spent nuclear fuel**

Forecast calculations and analysis of radiation effects on environmental components during the operation of a wet storage of spent nuclear fuel have been carried out. It is shown that in the normal operation of the storage facility, the radiation effects on the environment are insignificant. However, in case of accidents, the severity of the environmental consequences will be significant for the environment and preventive measures should be applied.

T. Pirogov, A. Kolyadyuk, V. Shelofast

**Simulation of pipelines by double-dimensional elements of the type «pipe»**

A curvilinear two-node pipeline spatial element is considered. The element has six degrees of freedom in each node and provides various loads to it, such as its own weight, external and internal pressure, uniform thermal stresses distributed along the length of the force. The issues of derivation of the stiffness matrix of the element, obtaining equivalent nodal forces from distributed external forces are considered.

M. Keymirov

**The use of natural and polyamine-modified montmorillonite Oglanlyn deposit (Turkmenistan) for water purification from cobalt (II)**

The results of the study of sorption removal of cobalt (II) on natural and modified polyamine (low molecular weight polyethyleneimine of branched structure) by montmorillonite from the Oglanlyn deposit (Turkmenistan) from aqueous media depending on pH, contact time, initial cobalt (II) concentration, ionic strength of solution and dose of sorbents in static mode presented. Based on the limit values of adsorption calculated using the Langmuir model, it was established that the most effective modified polyamine montmorillonite (178,6  $\mu\text{mol/g}$ ) showed the greatest efficiency, in contrast to natural (117,6  $\mu\text{mol/g}$ ). It is shown that the presence of a complexing agent (ethylenediaminetetraacetic acid) in the aqueous solution significantly inhibits the sorption of cobalt (II) on a modified sorbent. The pH range and the dose of the modified sorbent are determined to obtain the maximum possible degree of water purification from compounds cobalt (II).

V. Skalozubov, O. Chulkin, D. Pirkovskiy

**Survey analysis of conditions and consequences of hydrodynamic impact in equipment and pipelines of systems important for safety of nuclear energy installations**

An overview analysis of known approaches to the

вання гідродинамічних ударів на встаткування та елементи трубопроводів систем, важливих для безпеки ядерних енергетичних установок у нормальних умовах експлуатації, при порушеннях нормальних умов і в аварійних режимах. Визначено необхідність удосконалення і розробки методів моделювання умов виникнення та наслідків гідродинамічних ударів внаслідок різних видів теплогідродинамічної нестійкості одно- і двофазних потоків.

Аналіз досвіду експлуатації по статистиці зареєстрованих гідродинамічних ударів показав пріоритетність моделювання та аналізу запроектованої аварії з міжконтурними течіями в парогенераторах ядерних енергетичних установок з урахуванням різних видів гідродинамічних ударів внаслідок теплогідродинамічної нестійкості..

**УДК/UDC [574.586:62-757.7]:658.265**

О. О. Протасов, І. О. Морозовська, Н. Н. Ласковенко

**Використання методів експериментальних субстратів в моніторингу біологічних перешкод у роботі систем водопостачання і тестуванні необростаючих покриттів**

Наведено результати досліджень зооперифітона на експериментальних субстратах в умовах різних водоем, включаючи водойми-охолоджувачі АЕС та ТЕС. Розглянуто процеси формування угруповань на експериментальних субстратах і методичні прийоми у використанні експериментальних субстратів для гідробіологічного моніторингу.

**УДК/UDC 556.012(581.526.325:556.113)(574.63)**

Т. М. Новосолова, О. В. Голод, О. В. Левицький, О. О. Протасов

**Контроль екологічного стану водоеми-охолоджувача АЕС на підставі даних по прозорості води**

Представлені результати багаторічних досліджень прозорості води (за диском Секкі) у водоеми-охолоджувачі АЕС. Виходячи з величин прозорості води, на підставі встановлених раніше залежностей розрахована біомаса фітопланктону. На основі вивчення динаміки біомаси фітопланктону зроблений висновок про поступову евтрофікацію водоеми, пов'язану з надходженням біогенних речовин із зовнішніх джерел та внутрішньоводоемними процесами. Методика визначення прозорості вод за диском Секкі рекомендована для екологічного моніторингу водоеми-охолоджувачів АЕС.

**УДК/UDC 574.5+621.311.22**

В. А. Яковенко., А. А. Силаєва, О. О. Протасов

**Інвазивні червононогі молюски у технооекосистемі Запорізької АЕС**

Розглянуті питання, пов'язані зі вселенням і розвитком інвазивних видів червононогих молюсків *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) і *Tarebia granifera* (Lamarck, 1822) у водних об'єктах технооекосистеми АЕС. Обговорюються питання ролі видів-інвайдерів у технооекосистемах.

**УДК/UDC 621.039.9**

О. П. Ищенко

**Валидация расчетных моделей бассейна выдержки отработанного ядерного топлива и системы охлаждения воды бассейна выдержки**

simulation of hydrodynamic impacts on equipment and elements of pipelines of systems important for the safety of nuclear power plants under normal operating conditions, in violation of normal conditions and in emergency regimes is performed. The necessity of improvement and development of methods for modeling the conditions of occurrence and consequences of hydrodynamic impacts due to different types of thermal and hydrodynamic instability of single- and two-phase flows is determined.

The analysis of operational experience from the statistics of recorded hydrodynamic impacts showed the priority of modeling and analysis of a beyond-design accident with inter-loop leakages in steam generators of nuclear power plants, taking into account various types of hydrodynamic impacts due to heat and hydrodynamic instability.

A. Protasov, I. Morozovska, N. Laskovenko

**The use of methods of experimental substrates in the monitoring of biological hindrances in the exploitation of water supply systems and testing of antifouling coatings**

The results of studies of zooperiphyton on experimental substrates in conditions of various reservoirs, including coolers of NPP were presented. The processes of communities formation on experimental substrates and methodical techniques for the use of experimental substrates (ES) for hydrobiological monitoring were considered.

T. Novoselova, A. Golod, A. Levitsky, A. Protasov

**Control of environmental state of the NPP cooling pond on the basis of water transparency data**

Long-term studies results of water transparency (by Secchi disk) in the cooling pond of the NPP were presented in the article. Phytoplankton biomass was calculated based on previously established dependencies proceeding from the transparency values. This allowed us to conclude on the basis of its dynamics about gradual eutrophication of the reservoir associated with the supply of biogenic elements from external sources and in-water body processes. Method of determination of water transparency by Secchi disk was recommended for environmental monitoring of NPP cooling ponds

V. Yakovenko, A. Sylaiieva, A. Protasov

**Invasive gastropods in the technoecosystem of Zaporizhzhya NPP**

The questions related to invasion and development invasive species of gastropods *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) and *Tarebia granifera* (Lamarck, 1822) in the cooling pond are considered. The role of invasive species in technoecosystem NPP are discussed.

O. Ishchenko

**Validation of the computational models of the spent nuclear fuel pool and of the cooling system of the spent nuclear fuel pool water**

При полном обесточивании энергоблока АЭС нарушается режим охлаждения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в бассейне выдержки (БВ), происходит вскипание воды в отсеках БВ. Для предотвращения нарушения максимального проектного предела повреждения оболочки ТВЭЛ ядерного топлива в БВ необходимо обеспечить дефицита безопасности должно достигаться путем организации эффективной схемы подачи охлаждающей воды в БВ при полной неработоспособности штатных средств. Изучение процессов в БВ при потере охлаждения, как и определение необходимых параметров альтернативной системы охлаждения выполнялось с помощью расчетного кода MELCOR.

Выполнено сравнение результатов моделирования потери охлаждения воды БВ и результатов эксперимента по нагреванию и дальнейшему охлаждению воды БВ. Показана высокая сходимость результатов моделирования с результатами экспериментальных данных, полученных на реальном оборудовании АЭС. Это подтвердило возможность использования построенных расчетных моделей для изучения процессов нагрева воды в БВ и при разработке альтернативной системы охлаждения воды БВ.

УДК/UDC 620.92

Я. О. Комарова-Ракова

#### **Отримання «магнегазу» в відпрацьованих вугільних шахтах і використання його в пікових навантаженнях енергосистеми**

У статті розглядається отримання «магнегазу» з водно-вугільної суміші в період провалу енергетичного навантаження в мережі і використання цього газу для виробництва електроенергії в період пікового навантаження. Наводиться схема установки і показники її роботи.

Water in the spent fuel pool can start boiling if the regime of the spent fuel cooling in the spent fuel pool is broken down when a nuclear unit is out of power. To prevent the violation of the maximum designed limit for the nuclear fuel rod cladding damage it is necessary to provide an alternative cooling system for the spent nuclear fuel pool. The eradication of the safety deficiency should be achieved through the organization of an effective scheme for supplying the spent nuclear fuel pool with cooling water while the designed resources are completely disabled. The study of the processes in the spent nuclear fuel pool when the cooling is lost, as well as the determination of the necessary parameters of the alternative cooling system, was realized by using the Melcor computer code.

The comparison of the results of simulation the loosing of the spent fuel pool cooling and the results of the spent fuel pool water heating and further cooling experiment is done. The high convergence of simulation results with the results of experimental data that is obtained using real equipment at the nuclear power plants is shown. This confirmed the possibility of using the constructed calculation models for studying the processes of water heating in the spent fuel pool and for the development of an alternative water cooling system.

Y. Komarova-Rakova

#### **Obtaining «magnegas» in the processed coal chips and using it in the peak loads of the energy system**

The article considers the receipt of "magnegas" from the water-coal mixture during the period of the failure of the energy load in the grid and the use of this gas for the production of electricity in the peak period. The scheme of installation and indicators of its operation is given.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

1. Рукопис статті українською, російською або англійською мовами подається до журналу у вигляді твердої копії з підписами всіх авторів на останній сторінці, а також електронної версії (на електронному носії або електронною поштою).
2. Послідовність оформлення: ініціали та прізвища авторів; назва статті; назви організацій, де виконувалась робота; анотація, ключові слова; текст статті, літературні посилання. Стаття має містити УДК. Крім того, на окремій сторінці надається така інформація: ініціали та прізвища авторів, назва статті, назви організацій, анотація та ключові слова англійською, українською та російською мовами; телефони та адреси електронної пошти авторів.  
Додатково до тексту статті (окремо від тексту — окремим файлом) подаються ілюстративні та графічні матеріали.
3. Загальний обсяг статті разом з графічними матеріалами не повинен перевищувати 18 сторінок формату А4. На одній сторінці може бути не більше як 30 рядків та до 60 знаків (з урахуванням розділових знаків і проміжків між словами) у кожному рядку. Розмір шрифту підготовленого на комп'ютері матеріалу — 14; міжрядковий інтервал — 1,5; розміри полів (мм): зліва — 30, справа — 10, зверху — 20, знизу — 25.
4. Текст набирається шрифтом TimesNewRoman у редакторі Microsoft Word. Графічний матеріал (у режимі “чорно-білий” або “відтінки сірого”) подається у форматі EPS, TIFF або JPG-файлів з густиною точок на дюйм 300—600 dpi. Ілюстративні матеріали, що були створені за допомогою панелі WordArt редактора Microsoft Word, подаються окремо у форматі DOC-файлів.
5. Статті, які є результатами робіт, проведених в організаціях, повинні мати супровідний документ від цих організацій.
6. Разом зі статтею до редакції журналу має бути поданий документ про можливість відкритої публікації матеріалів.
7. Скорочення слів, словосполучень, назв, термінів, за винятком загальноприйнятих, можливе тільки у разі їх розтлумачення при першому згадуванні в тексті.
8. Зміст наукових статей будується за загальноприйнятою структурою:  
**вступ** — проблема, ціль, постановка задачі, її актуальність, аналітичний огляд останніх досліджень й публікацій з даної проблеми, опис головної ідеї даної публікації;  
**викладення основного змісту проведеного дослідження** — головна частина статті, де висвітлюються основні положення дослідження, програма і методика експерименту, отримані результати та їх обґрунтування, виявлені закономірності, аналіз результатів;  
**висновки** — основні підсумки, рекомендації, значення для теорії й практики, перспективи подальших досліджень;  
**список використаної літератури** — перелік літературних джерел, на які є посилання в тексті статті: вказати авторів та назву твору, місце публікації (для книжки — місто та видавництво, для статті — назву збірника чи журналу, його номер та / або випуск), рік публікації, загальну кількість сторінок для книжки або сторінки, на яких надруковано статтю.
9. Виплата авторського гонорару не передбачається.
10. Матеріали, що надійшли до редакції, авторам не повертаються.