

УДК 621.039.584

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

С.В. Алёхина^{1,2}¹Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
г. Харьков, 61046 Украина, ул. Дм. Пожарского, 2/10²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

г. Харьков, 61022, Украина, пл. Свободы, 4

e-mail: alyokhina@ipmach.kharkov.ua

Received June 14, 2013

Рассмотрены возможные аварийные ситуации, связанные с перекрытием вентиляционных каналов контейнеров хранения отработавшего ядерного топлива Запорожской АЭС. Путем решения сопряженных задач теплообмена определены максимальные температуры, достигаемые в контейнере хранения в каждой из рассмотренных аварий. На основе полученных данных предложена система градации аварийных ситуаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отработавшее ядерное топливо, сухое хранение, сопряженная задача теплообмена, тепловое состояние, проектная авария.

THE ANALYSIS OF THERMAL REGIMES OF SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE AT ACCIDENT CONDITIONS

S.V. Alyokhina^{1,2}¹A.M. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine
Ukraine, Kharkiv, Dm. Pozharsky str. 2/10, 61046²V.N. Karazin Kharkov National University

Ukraine, Kharkiv, Svobody sq. 4, 61022

The expected accident conditions with blocking of ventilated channels of spent nuclear fuel storage containers on Zaporizhka NPP were considered. By solving of conjugate heat transfer problems the maximal temperatures inside containers at each of considered accidents were calculated. On base of received results the system of accidents gradation was proposed.

KEY WORDS: spent nuclear fuel, dry storage, conjugate heat transfer problem, thermal state, design basis accident.

АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СУХОГО ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА В АВАРИЙНИХ СИТУАЦІЯХ

С.В. Алюхіна^{1,2}¹Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
м. Харків, 61046, вул. Дм. Пожарського, 2/10, Україна²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

м. Харків, 61022, пл. Свободи, 4, Україна

Розглянуті можливі аварійні ситуації, пов'язані з перекриттям вентиляційних каналів контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива Запорізької АЕС. Шляхом розв'язання спряжених задач теплообміну визначені максимальні температури, що досягаються в контейнері зберігання в кожній з розглянутих аварій. На основі отриманих даних запропонована система градаци аварійних ситуацій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: відпрацьоване ядерне паливо, сухе зберігання, спряжена задача теплообміну, тепловий стан, проектна аварія.

Проблема обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) на сегодняшний день имеет два возможных решения: переработка и хранение (захоронение) [1]. Первый подход используется в странах с замкнутым ядерным топливным циклом (Франция, Россия, Великобритания и др.), второй – с незамкнутым ядерным циклом (США, Украина, Швеция и др.), при этом временное хранение или захоронение ОЯТ зависит от принятой в стране политики обращения с высокоактивными радиоактивными отходами.

Однако в не зависимости от выбранной стратегии обращения с ОЯТ отработавшие топливные сборки все-таки проходят стадию хранения: временного перед отправкой на переработку или длительного (30-50 лет перед окончательным захоронением) [2]. Хранение может осуществляться двумя основными способами: сухим (в специальных контейнерах) и мокрым (в бассейнах выдержки) [3,4]. Каждый из способов имеет свои недостатки и преимущества, но наиболее простым и доступным с экономической точки зрения можно назвать сухое хранение.

Сухое хранение ОЯТ используется во многих странах и, как правило, отработавшее ядерное топливо размещается в специальных контейнерах на открытой или закрытой площадках. Контейнеры для хранения высокоактивных радиоактивных отходов, к которым относится и отработавшее ядерное топливо, имеют множество различных типов и модификаций [4]. Распространенными являются вентилируемые контейнеры, использующие пассивную систему охлаждения. Для больших и малых хранилищ на основе контейнеров такого типа, важным является оценка возможных аварийных ситуаций, связанных с нарушением работы пассивной

системы охлаждения. Тепловой анализ ОЯТ в этом случае проводится для обеспечения безопасных тепловых режимов хранения – одного из составляющих комплексной безопасности установок для обращения с радиоактивными отходами [5].

Целью данной работы является оценка теплового состояния ОЯТ, размещенного для хранения в вентилируемом контейнере, в аварийных ситуациях, связанных с нарушением функционирования пассивной системы охлаждения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вентилируемые контейнеры хранения отработавшего ядерного топлива в большинстве своем имеют типовую структуру [4]. В настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран тип контейнеров, используемых на Запорожской АЭС для временного долгосрочного хранения [6,7].

Схематическое устройство контейнера для хранения ОЯТ изображено на (рис. 1). В каждом контейнере хранится 24 отработавшие топливные сборки (ОТВС), которые вертикально помещаются в шестигранные трубные чехлы (направляющие трубы), являющиеся конструктивными элементами цилиндрической герметичной корзины. Она заполнена гелием, что обеспечивает сухую, инертную, теплопередающую среду в течение всего периода хранения. Корзина размещается в бетонном контейнере. При этом между её корпусом и боковой стенкой контейнера образуется вентиляционный кольцевой канал, в котором происходит передача тепла от стенки корзины к воздуху и за счет естественной тяги тепло выводится из контейнера в окружающее пространство. Контейнеры с ОЯТ хранятся на специальной открытой площадке, расположенной на территории АЭС. Охлаждение отработавшего топлива в течение всего срока хранения осуществляется исключительно пассивным образом, т.е. за счет естественной тяги, и дополнительные охлаждающие системы не предусмотрены.

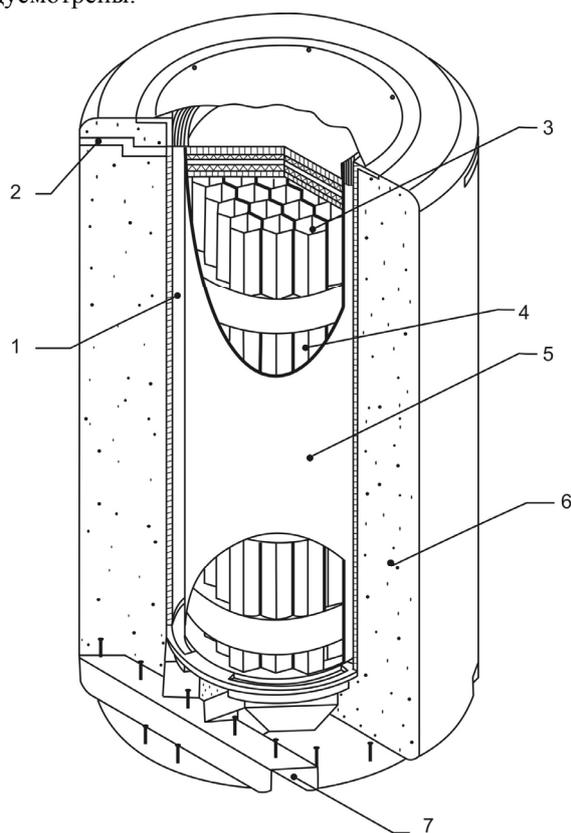


Рис. 1. Структура контейнера хранения ОЯТ:

- 1 – вентиляционный кольцевой канал; 2 – выходной канал;
3 – ОТВС; 4 – направляющие трубы; 5 – корпус герметичной корзины; 6 – корпус контейнера; 7 – входные каналы для охлаждающего воздуха

вентиляционных отверстий.

В данной работе проведен более детальный анализ вероятных аварийных ситуаций, связанных с перекрытием вентиляционных каналов контейнера хранения. Было смоделировано полное перекрытие всех воздухопроводов контейнера, полное перекрытие только входных и только выходных каналов, а также комбинации закупорки верхних и нижних вентиляционных отверстий.

При вводе в эксплуатацию вентилируемых контейнеров хранения ОЯТ проводился анализ последствий возможных аварийных ситуаций в системе ВКХ-ВВЭР. В соответствии с требованиями ПНАЭГ-14-029-91 [8] и НП 306.2.105-2004 [9] в отчете по анализу безопасности сухого хранилища отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ) Запорожской АЭС [6] были рассмотрены нарушения нормальных условий эксплуатации (аномально высокие и аномально низкие температуры атмосферного воздуха, закупорка половины входных каналов и др.), проектные (пожар, наводнение, полная инсоляция при максимально ожидаемой температуре воздуха, полная закупорка входных каналов и др.) и запроектные аварии. Поскольку безопасное (с точки зрения соблюдения тепловых критериев) функционирование системы ВКХ-ВВЭР напрямую зависит от эффективности работы системы вентиляции, то при рассмотрении вероятных аварийных ситуаций особый интерес представляет рассмотрение событий, связанных с повышением температуры атмосферного воздуха, внешним тепловым воздействием и перекрытием вентиляционных каналов. Первые два события достаточно хорошо проанализированы в отчете по анализу безопасности [6], в то время как рассмотрено лишь две аварийные ситуации, связанные с перекрытием вентиляционных каналов – полная и частичная (50%) закупорка входных

МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ

Математическая модель рассматриваемого стационарного теплофизического процесса включает в себя следующие уравнения в частных производных [10]:

- неразрывности;
- движения вязкой жидкости Навье–Стокса;
- энергии;
- теплопроводности;
- лучистого теплообмена.

Для замыкания система дифференциальных уравнений дополняется термическим уравнением состояния в качестве которого можно взять уравнение состояния идеального газа. Для вычисления турбулентных составляющих теплофизических констант используется модель турбулентности $k-\varepsilon$ [11], которая включает в себя два дифференциальных уравнения – для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε . Выбор этой модели турбулентности при исследовании тепловых и газодинамических процессов в вентилируемых контейнерах хранения ОЯТ основан на результатах натурного эксперимента [12].

Расчетная область (рис. 2) представляет собой цилиндрический контейнер с окружающим его воздухом в форме параллелепипеда. На границах расчетной области (границы $\Gamma_1 - \Gamma_5$) заданы атмосферное давление и температура воздуха, соответствующая экстремальным условиям хранения

При расчетах приняты следующие допущения:

1. Корзина хранения рассматривалась как группа однородных тел (зона тепловыделения, оголовков и хвостовик сборок, крышка корзины) с эквивалентной теплопроводностью [11].

2. Окружающая среда была ограничена плоскостями, проходящими на расстоянии от центра рассматриваемого контейнера, равном половине расстояния между двумя соседними контейнерам.

Поскольку наиболее опасными с точки зрения нарушения тепловых режимов хранения являются летние месяцы, задача рассматривалась для максимума летних температур, который для региона Запорожской АЭС составляет 40°C . Атмосферное давление в расчетах принималось равным 101325 Па , что соответствует нормальному атмосферному давлению.

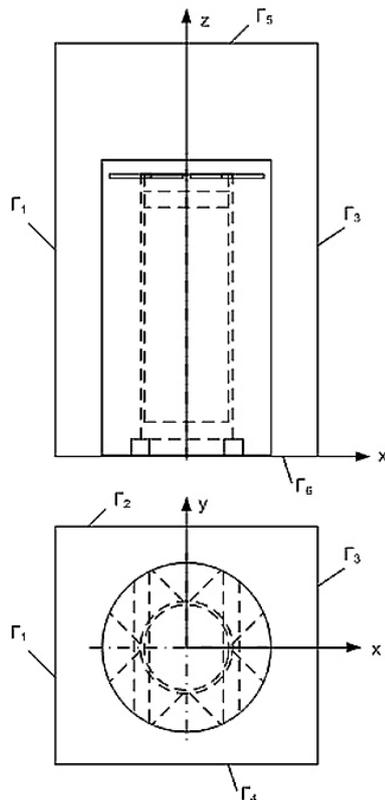


Рис. 2. Расчетная область, используемая при численном моделировании аварийных ситуаций

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

В нормальных условиях эксплуатации при температуре атмосферного воздуха 24°C максимальная температура в корзине хранения составляет $294,3^\circ\text{C}$, при нарушении нормальных условий эксплуатации, когда температура атмосферного воздуха может составить $40^\circ\text{C} - 309,5^\circ\text{C}$. В том случае, когда работе пассивной вентиляционной системы не препятствуют внешние факторы (например, перекрытие входных или выходных вентиляционных каналов, ветер и т.д.), нагретый вентиляционный воздух поднимается вертикально вверх над контейнером и образует так называемый «тепловой факел» (рис. 3). Охлаждение корзины хранения ОЯТ осуществляется под действием механизмов естественной конвекции: холодный атмосферный воздух поступает через нижние вентиляционные отверстия, нагреваясь проходит по кольцевому вентиляционному каналу и выходит через верхние вентиляционные отверстия. Температура выходящего вентиляционного воздуха в каждом из верхних вентиляционных каналов достигает $77,5^\circ\text{C}$ при температуре атмосферного воздуха 24°C и $93,5^\circ\text{C}$ – при 40°C .

Очевидно, что для пассивной системы вентиляции, когда остаточное тепло от отработавших топливных сборок отводится за счет естественной тяги, наиболее опасной является ситуация, связанная с одновременным перекрытием входных и выходных вентиляционных каналов. Как показали результаты моделирования, в этом случае теплоотвод будет осуществляться путем теплопередачи, максимальная температура в корзине хранения составит $438,7^\circ\text{C}$, а средняя температура поверхности бетонного контейнера достигнет 90°C . Такое событие не рассмотрено в [6], однако может быть отнесено к проектным авариям, поскольку может быть обнаружено путем визуального осмотра контейнеров хранения (периодичность плановых проверок СХОЯТ 168 часов) и его последствия не нарушают теплового критерия безопасности для кратковременных тепловых воздействий – максимальная температура в корзине хранения 450°C .

Частичное перекрытие вентиляционных каналов в [6] отнесено к нарушениям нормальных условий эксплуатации. В этом случае была рассмотрена полная закупорка входных (нижних) вентиляционных отверстий. Однако в пассивной системе теплоотвода вентилируемых контейнерах хранения ОЯТ большую роль играют верхние вентиляционные каналы, поскольку именно через них отводится нагретый вентиляционный

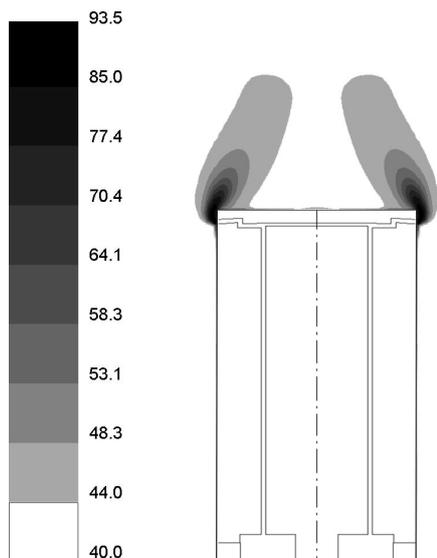


Рис. 3. Температурное поле воздуха, создаваемое одиночным контейнером

воздух. Таким образом, в случае частичного перекрытия вентиляционных каналов, наиболее опасной, с точки зрения соблюдения температурных режимов, будет ситуация, связанная с перекрытием верхних выходных отверстий.

В ходе моделирования тепловых и газодинамических процессов в системе хранения ОЯТ были рассмотрены также различные варианты частичной закупорки вентиляционных каналов контейнера (таблица, черным отмечено количество перекрытых каналов). Наибольшие температуры в корзине хранения были достигнуты в тех случаях, когда рассматривалось полное перекрытие выходных отверстий. Так, например, при перекрытии всех верхних и трех нижних вентиляционных каналов максимальная температура в корзине хранения снижается на 3 градуса, а при открытии всех нижних каналов и перекрытии всех верхних – на 9 градусов по сравнению с полной блокировкой системы вентиляции. Такое незначительное снижение максимальной температуры в корзине хранения объясняется тем, что существует препятствие выходу нагретого вентиляционного воздуха, а охлаждение корзины хранения происходит только в нижней ее части.

В случае полного перекрытия нижних вентиляционных каналов (проектная авария, рассмотренная в [6]) максимальная температура в корзине хранения достигает 438,7 °С, а полученная в результате моделирования структура течения совпадает с данными [6], т.е. два из четырех выходных отверстий начинают работать на прием воздуха. Такая структура течения обеспечивает охлаждение преимущественно верхней части корзины хранения, но благодаря тому, что существует подвод холодного и отвод нагретого воздуха максимальная температура в корзине хранения на 42 градуса ниже, чем при полной блокировке только верхних каналов.

Таблица.

Варианты перекрытия вентиляционных каналов контейнера хранения ОЯТ

		Вариант перекрытия каналов																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
верхние	1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
нижние	1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	4	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Максимальные температуры в корзине хранения для всех рассмотренных вариантов перекрытия каналов приведены на рис. 4.

Основываясь на результатах анализа данных, представленных на рис. 4, аварийные ситуации, связанные с перекрытием вентиляционных каналов, можно разделить на 2 группы. К первой группе (группа А) относятся аварии, в которых полностью блокируется подвод и/или отвод вентиляционного воздуха. Такие аварии вызывают максимальное повышение температуры в корзине хранения, поскольку препятствуют действию механизмов естественной конвекции, которые лежат в основе работы пассивной системы охлаждения. Полная блокировка входных или выходных вентиляционных отверстий повышает температуру в корзине хранения более чем на 140 градусов, что при длительном воздействии может привести к нарушению тепловых критериев безопасности.

Ко второй группе (группа В) относятся аварии с частичным перекрытием верхних или нижних каналов. В этом случае механизмы естественной конвекции работают (холодный вентиляционный воздух подводится через нижние каналы, нагретый – отводится через верхние) и максимальные температуры в корзине хранения существенно ниже. Уровень максимальных температур при авариях второго типа будет зависеть только от расхода вентиляционного воздуха, который сможет обеспечить система вентиляции.

Поскольку действие механизмов естественной конвекции в пассивных системах охлаждения контейнеров хранения высокоактивных радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива не зависит существенно от места расположения вентиляционных каналов и их геометрической формы, система градации аварийных ситуаций, связанных с перекрытием вентиляционных каналов, может использоваться для вентилируемых контейнеров любой конструкции.

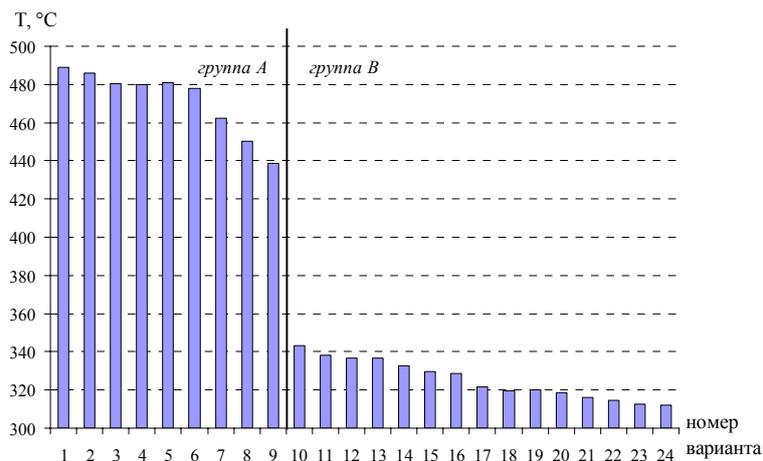


Рис. 4. Максимальные температуры в корзине хранения при различных вариантах перекрытия вентиляционных каналов

ВЫВОДЫ

Возможные аварийные ситуации были рассмотрены для вентилируемых контейнеров хранения ОЯТ, которые используются на Запорожской АЭС, однако, как отмечалось выше, технология контейнерного хранения достаточно распространена в мире и в большинстве случаев отвод тепла из контейнера осуществляется путем естественной конвекции через вентиляционные каналы. Поскольку действие механизмов естественной конвекции в пассивных системах охлаждения контейнеров хранения высокоактивных радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива не зависит от места расположения вентиляционных каналов и их геометрической формы, система градации рассмотренных аварийных ситуаций может использоваться для обеспечения безопасности вентилируемых контейнеров любой модификации.

Предложенная система градации возможных аварийных ситуаций, связанных с перекрытием вентиляционных каналов, позволит повысить эффективность разработки мер предотвращения их последствий, поскольку выявляет ключевые факторы, воздействующие на развитие аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Policies and Strategies for Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series // International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009 – 81 p.
2. Predisposal Management of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards // International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009 – 56 p.
3. Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage. IAEA-TECDOC-1100 // International Atomic Energy Agency, Vienna, 1998 – 103 p.
4. Monograph on Spent Nuclear Fuel Storage Technologies // Institute of Nuclear Materials Management, 1997 – 270 p.
5. Printsipy obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami. Seriya izdaniy po bezopasnosti // Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoy energii, Vena, 1996 – 40 s.
6. Otchet po analizu bezopasnosti sukhogo khranilishcha otrabotavshogo yadernogo topliva Zaporozhskoy AES. Versiya 3.01.1 / OP «Zaporozhskaya AES» – Inv. № 1526(3). – Energodar, 2008 – 624 s.
7. Pravila bezopasnosti pri khranении i transportirovaniy yadernogo topliva na ob'ektakh atomnoy energetiki. PNAE G-14-029-91, utverzhdeny GPAN SSSR, 1991.
8. Osnovni polozhenniya zabezpechenniya bezpeky promizhnykh shovyshh vidprac'ovanogo yadernogo palyva suhogo typu (NP 306.2.105-2004), zatverdzheni nakazom Derzhatomreguljuvannja vid 29.12.04 r. № 198, zarejestrovani v Min'justi za № 49/10329 vid 17.01.05 r.
9. Alyokhina S.V., Goloshchapov V.N., Kostikov A.O., Matsevityy Yu.M. Reshenie sopryazhyennoy zadachi teplomassoobmena pri issledovanii teploвого sostoyaniya ventiliruemogo betonного konteynera s otrabotavshim yadernym toplivom // Problemy mashinostroeniya. – 2005. – T.8, № 4. – S. 12 – 20.
10. Launder B.E. The Numerical Computation of Turbulent Flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Eng. – 1974. – № 3. – P. 269–289.
11. Wataru M., Takeda H., Shirai K., Saegusa T. Thermal hydraulic analysis compared with tests of full-scale concrete casks // Nuclear Engineering and Design – 2008. – № 238. – P. 1213–1219.
12. Alyokhina S.V., Voronina V.A., Goloshchapov V.N., Kostikov A.O. Opredelenie ekvivalentnoy teploprovodnosti mnogomestnoy germetichnoy korziny khraneniya otrabotavshogo yadernogo topliva putem resheniya obratnoy zadachi // Yaderna ta radiatsiyna bezpeka. – 2009. – T.12. – Vyp. 4. – S. 48–51.