

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ АВАРИЙНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ

**А.М. Бахметьев, М.А. Большухин, А.М. Хизбуллин, М.А. Камнев**  
*ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород*



Получены экспериментальные зависимости значений коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на  $S$ -образной теплообменной поверхности системы снижения аварийного давления в защитной оболочке от относительной массовой концентрации воздуха в паре от 0.27 до 0.7 и плотности теплового потока через теплообменную поверхность от 3 до 22 кВт/м<sup>2</sup>. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных значений теплоотдачи от величины массовой концентрации воздуха в паре с расчетными соотношениями. Предложены расчетные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на  $S$ -образной теплообменной поверхности системы пассивного отвода тепла.

**Ключевые слова:** система пассивного отвода тепла, тепломассообмен, конденсация, неконденсирующиеся газы, экспериментальная установка, замыкающие соотношения.

**Key words:** passive heat removal system, heat-mass exchange, condensation, noncondensable gases, experimental facility, closure equation.

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки определяется процессами теплообмена при конденсации пара на теплообменной поверхности в присутствии неконденсирующихся газов, выделяющихся в процессе аварии с потерей теплоносителя, и изначально содержащегося воздуха в объеме защитной оболочки. В статье изложены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на теплообменной поверхности системы снижения аварийного давления в защитной оболочке реакторной установки КЛТ-40С.

© *А.М. Бахметьев, М.А. Большухин, А.М. Хизбуллин, М.А. Камнев, 2011*

Задачи экспериментальных исследований:

- исследование теплоотдачи в зависимости от концентрации воздуха в модели защитной оболочки;
- исследование теплоотдачи в зависимости от плотности теплового потока через теплообменную поверхность системы снижения аварийного давления;
- сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами расчетов по соотношениям, предлагаемым для оценки теплоотдачи при конденсации пара на теплообменных поверхностях в защитной оболочке и в присутствии неконденсирующихся газов;
- разработка и получение замыкающих соотношений.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования выполнены на полномасштабном экспериментальном стенде, подробное описание которого приведено в [1, 2]. В условиях проведения исследований теплообменная поверхность системы снижения аварийного давления помещалась в модель защитной оболочки. Объем модели равен  $60 \text{ м}^3$ , высота 8 м. Теплообменная поверхность по геометрическим размерам выбрана аналогичной штатному теплообменнику системы снижения аварийного давления

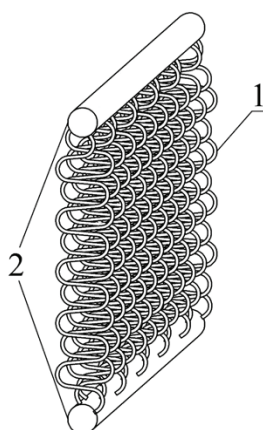


Рис. 1. Теплообменная поверхность системы снижения аварийного давления в защитной оболочке: 1 – набор S-образных труб; 2 – коллекторы

и состоит из набора S-образных труб диаметром  $18 \times 2 \text{ мм}$  и длиной  $3540 \text{ мм}$  (рис. 1). Шаг между змеевиками составлял  $40 \text{ мм}$ , площадь теплообменной поверхности  $42 \text{ м}^2$ . Сверху и снизу трубная система теплообменника объединялась коллекторами из прямых труб внутренним диаметром  $120 \text{ мм}$  (рис. 1). Коллекторы теплообменной поверхности соединялись трубопроводами с баком запаса воды, образуя контур охлаждения.

В модели защитной оболочки создавались параметры парогазовой среды, имитирующие и превышающие аварийные условия в защитной оболочке реакторной установки КЛТ-40С при авариях с потерей теплоносителя. Давление в объеме модели защитной оболочки увеличивалось от атмосферного до  $650 \text{ кПа}$ , температура парогазовой смеси составляла  $115\text{--}135^\circ\text{C}$ . Относительная массовая концентрация воздуха в модели защитной оболочки изменялась в диапазоне от  $0.27$  до  $0.7$  при плотности теплового потока через теплообменную поверхность от  $3$  до  $22 \text{ кВт/м}^2$ . В контуре охлаждения осуществлялась естественная циркуляция с расходом воды до  $9 \text{ кг/с}$ .

Системой контроля температуры проводилось измерение температурных полей паровоздушной смеси по высоте теплообменной поверхности и объему модели защитной оболочки. Система функционировала на основе устройств распределенного сбора данных ADAM-5000E с модулями ввода сигналов термодатчиков ADAM-5018SK. Общее количество термопреобразователей, установленных в модели защитной оболочки, составляло  $90$  штук, термопреобразователи имели индивидуальную градуировку и погрешность измерений  $\pm 0.9^\circ\text{C}$ . Относительная погрешность определения расхода охлаждающей воды в контуре охлаждения не превышала  $1\%$ .

**ИСКОМЫЕ СООТНОШЕНИЯ**

При обработке экспериментальных данных определялось среднее по высоте теплообменной поверхности парциальное давление воздуха парогазовой смеси как разность между общим давлением в модели защитной оболочки и давлением насыщенного пара в смеси  $P_{\text{возд}} - P_{\text{зо}} - P_{\text{нас}}$  кПа. Общее давление в модели защитной оболочки определялось по показаниям преобразователя давления. Давление насыщенного пара в смеси  $P_{\text{нас}}$  определялось по усредненной температуре парогазовой смеси в объеме защитной оболочки, приравняваемой температуре насыщения при парциальном давлении пара.

Относительная массовая концентрация воздуха определялась через давление и молекулярную массу пара ( $M_{\text{пара}}$ ) и воздуха ( $M_{\text{возд}}$ ) в объеме модели защитной

$$\text{оболочки, } W_{\text{возд}} = \frac{P_{\text{возд}} \cdot M_{\text{возд}}}{(P_{\text{возд}} \cdot M_{\text{возд}} + P_{\text{нас}} \cdot M_{\text{пара}})}.$$

Экспериментальный коэффициент теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на теплообменной поверхности определялся методом «теплообменника». При этом коэффициент теплоотдачи в трубах находился через критерий Нуссельта для ламинарного и турбулентного режимов течения воды с учетом критерия Дина, характеризующего влияние кривизны S-образных каналов на поток воды [3]. Максимальное среднеквадратичное отклонение случайной погрешности измерения коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на теплообменной поверхности составляло 15.4%.

Следует отметить, что существует два основных подхода в определении теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на теплообменных поверхностях. Первый подход основан на использовании эмпирических соотношений, полученных экспериментально на различных установках и связывающих общий коэффициент теплоотдачи с параметрами парогазовой смеси в защитной оболочке (табл. 1) [4–7].

Таблица 1

**Эмпирические соотношения для определения теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси**

Общий коэффициент теплоотдачи, Вт/м <sup>2</sup> ·°С	
$\alpha = 380 \left( \frac{W_{\text{возд}}}{1 - W_{\text{возд}}} \right)^{-0.7}$	(1)
$\alpha = 430 \left( \frac{W_{\text{возд}}}{1 - W_{\text{возд}}} \right)^{-0.8}$	(2)
$\alpha = \frac{l^{0.05} [(3.7 + 0.29274 \cdot P_{\text{зо}}) - (2438 + 4.6746 \cdot P_{\text{зо}}) \log W_{\text{возд}}]}{(t_{\text{прс}} - t_{\text{ст}})^{0.25}}$	(3)
$l$ – линейный размер, м; $t_{\text{ст}}$ – наружная температура стенки, °С	
$\alpha = 55.653 \cdot \varepsilon_{\text{n}}^{2.344} (P_{\text{зо}} \cdot 1000)^{0.252} (t_{\text{прс}} - t_{\text{ст}})^{0.307}$	(4)
$\varepsilon_{\text{n}}$ – мольная концентрация пара	

При втором подходе (полуэмпирическом) предполагается описание термических сопротивлений на границе раздела теплообменная поверхность-парогазовая смесь с использованием пленочной теории и аналогии процессов тепломассооб-

мена. Коэффициент теплоотдачи в этом случае определяется двумя термическими сопротивлениями: сопротивлением пленки конденсата ( $1/\alpha_{пл}$ ) и сопротивлением подвода пара к поверхности конденсации – диффузионным термическим сопротивлением ( $1/\alpha_{диф.слой}$ ), которое состоит из конвективной и конденсационной частей ( $1/(\alpha_{диф.слой} + \alpha_{конд})$ ) [7, 8]. Общая формула имеет вид

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{пл}} + \frac{1}{\alpha_{диф.слой}}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{пл}} + \frac{1}{(\alpha_{конв} + \alpha_{конд})}}, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации пара определяется по уравнениям Нуссельта для конденсации чистого пара при ламинарном и турбулентном режимах течения конденсатной пленки с поправками на переменность физических свойств и волновой характер течения пленки [3]. Конвективная часть характеризует естественную конвекцию пара к поверхности конденсации и определяется зависимостью  $Nu = f(GrPr)$ , где  $Gr$  – число Грасгофа и  $Pr$  – число Прандтля [9, 10]. Конденсационная часть характеризует подвод тепла за счет конденсации пара и определяется по аналогии процессов теплообмена с определением диффузионного числа Нуссельта ( $Nu_d$ ) и уравнениям диффузии. Принимается, что пар поступает к поверхности конденсации за счет диффузии, и поверхность пленки является непроницаемой для воздуха [11]. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{конд}$

находят по соотношению  $\alpha_{конд} = \frac{j_n \cdot r}{(t_{пгс} - t_{гр.разд})}$ , Вт/(м<sup>2</sup> °C) ( $j_n$  – массовый поток пара, кг/м<sup>2</sup>·с;  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $t_{гр.разд}$  – температура на поверхности конденсатной пленки, °C).

Массовый поток пара, поступающий через диффузионный слой к поверхности конденсации, определяют по формуле Стефана [12]. Обобщающее соотношение для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на границе раздела пленка-паровоздушная смесь в диффузионном слое имеет вид

$$\alpha_{конд} = \frac{Nu_d \cdot D \cdot (P_{зо} \cdot 1000) \cdot r}{l \cdot R_n \cdot (t_{пгс} + 273)} \cdot \frac{1}{(t_{пгс} - t_{гр.разд})} \cdot \ln \left( \frac{P_{возд.гр.разд}}{P_{возд.пгс}} \right), \text{ Вт/(м}^2\text{ °C)}, \quad (6)$$

где  $P_{возд.гр.разд}$  и  $P_{возд.пгс}$  – парциальное давление воздуха на поверхности пленки конденсата и в объеме парогазовой смеси, кПа;  $R_n$  – газовая постоянная для пара, Дж/кг·К;  $D$  – коэффициент диффузии. Для смеси пар-воздух

$$D = 0.24 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{P_0}{P_{зо}} \left( \frac{t_{пгс} + 273}{273} \right)^{1.75}, \text{ м}^2/\text{с}; P_0 \text{ – давление в нормальных условиях, кПа;}$$

$r$  – теплота парообразования, Дж/кг.

Соотношение (5) может быть представлено с учетом эмпирических поправок по результатам экспериментальных данных. Например, в работе [8] предлагается соотношение для определения теплоотдачи на стенках локализирующего объема

$$\alpha_{диф.сл.} = 0.007 \cdot \frac{r \cdot k}{(P_{зо} / 100)^{0.33}} \left( \frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} \right)^{0.5} \cdot 0.0355 \left( \frac{(t_{пгс} + t_{гр.разд}) / 2}{100} \right)^{3.2}, \text{ Вт/(м}^2\text{ °C)} \quad (7)$$

где  $k = \min \left( 1, \left( \frac{t_{нас} - t_{ст}}{20} \right)^{0.33} \right)$  – поправочный коэффициент;  $\varepsilon_r$  – мольная концентрация воздуха.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На рисунке 2 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи со стороны паровоздушной смеси от относительной массовой концентрации воздуха в модели защитной оболочки. При повышенной концентрации воздуха  $W_{\text{возд}} = 0.7$  коэффициент теплоотдачи соответствует  $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$ . С уменьшением концентрации воздуха термическое сопротивление парогазового диффузионного слоя за счет уменьшения его толщины снижается. Количество пара, контактирующего с теплообменной поверхностью, возрастает. Термическое сопротивление конденсатной пленки за счет наличия горизонтальных участков и поверхности с малым радиусомгиба труб оказывает незначительное влияние на теплообмен и доступ пара к поверхности конденсации. Так, при значении относительной массовой концентрации воздуха в модели защитной оболочки  $W_{\text{возд}} = 0.27$  коэффициент теплоотдачи соответствует  $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{°C})$ .

Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами расчетов по соотношениям (1)–(7) в зависимости от относительной массовой концентрации воздуха (рис. 3). В расчетных соотношениях принимались параметры, соответствующие измеряемым значениям давления, температуры парогазовой смеси, относительной массовой и мольной концентрации воздуха в модели защитной оболочки в условиях эксперимента.

Как видно из рисунка, расчет по соотношениям (1)–(3) и (5), (7) показывает занижение расчетных коэффициентов теплоотдачи относительно экспериментальных точек. Например, для соотношений (1) и (2) уменьшение расчетных от экспериментальных значений теплоотдачи составляет 1.5–2 раза, а для соотношений (3) и (5), (7), графические зависимости которых практически полностью совпадают друг с другом, отличие составляет 20–30%. Вычисление теплоотдачи по эмпирическому соотношению (4) определяется практически линейной характеристикой, которая в среднем лежит выше экспериментальных точек на 10%, но пересекает их при граничных концентрациях воздуха ( $W_{\text{возд}} = 0.27$  и  $0.7$ ).

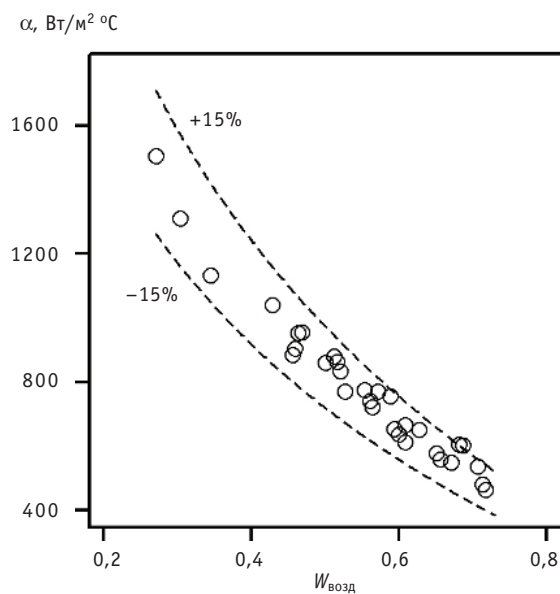


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси от относительной массовой концентрации воздуха в модели защитной оболочки

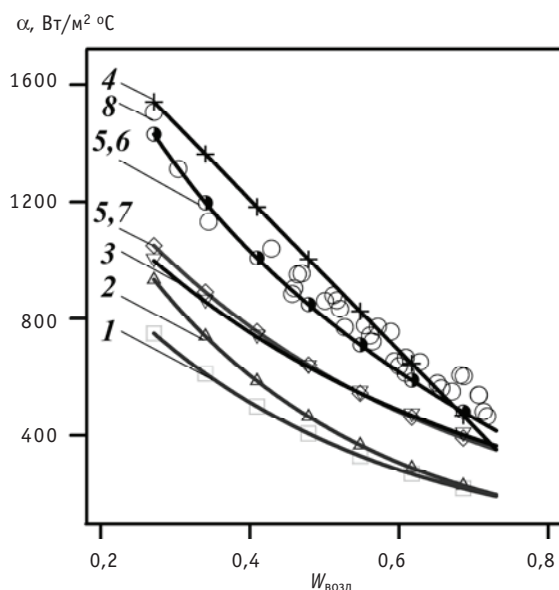


Рис. 3. Сравнительный график зависимости экспериментальных и расчетных значений теплоотдачи от относительной массовой концентрации воздуха: 1 – 4, 5, 6 и 5, 7 – расчетные зависимости, нумерация которых соответствует нумерации расчетных соотношений в тексте; 8 – экспериментальные точки

Результаты сравнения показывают преимущество использования полуэмпирической методологии расчета теплоотдачи при конденсации пара в присутствии воздуха с определением теплоотдачи по соотношениям (5), (6). Полученная графическая зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальные точки в исследуемом диапазоне относительной массовой концентрации воздуха. Следует отметить, что эмпирическим параметром в соотношении (6) является диффузионное число Нуссельта, для определения которого используются зависимости конвективного теплообмена, в которых число Прандтля заменяется на число Прандтля диффузионное  $Pr_d = \frac{\nu}{D}$ . Так, в диапазоне  $10^3 < GrPr < 1 \cdot 10^8$  для рассматриваемой теплообменной поверхности диффузионное число Нуссельта определяется по выражению  $Nu_d = 0.54(GrPr_d)^{0.25}$ .

На рисунке 4 представлены экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси от плотности теплового потока через теплообменную поверхность. Зависимости имеют линейную возрастающую характеристику для каждого диапазона относительной массовой концентрации воздуха, соответственно, чем больше плотность теплового потока, тем выше коэффициент теплоотдачи. Интенсификация теплообмена с увеличением плотности теплового потока объясняется увеличением массового потока пара к поверхности конденсации. Одинаковый угол наклона кривых позволил аппроксимировать экспериментальные данные и получить эмпирическую зависимость, связывающую общий коэффициент теплоотдачи при конденсации пара со стороны паровоздушной смеси с относительной массовой концентрацией воздуха и плотностью теплового потока. Аналогичный подход определения коэффициента теплоотдачи через концентрацию неконденсирующихся газов и плотность теплового потока предлагается для оценки среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на трубчатке парогенератора в присутствии водорода [13]. Обобщенное соотношение имеет вид

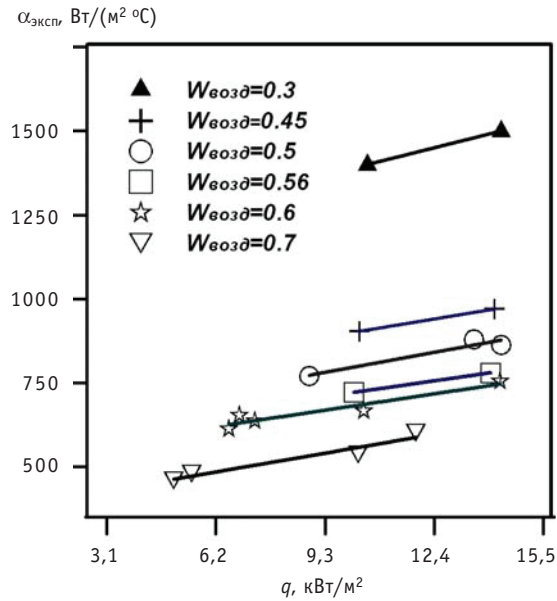


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока через теплообменную поверхность в диапазоне изменения относительной массовой концентрации воздуха 0.3–0.7

$$\alpha = 55 \cdot \frac{q^{0.22}}{W_{\text{возд}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}), \quad (8)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

В диапазоне параметров  $0.27 < W_{\text{возд}} < 0.7$  и  $3000 < q < 16000$  Вт/м<sup>2</sup> расчет теплоотдачи по соотношению (8) описывает экспериментальные точки в пределе отклонения  $\pm 10\%$  (рис. 5).

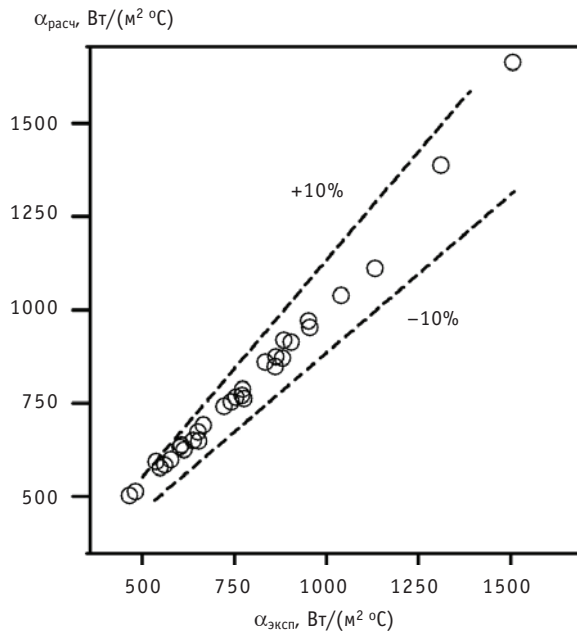


Рис. 5. Зависимость расчетных значений коэффициента теплоотдачи по соотношению (8) от экспериментальных

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Получены экспериментальные зависимости значений коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на теплообменной поверхности системы снижения аварийного давления от относительной массовой концентрации воздуха и плотности теплового потока.

Проведен сравнительный анализ экспериментальных значений коэффициентов теплоотдачи с расчетными значениями. Показаны консерватизм большинства рассматриваемых расчетных значений теплоотдачи относительно экспериментальных и предпочтение для использования полуэмпирической методологии расчета теплоотдачи с определением диффузионного числа Нуссельта по зависимостям конвективного теплообмена.

**Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект 08-08-01024.**

**Литература**

1. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Вахрушев В.В. и др. Экспериментальное обоснование контура охлаждения системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки проекта АЭС-2006 на площадке Ленинградской АЭС//Атомная энергия. – 2009. – Т.106. – Вып. 3. – С.148-152.
2. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Хизбуллин А.М., Камнев М.А. Экспериментальное исследование пассивной системы снижения аварийного давления в защитной оболочке РУ КЛТ-40С//Атомная энергия. – 2010. – Т.108. – Вып. 5. – С. 284-288.
3. РТМ 108.031.05-84. Оборудование теплообменное АЭС. Расчет тепловой и гидравлический. НПО ЦКТИ, 1986.
4. De la Rosa J.C., Escrivá A., Herranz L.E., Cicero T., Munoz-Cobo J.L. Review on condensation on the containment structures//Progress in Nuclear Energy. – 2009. – 51. – 32-66.
5. Arijit Ganguli, Patel A.G., Maheshwari N.K., Pandit A.B. Theoretical modeling of condensation of steam outside different vertical geometries (tube, flat, plates) in the presence of noncondensable gases like air and helium//Nucl. Eng. and Des., 238, 2008, p.2328-2340.
6. Herranz L.E., Anderson M.H., Corradini M.L. A diffusion layer model for steam condensation within the AP600 containment. Nucl. Eng. and Des., 183, 1998, 133-150.
7. Liu H., Todreas N.E., Driscoll M.J. An experimental investigation of a passive cooling unit for nuclear plant containment//Nucl. Eng. and Des. – 2000. – 199. – 243-255.
8. Фальков А.А., Балунов Б.Ф. Исследование конденсации пара из паровоздушной смеси на стенках локализирующего объема/Тезисы докладов Межведомственной конференции «Теплофизика-92» (Обнинск, 20-22 октября 1992).
9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970.
10. РБ-040-09, «Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок». – М.: НТЦ ЯРБ, 2009.
11. Крюков А.П., Левашов В.Ю., Павлюкевич Н.В. Конденсация из парогазовой смеси//Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – №4.
12. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1978.
13. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомизда, 2001.

Поступила в редакцию 8.08.2011



gas processing, chemical industry, transport, nuclear power engineering, defense industry) is to detect leaks of combustible gases in the early stages. The system allowing one to detect small concentrations of combustible gases in air is capable of detecting an accident situation at an early stage. In the event of timely taken actions, such diagnostics can help prevent the accident situation or confine it in the early stages of its development.

Currently the systems based on capsular solid-electrolyte sensors are under development in the SSC RF-IPPE, which are capable of meeting these requirements.

The sensors monitor the oxygen content in gas including combustible impurities as well and provide the opportunity to make early detection of small concentrations of such impurities.

#### **УДК 621.039.7**

*SHS-Immobilization of High-Level Waste of An-Tc Fraction into Ceramic-Metal Matrix Materials* \ E.E. Konovalov, T.O. Mishevets, S.V. Yudinsev, B.S. Nikonov, Yu.D. Boltoev, S.S. Shulepov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The study has been performed into metallothermic processes of ceramic-metal (cermets) matrices synthesis for immobilization of Nd, Sm and Re simulating actinides (An) and  $^{99}\text{Tc}$  of high-level waste (HLW) produced in the mode of self-propagating high-temperature synthesis. These matrices include mineral-like formations having the structure of garnet and pyrochlore fixing neodymium and samarium and alloys fixing rhenium. They are designed for long-term isolation of HLW from the environment.

#### **УДК 621.039.7**

*Immobilization of Uranium Wastes into Glass-Crystal Matrix Using the Self-Propagating High Temperature Synthesis* \ E.E. Konovalov, T.O. Mishevets, S.V. Yudinsev, B.S. Nikonov, Yu.D. Boltoev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The study has been performed into the immobilization of uranium waste into glass-crystal matrix material using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS). Waste reprocessing involved the use of sorbent based on heat-treated silica gel enriched with uranium from liquid waste. The structure of synthesized matrix materials has been investigated by X-ray fluorescence analysis and scanning electron microscopy.

#### **УДК 631.438: 621.41**

*The Influence of Physico-Chemical Properties of Soils on the Bioavailability of  $^{60}\text{Co}$*  \ I.V. Kochetkov, V.S. Anisimov, I.A. Krikunov, M.V. Eremin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 3 tables. – References, 6 titles.

The role of physico-chemical parameters of soils in the accumulation of  $^{60}\text{Co}$  by plants (barley) was defined. A method for scoring the buffering capacity of soils as for  $^{60}\text{Co}$  contamination was proposed. It is based on dependence between the main physico-chemical soil properties and accumulation of the radionuclide in plants (barley). Soils are ranked according to the buffering capacity with respect to  $^{60}\text{Co}$ .

#### **УДК 621.039.586**

*Studies of Shutdown BN Reactor Cooling-Down Modes* \ E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov, S.M. Dmitriev, S.L. Osipov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles. Emergency cooling modes of shutdown reactor and conditions for coolant natural circulation development are considered.

#### **УДК 621.039.58**

*Experimental Investigations of Heat Transfer for the Case with Steam Condensing from the Steam-Air Mixture on the Heat-Exchange Surface of the Containment Emergency Pressure Reduction System* \ A.M. Bakhmetyev, M.A. Bolshukhin, A.M. Hizbullin, M.A. Kamnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table. – References, 13 titles.

Presented are experimental investigation results for heat transfer for a case with steam condensing from a steam-air mixture on an S-shaped heat-exchange surface of the containment emergency pressure reduction system. The investigations were conducted in the air mass concentration range of 0.270.7

in the containment model; steam-water mixture pressure of atmospheric pressure 650 кPa; and heat flux density of 322 KW/m<sup>2</sup>. Given are comparative analysis results for obtained experimental and calculated heat transfer values; closing correlations are proposed.

#### УДК 532.526.4: 621.039.534

*Investigation of Supercritical Parameters Water Flow Problem by the ANSYS-CFX and Star-CD Codes \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V. Ukraintsev, A.N. Yarkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table, 13 illustrations. – References, 8 titles.*

Results of analysis of evaluations made by codes ANSYS-CFX and STAR-CD for water flow with supercritical parameters with experimental data of the State Research Center «Institute of Physics and Power Engineering» are presented. Evaluations were carried out with the use of five model of turbulence. It is shown that calculation results are in satisfactory accordance with experimental data. The problem of forming the M-type profile of velocity is considered separately.

#### УДК 621.039.54

*Increase of Burn-up and Proliferation Protection of Light Water Reactors Fuel at Combined Introduction of <sup>231</sup>Pa and <sup>237</sup>Np into its Composition \G.G. Kulikov, E.G. Kulikov, E.F. Kryuchkov, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 12 illustrations. – References, 13 titles.*

It is founded the use of nuclides <sup>231</sup>Pa and <sup>237</sup>Np in fuel composition of light water reactors as burnable absorbers, which allow us to reduce initial reactivity excess, increase essentially fuel lifetime and reach ultra high fuel burn-up as well strengthen proliferation protection of fuel.

Introduce of <sup>237</sup>Np into fuel composition would allow decreasing requirements of <sup>231</sup>Pa content which is difficult of access in considerable amounts. While <sup>237</sup>Np is in spent fuel of nuclear power plants and at present time is not used and is a problem in respect to its storage and processing. So it is expedient to review ways of its involving into nuclear fuel cycle.

#### УДК 621.039.543.4

*Introduction of Reprocessed Uranium into Fuel Composition of Light-Water Reactors as a Protective Measure Against Proliferation \A.Yu. Smirnov, V.A. Apse, V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, A.N. Shmelev, A.A. Dudnikov, E.A. Ivanov, V.A. Nevinitza, N.N. Ponomarev-Stepnoi; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.*

The paper presents a physical principle for development of advanced LWR fuel with inherent resistance to unauthorized usage and proliferation of uranium-based nuclear materials. Key point of the principle consists in the use of reprocessed uranium extracted from spent fuel in fabrication of fresh fuel assemblies for export deliveries. Introduction of reprocessed uranium into fresh uranium fuel compositions can complicate substantially any diversions of nuclear materials from fuel assemblies thanks to the presence of uranium isotope <sup>232</sup>U in reprocessed uranium. Any attempts of uranium re-enrichment up to the weapon-grade level will fail because of rapid increase of <sup>232</sup>U content and its high-energy gamma-radiation. This technical measure, in combination with restricted accessibility of isotope separation technologies concentrated in the International nuclear technology centers and unification of requirements to dose rates of ionizing radiation from fresh fuel assemblies, can reduce significantly the proliferation risk related to export deliveries of low-enriched uranium fuel.

#### УДК 621.039.52.034.3

*Studies of Electromagnetic Suspension of Turbomachine's Rotor for Nuclear Power Plant with High Temperature Reactor and Gas-Turbine Cycle \N.G. Kodochigov, S.M. Dmitriev, I.V. Drumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 14 titles.*

Prospects of applying of a direct gas-turbine cycle for nuclear power plants with high-temperature gas-cooled reactors are analyzed in this paper. Here are described the basic characteristics and requirements of a design, which provide a high level к.п.д of such type of reactors with direct gas-turbine cycle and its advantage in comparison with similar designs with steam-turbine installations. Data about development of the technology in the countries, which design and maintain high-temperature gas-cooled reactors, are cited.