
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 536.242

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ В СИСТЕМАХ ОТВОДА ТЕПЛА В ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ, СОПРОВОЖДАЕМЫХ ПЛАВЛЕНИЕМ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

© 2017 А.Л. Сироткина, Е.Д. Федорович, В.В. Сергеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты оценки перспектив применения нанодисперсных жидкостей (наножидкостей, НЖ) в системах безопасности АЭС, в частности, в системе аварийного охлаждения корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны. Оценка основана на результатах проведенных авторами доклада экспериментов и теоретического моделирования, краткое описание которых дано в начале статьи.

Ключевые слова: удержание кориума, наножидкость, системы безопасности, кризис кипения, критический тепловой поток.

Поступила в редакцию: 06.05.2017

ВВЕДЕНИЕ

В течение всего периода развития техники и технологий человек стремился к тому, чтобы создаваемое им энергетическое оборудование имело большую мощность при меньших размерах, чем обусловлена необходимостью постоянного поиска все новых способов интенсификации теплообмена. Особую важность проблема имеет в атомной энергетике и атомной технике, в частности, в системах безопасности АЭС, чьей основной функцией является недопущение перегрева и пережога тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), предупреждение и смягчение последствий аварий.

Кипение, особенно пузырьковое, является одним из наиболее эффективных механизмов теплоотвода от высоконапряженных поверхностей нагрева. При этом имеются существенные ограничения по отводимому тепловому потоку, связанные с возникновением кризиса теплообмена (здесь и далее под словом «кризис» имеется в виду кризис кипения 1-го рода – резкий переход от пузырькового кипения к пленочному, сопровождающийся скачкообразным ростом температуры поверхности с возможным ее пережогом). Математическое моделирование процессов кипения и кризиса кипения – чрезвычайно сложно, поскольку, фактически, имеет место взаимодействие трех фаз – жидкости, пара и твердого тела, на котором происходит кипение. Традиционные подходы к описанию этих явлений включают в себя только свойства жидкости и пара; свойства твердой поверхности учитываются некоторыми поправками, базирующимися на экспериментальных данных, либо не учитываются вовсе, несмотря на то, что влияние свойств поверхности на теплообмен при кипении и кризис отмечалось еще в работах С.С. Кутателадзе [1].

Проблема включения свойств поверхности в корреляции для расчета теплообмена при кипении и критического теплового потока (КТП) в последние годы стала чрезвычайно актуальной (например, см. [2-3]) из-за появления нового типа теплоносителей, оказывающих влияние на теплообменную поверхность. К таким

теплоносителям относят нанодисперсные жидкости (наножидкости, НЖ) – чаще всего водные (либо на основе органических жидкостей) дисперсии наночастиц (частиц с размерами 100 нм и менее).

Одной из наиболее интересных с практической точки зрения особенностей НЖ является способность существенно (до двух и более раз) увеличивать критическую плотность теплового потока при кипении. Замечено, что основной причиной этого является слой на теплообменной поверхности, образующийся непосредственно в ходе кипения [2-5]. Влияние этого слоя сводится к трем основным факторам:

- за счет специфической морфологии поверхности значительно увеличивается шероховатость и улучшается смачиваемость;
- структура покрытия – пористая, что обеспечивает дополнительный подвод жидкости к поверхности нагрева за счет капиллярных сил;
- нанослой сам по себе зачастую обладает достаточно низкой теплопроводностью и вносит дополнительное термическое сопротивление между обогреваемой поверхностью и жидкостью; однако, учитывая микронную толщину слоя, этот фактор невелик.

Для практического использования в энергетическом оборудовании интересны не столько сами наножидкости, сколько наноструктурированные поверхности (поверхности с пористым покрытием из наночастиц). Стоит отметить, что формирование покрытий подобного рода возможно не только при кипении НЖ:

- группа Дж. Буонджиорно в Массачусетском технологическом институте (США) синтезировали пористый слой, по форме аналогичный осадку, образующемуся на тепловыделяющих элементах в ходе эксплуатации, путем послойного осаждения частиц на подложку [6];
- в работе [7] продемонстрирована возможность получения покрытия подобного типа электрофорезным методом (ElectroPhoretic Deposition, EPD).

Однако данные методы являются достаточно дорогостоящими и не позволяют получить такие же высокие значения КТП, как в случае слоя, сформированного при кипении НЖ. Таким образом, в настоящее время задача исследования образования и свойств нанопокрыва, получаемого путем осаждения при кипении НЖ, а также возрастания КТП в элементах энергетического оборудования с поверхностями нагрева, обработанными подобным образом, является крайне актуальной с точки зрения дальнейшего практического применения наноструктурированных поверхностей в энергетике и технике.

1 ЦЕЛЬ И МЕТОД

Целью исследования, результаты которого изложены в настоящей статье, является оценка возможного повышения эффективности отвода тепла от корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны (стратегия удержания кориума внутри корпуса – «In-Vessel Retention Strategy»), в двух вариантах:

- при использовании НЖ в качестве теплоносителя системы;
- при предварительном нанесении нанопокрыва на корпус реактора (а в качестве теплоносителя системы – дистиллят).

На рисунке 1 представлена схема организации отвода тепла от корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны (на примере легководного корпусного реактора [8]).

Достижение критической плотности теплового потока от кориума к охлаждающей среде приведет к проплавлению корпуса и выходу высокоактивных веществ в

герметичную оболочку. Отсюда следует, что надежность работы данной системы (и вообще реализация «стратегии удержания») напрямую зависит от величины КТП.

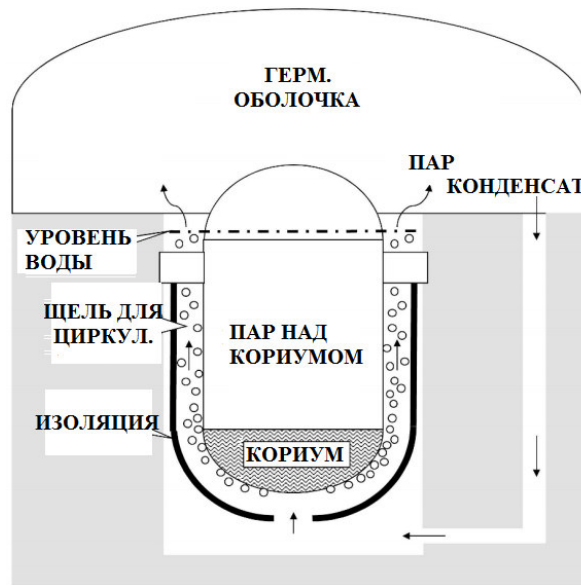


Рис. 1. – Схема организации отвода тепла от корпуса реактора в запроектных авариях [2]

Оценка повышения КТП при использовании наножидкости как теплоносителя системы базируется на разработанной авторами теоретической модели, связывающей режимные параметры кипения (величину плотности теплового потока, концентрацию НЖ, время кипения) со свойствами образующегося нанопокртия и величиной КТП. Ниже приведено краткое описание модели.

Процесс образования нанослоя на обогреваемой поверхности при кипении НЖ условно разделяется на 4 стадии:

СТАДИЯ 1. «ИСХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ»

Рассматриваемая система состоит из обогреваемой поверхности и дисперсии наночастиц (наножидкости) малой концентрации (ниже 0,1% об.).

Изначально поверхность нагревателя – гладкая, с равномерно распределенными центрами парообразования (например, адсорбированными атомами/молекулами газов). Поверхность обогревается; ее перегрев достаточен для начала пузырькового кипения.

Дисперсия прогрета до температуры насыщения. Невысокая концентрация позволяет принять допущение, что теплофизические свойства дисперсии не отличаются от свойств базовой жидкости (дистиллята в данном случае).

Осаждение частиц на поверхность при однофазной конвекции наножидкости отсутствует (что подтверждается данными, опубликованными в литературе, и собственными наблюдениями автора в ходе проведения экспериментальных работ). Это может объясняться, в частности, следующим образом: частицы в дисперсии движутся хаотически, концентрация их мала. Соответственно, мала и вероятность взаимодействия друг с другом и с поверхностью.

СТАДИЯ 2. «ПЕРВЫЕ ПАРОВЫЕ ПУЗЫРИ»

Равномерность распределения центров парообразования на исходной поверхности нагрева означает, что возникновение пузыря равновероятно в любом месте

поверхности. Пузырь возникает с радиусом, равным критическому R_* , и растет до размера, равного отрывному диаметру D_0 . На этой стадии для вычисления D_0 еще может быть использована широко распространенная модель Фритца [9].

При испарении дисперсии в пузырь НЧ, находившиеся в данном объеме дисперсии, частично переходят в жидкий микрослой под пузырем, откуда оседают при выпаривании этого микрослоя (рис. 2):



Рис. 2. – Одиночные паровые пузыри в НЖ (Стадия 2 процесса)

Количество частиц, перешедших из пара в микрослой под пузырем, учтем коэффициентом ξ , равным отношению времени образования монослоя на поверхности нагревателя при 100%-ном оседании частиц к реальному времени образования слоя. Этот коэффициент далее будет вычислен с использованием полученных авторами настоящей статьи экспериментальных данных по толщине нанослоя, образовавшегося на поверхности нагревателя при определенных условиях (время, тепловой поток, концентрация).

СТАДИЯ 3. «ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРВОГО СЛОЯ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦА – ПОВЕРХНОСТЬ»

В качестве допущения принято, что частицы, находясь во взвешенном состоянии в дисперсии, не взаимодействуют между собой (иными словами, не «слипаются», находясь во взвешенном состоянии). Также в первом приближении не будем учитывать, что не все частицы из дисперсии оседают на поверхность – учтем это после, введением коэффициента ξ в итоговое уравнение.

Исходя из соображений, что при отрыве пузыря частицы покрывают площадь поверхности, равную $0,25\pi D_0^2$, с учетом вероятности для пузыря образоваться в месте, где уже есть частицы, было получено выражение для времени образования «монослоя» (единичного слоя на поверхности) следующего вида:

$$\tau = \frac{2}{9} \cdot 10^{-7} \frac{F_{\text{пов}} \cdot D_0 (\rho'' \cdot r)^3 \Delta T^2}{\xi \cdot q \sigma^2 T_{\text{нас}}^2} \quad (1)$$

где $F_{\text{пов}}$ – площадь поверхности;

D_0 – отрывной диаметр пузыря;

ρ'' – плотность пара;

r – удельная теплота парообразования;

ΔT – перегрев поверхности относительно температуры насыщения (в градусах Кельвина);

ξ – коэффициент, учитывающий, что не все частицы переходят из объема

- испарившейся дисперсии в микрослой под пузырьем;
 q – плотность теплового потока при кипении;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения;
 $T_{нас}$ – температура насыщения.

СТАДИЯ 4. «ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРОГО И ДАЛЕЕ СЛОЯ ЧАСТИЦ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦА – ЧАСТИЦА»

Модель Фритца для отрывного диаметра парового пузыря применима только для гладкой поверхности. После возникновения на ней первого слоя наночастиц поверхность уже не может считаться гладкой. С учетом наличия впадин на поверхности средним диаметром устья d_k отрывной диаметр может быть найден как [10]:

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{6d_k \sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}} \quad (2)$$

- где d_k – диаметр устья;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения;
 g – ускорение свободного падения;
 ρ' – плотность воды;
 ρ'' – плотность пара.

Шероховатость ψ , суть отношение площади шероховатой поверхности к площади гладкой поверхности, может быть вычислена как:

$$\psi = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4 \cdot \delta_{вп}^2} \left[\sqrt{\frac{1}{\text{tg}^2 \theta} + 1} - 1 \right] + 1 = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4 \cdot \delta_{вп}^2} \left[\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right] + 1, \quad (3)$$

- где $\delta_{вп}$ – расстояние между центрами впадин на поверхности;
 θ – краевой угол смачивания.

Можно принять, что глубина впадины приблизительно равна толщине покрытия $\delta_{покр}$. Тогда, учитывая $\delta_{покр} = d_k / (2 \text{tg} \theta)$, в скобках выражения (3) под корнем получаем отношение $d_k^2 / (4 \delta_{покр}^2)$.

С учетом наблюдаемой авторами в экспериментах зависимости параметров покрытия (d_k , $\delta_{покр}$) от режимных параметров кипения (объемной концентрации НЖ C_0 , времени выдержки $\tau_{эк}$, плотности теплового потока q_0) выражение для коэффициента шероховатости ψ принимает вид:

$$\psi = K_1 \cdot (q_0^n \tau_{эк} C_0^m)^2 \cdot \left[\sqrt{K_2 \cdot (q_0^n \tau_{эк} C_0^m) + 1} - 1 \right] + 1, \quad (4)$$

где K_1, K_2 – константы, связанные между собой соотношением $K_1 = K_2 \cdot \pi \cdot B^2 / \delta_{вп}^2$.

Относительное увеличение КТП в НЖ относительно КТП в дистилляте выражается коэффициентом ($\kappa^{-0.5}$) (см. модель Теофануса – Дина [11]):

$$\kappa^{-0,5} = 2,8 \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{1 - K_3^2 \psi^2}}{2} - \frac{\frac{\pi}{2} - \arccos(K_3 \psi)}{2K_3 \psi} \right]^{0,25}, \quad (5)$$

где K_3 – также некоторая константа.

Из сравнения с экспериментальными данными получаем:

$$n = 2; m = -0,02; K_1 = 0,001; K_2 = 0,08; K_3 = 0,005$$

Приведенные выше соотношения в настоящей работе были использованы для оценки повышения КТП при использовании НЖ как теплоносителя в системе отвода тепла от корпуса реактора в ходе запроектных аварий с плавлением активной зоны.

Оценка повышения КТП при предварительном нанесении нанопокрyтия на корпус реактора базируется на распространении полученных в ходе экспериментов результатов на данный случай. Предполагается, что покрытие нанесено при осаждении НЧ в ходе кипения НЖ в оптимальном из исследованных режимов; максимально достигнутое относительное повышение КТП в этом случае составляет 33%. Преимущество данного способа – заводская обработка поверхности, что не требует усложнений системы для поддержания состояния НЖ. Однако аппроксимирование экспериментальных данных на случай использования воды как теплоносителя, кипящего на покрытии подобного рода, требует дополнительных исследований.

2 РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ

При использовании наножидкости как теплоносителя системы получаем следующие оценочные результаты:

Предполагается, что при аварии наножидкость заполняет пространство вокруг корпуса реактора. Корпус охлаждается за счет кипения наножидкости. Пар охлаждается во внешнем охладителе и снова поступает в объем системы вокруг реактора. Случай соответствует кипению наножидкости в большом объеме. В ходе аварии тепловой поток через стенку корпуса реактора может повышаться из-за выпаривания теплоносителя, плавления и поступления кориума к стенкам корпуса с внутренней стороны и т.д.

Таким образом, некоторое время наножидкость кипит при определенной плотности теплового потока. Учитывая, что это время достаточно велико, по результатам экспериментальных исследований, полученных нами, можно предложить использование НЖ с концентрацией не выше 0,001%об. В таком случае, если плавления и поступления кориума к стенкам не будет в течение 15 минут, то при толщине стенки корпуса ~200 мм, теплопроводности ~30 Вт/(м·К) и разнице температур $(T_{\text{внутр}} - T_{\text{внеш}}) = 500$ К, что соответствует плотности теплового потока $q_0 = 75$ кВт/м² $\approx 0,1$ МВт/м² увеличение КТП составит 57%, т.е., при $q_{\text{кр}} \approx 1,2$ МВт/м² для дистиллята при использовании НЖ будет достигнуто $q_{\text{кр}} \approx 1,88$ МВт/м², т.е. даже при поступлении кориума с температурой 2000-3000 °С к стенкам корпуса будет обеспечено надежное охлаждение.

Если предварительно на внешнюю поверхность корпуса реактора было нанесено покрытие (путем осаждения при кипении наножидкости), то при аппроксимации экспериментальных данных на этот случай, приходим к выводу, что максимальное увеличение КТП составит 33%, т.е. при $q_{\text{кр}} \approx 1,2$ МВт/м² для дистиллята при использовании НЖ будет достигнуто $q_{\text{кр}} \approx 1,6$ МВт/м², что тоже соответствует случаю надежного охлаждения даже при контакте кориума с корпусом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основываясь на результатах, изложенных в настоящей статье, можно сделать вывод о том, что применение наножидкостей в качестве теплоносителя (рабочего тела) в системах и энергетическом оборудовании, в частности, в системах безопасности реакторных установок АЭС, а также предварительная модификация высоконапряженных поверхностей нагрева путем формирования на них нанопокрытия с заданными параметрами является перспективным решением для увеличения надежности и расширения границ безопасной эксплуатации энергетического оборудования и станций.

Возможные дальнейшие направления исследований в данной тематике – варьирование типа наночастиц и базовой жидкости, исследование прочности и долговечности сформированных покрытий, проведение полномасштабных экспериментов на моделях, сходных с узлами энергетического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе, С.С. Теплопередача при конденсации и кипении [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Машгиз, 1952. – 236 с.
2. Kim S.J. [et al] Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, №50, pp. 4105–4116.
3. Jeong Y.H., Chang W.J., Chang S.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, №51, pp. 3025–3031.
4. Фокин, Б.С. и др. Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц [Текст] / Б.С. Фокин, М.Я. Беленький, В.И. Альмяшев, В.Б. Хабенский, О.В. Альмяшева, В.В. Гусаров // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35(10). – С. 1–5.
5. Васильев, Н.В. и др. Экспериментальные данные по кипению воды, недогретой до температуры насыщения, на поверхностях с мезорельефом [Текст] / Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, Ю.А. Кузма-Кичта и др. // Тепловые процессы в технике. – 2016. – №8(3). – С. 98–102.
6. Coyle C., Buongiorno J., McKrell T. Synthesis of CRUD and its Effect On Pool and Subcooled Flow Boiling: CASL L3 Milestone Report. USA: US Department of Energy, 2015, 16 p.
7. Corradini, M. Marschman S., Goldner F. Improved LWR cladding performance by EPD surface modification technique: Final report of NEUP project 09-766. Madison: University of Wisconsin, 2012, 62 p.
8. Chupin A., Hu L.W., Buongiorno J. Applications of nanofluids to enhance LWR accidents management in in-vessel retention and emergency cooling systems. *Proceedings of ICAPP'08: Paper 8043*. Anaheim, CA USA, 2008, pp. 1707–1714.
9. Фритц, В. Вычисление максимального объема парового пузыря [Текст] / В. Фритц // *Phys Z*, 1935, 36(11), pp. 379–384.
10. Лабунцов, Д.А. и др. Механика двухфазных систем: учебное пособие для вузов [Текст] / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 374 с.
11. Theofanous T.G., Dinh T.N. High heat flux boiling and burnout as microphysical phenomena: mounting evidence and opportunities. *Multiphase Science Tech*, 2006, №18(1), pp. 361–364.

REFERENCES

- [1] Kutateladze S.S. *Teploperedacha pri kondensacii i kipenii* [Heat Transfer at Condensation and Boiling]. M. Pub. Mashgiz [Mashgiz], 1952, 236 p. (in Russian)
- [2] Kim S.J. [et al] Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, №50, pp. 4105–4116. (in English)
- [3] Jeong Y.H., Chang W.J., Chang S.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, №51,

- pp. 3025–3031. (in English)
- [4] Fokin B.S., Belenkii M.Ia., Almiashv V.I., Khabenskii V.B., Almiashva O.V., Gusarov V.V. Kriticheskiy teplovoi potok pri kipenii vodnoi dispersii nanochastits [Critical Heat Flux when Boiling Aqueous Dispersion of Nanoparticles]. Pisma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Letters to Technical Physics Journal], 2009, Vol. 35(10), ISSN 0320-0116, pp. 1–5. (in Russian)
- [5] Vasilev N.V., Zeigarnik Iu.A., Kuzma-Kichta Iu.A. etc. Eksperimentalnye dannye po kipeniiu vody, nedogretoi do temperatury nasyshcheniia, na poverkhnostiakh s mezorelefom [The Experimental Datas on Boiling of Water Underheated to saturation temperature on Surfaces with Mesorelief]. Teplovye protsessy v tekhnike [Thermal Processes in Technique], 2016, №8(3), ISSN 2074-2649, pp. 98–102. (in Russian)
- [6] Coyle C., Buongiorno J., McKrell T. Synthesis of CRUD and its Effect On Pool and Subcooled Flow Boiling: CASL L3 Milestone Report. USA: US Department of Energy, 2015, 16 p. Available at: <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2015-0068-000.pdf> (in English)
- [7] Corradini, M. Marschman S., Goldner F. Improved LWR cladding performance by EPD surface modification technique: Final report of NEUP project 09-766. Madison: University of Wisconsin, 2012, 62 p. (in English)
- [8] Chupin A., Hu L.W., Buongiorno J. Applications of nanofluids to enhance LWR accidents management in in-vessel retention and emergency cooling systems. Proceedings of ICAPP'08: Paper 8043. Anaheim, CA USA, 2008, pp. 1707–1714. (in English)
- [9] Frittc V. Vychislenie maksimalnogo obema parovogo puzyria [Calculation of Maximal Volume of Steam Bubble]. Phyz Z, 1935, №36(11), pp. 379–384. (in Russian)
- [10] Labuntcov D.A., Iagov V.V. Mekhanika dvukhfaznykh sistem: uchebnoe posobie dlia vuzov [Mechanics of Two-Phase Systems: manual for higher education institutions]. M. Pub. MPEI, 2000, 374 p. (in Russian)
- [11] Theofanous T.G., Dinh T.N. High heat flux boiling and burnout as microphysical phenomena: mounting evidence and opportunities. Multiphase Science Tech, 2006, №18(1), pp. 361–364. (in English)

Prospects of Nanoliquid Use in Heat Withdrawal Systems in the Beyond Design Basis Accidents Accompanied with Fissile Area Melting

A.L. Sirotkina*, **E.D. Fedorovich****, **V.V. Sergeev*****

*Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg
Polytechnicheskaya St., 29, St.-Petersburg, Russia, 195251*

e-mail: sashulena991@inbox.ru

** ORCID iD: 0000-0002-5735-0461*

WoS ResearcherID.: K-4065-2017

*** ORCID iD: 0000-0002-1349-1895*

**** ORCID iD: 0000-0001-8883-4381*

Abstract – The article represents assessment results of prospects of nanodispersible liquids (nanoliquids) use in the NPP security systems, in particular, in emergency cooling system of the reactor vessel in the beyond design basis accidents accompanied with fissile area melting. The assessment is based on experiment and theoretical model operation results which short description is given at the beginning of article.

Keywords: corium deduction, nanoliquid, security systems, burn-out, critical heat flux.