

---

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

---

УДК 621.039

Ю.И. Аношкин<sup>1</sup>, Д.М. Жилов<sup>1,2</sup>, К.В. Куценко<sup>2</sup>

### К ВОПРОСУ О МЕТОДИКЕ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА В ОБЛАСТИ ПРИСТЕННОГО КИПЕНИЯ ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»<sup>2</sup>

**Цель работы:** Сопоставление различных методик расчета температурного режима оболочки тепловыделяющего элемента.

**Методология/подходы:** Представлены основные положения различных методик расчета температурного режима, проведено их сравнение на конкретном примере. В основу работы положен ряд изданий и публикаций по указанной тематике.

**Границы исследования/вовлеченность:** Приводится анализ расчетных значений коэффициентов теплоотдачи и температуры стенки ТВЭЛа на участке пристенного кипения.

**Результаты/научная новизна/значение:** Результаты расчетных значений коэффициента теплоотдачи и температуры наружной поверхности оболочки ТВЭЛа существенно зависят от методики расчета и отражают особенности основных положений использованной методики расчета. Целесообразность использования той или иной методики зависит от целей расчета.

*Ключевые слова:* кипение теплоносителя, коэффициент теплоотдачи, теплогидравлический расчет, теплообмен, тепловыделяющий элемент.

### Введение

Разработка проектов и строительство легководных корпусных реакторов, принадлежащих к поколению III+, невозможны без проведения исследований, направленных на обоснование безопасности реакторных установок и эффективности проектных решений. В таких задачах важнейшее значение имеет расчетный анализ тепловых процессов в системах охлаждения реактора (как в условиях нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях). Очевидно, что достоверность такого анализа должна опираться на усовершенствованные расчетные методики.

Среди множества различных вопросов, которые должны рассматриваться при проектном обосновании безопасности легководных корпусных реакторов, расчету подлежат режимы, при которых в условиях нормальной эксплуатации на части твэлов в тепловыделяющей сборке активной зоны происходит поверхностное кипение недогретой до температуры насыщения воды. Однако существующие методы расчета температуры оболочек твэлов и других элементов реакторной установки в таких режимах базируются на эмпирических зависимостях, которые подтверждаются опытными данными, полученными при кипении воды лишь в определенных диапазонах давлений, тепловых нагрузок и недогревов жидкости до температуры насыщения.

Вклад различных механизмов теплообмена (конвективный перенос теплоты в однофазном потоке и дополнительный перенос тепла в результате процессов микроконвекции и фазового перехода в примыкающем к стенке перегретом слое жидкости) в общий тепловой поток в количественном выражении разными авторами оценивается по-разному.

## Методики расчета коэффициента теплоотдачи

В данной работе используются две методики расчета коэффициента теплоотдачи и определения области пристенного кипения. Приведем их краткое описание.

### 1. Методика 1

Методика, представленная в [1], основана на расчете коэффициента теплоотдачи в области пристенного кипения теплоносителя по полуэмпирическим формулам.

Если в тепловыделяющем канале при двухфазном течении температура жидкой фазы теплоносителя (воды)  $t_b$  ниже температуры насыщения  $t_s$ , то в канале наступает режим поверхностного кипения. Когда температура воды достигает насыщения ( $t_b = t_s$ ), то говорят о развитом объемном кипении. Для последнего режима коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{кин}$  можем рассчитать по формуле В.М. Боришанского [2]:

$$\alpha_{кин} = \frac{9q^{0,7}}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_s - 100)}, \quad (1)$$

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

Коэффициент теплоотдачи при развитом поверхностном кипении, когда  $t_b^{пк} \leq t_b < t_s$ , можно рассчитать по формуле:

$$\alpha_{пк} = \frac{\alpha_{кин} q}{q + \alpha_{кин} \cdot (t_s - t_b)}, \quad (2)$$

где  $t_b$  – температура жидкой фазы теплоносителя;  $t_b^{пк}$  – граница начала развитого поверхностного кипения, определяемая по формуле:

$$t_{пк} = t_s - q \cdot \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha_{пк}} \right). \quad (3)$$

Наличие и протяженность участка развитого пристенного кипения теплоносителя можно определить путем сопоставления распределения температуры теплоносителя  $t_b$  с распределением температуры теплоносителя, при которой может существовать пристенное кипение  $t_{пк}$ .

### 2. Методика 2

Методика, представленная в работе [3], в которой интенсификация теплопередачи при кипении связывается с действием активных центров парообразования, а взаимный вклад однофазной конвекции и кипения в общий тепловой поток определяется размерами зон на поверхности нагрева, внутри которых преобладает тот или иной механизм теплоотдачи.

Центрами парообразования в кипящей жидкости являются имеющиеся на реальной поверхности многочисленные углубления, поры, трещины и т.д.

Имея в виду перенос тепла в результате совместного протекания однофазной конвекции и кипения в недогретой до температуры насыщения жидкости, запишем уравнение теплового баланса для единицы площади теплоотдающей поверхности как суперпозицию двух составляющих полного теплового потока  $q_c$ :

$$q_c = \alpha_{конв} \cdot (1 - S_{кин}) \cdot \Delta T + \alpha_{пк} \cdot S_{пк} \cdot \Delta T_s, \quad (4)$$

где  $\alpha_{конв}$  – коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене;  $\Delta T = T_c - T_{ж} = \Delta T_s + \vartheta$  – полный температурный напор “стенка – жидкость” ( $\vartheta$  – недогрев жидкости до температуры насыщения), а  $S_{пк}$  – доля площади поверхности нагрева, занятая пузырьковым кипением.

Если предположить, что в зоне кипения площадь поверхности, приходящаяся в среднем на один центр парообразования, во всем интервале изменения  $\Delta T_s$  вплоть до  $\Delta T_{кр1}$  постоянна и равна  $1/n_{ср}$ , то в соответствии с представленной выше моделью

$$S_{пк} = 1 - erf \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}} \cdot (f(T_c, T_{ср}, T_s) - 1) \right], \quad (5)$$

где  $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-x^2} dx$  – функция ошибок Гаусса,  $f(T_c, T_{cp}, T_s) = \frac{\exp[r \cdot \Delta T_{cp} / R_f T_c T_s] - 1}{\exp[r \cdot \Delta T_s / R_f T_c T_s] - 1}$ ,

$\Delta T_s = T_c - T_s$  – перегрев теплоотдающей стенки относительно температуры насыщения при заданных параметрах процесса теплообмена при кипении ( $T_c$  или  $q_c$ ), а  $T_{cp}$  и  $\Delta T_{cp} = T_{cp} - T_s$  – температура стенки и ее перегрев в условиях, когда начинают активироваться впадины глубиной  $h_{cp}$  и менее,  $h_{cp}$  – средняя глубина впадин,  $\sigma_h$  – их среднее квадратичное отклонение,  $\varepsilon = h_{cp} / \sigma_h$  – параметр шероховатости поверхности.

В итоге на основании формул (4), (5) для расчета коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  получим

$$\alpha = \alpha_{конв} + (\alpha_{нк} - \alpha_{конв}) \cdot S_{нк}. \quad (6)$$

Формулу (6) можно использовать при  $0 < \Delta T_s < \Delta T_{cp}$ . Отметим, что для предельных случаев, когда температура теплоотдающей поверхности близка к температуре насыщения ( $\Delta T_s$  мало),  $\alpha \rightarrow \alpha_{конв}$ , а при  $\Delta T_s \rightarrow \Delta T_{cp}$  коэффициент теплоотдачи  $\alpha \rightarrow \alpha_{нк}$ .

### Сравнительный анализ методик расчета теплообмена при кипении теплоносителя на поверхности ТВЭЛов

Расчет теплообмена между стенкой ТВЭЛа и теплоносителем является частью теплового расчета активной зоны реактора. Тепловой расчет активной зоны проведен согласно методике, представленной в [4], для исходных данных, представленных в табл. 1.

Таблица 1

#### Исходные данные для теплового расчета

Параметр	Обозначение	Значение
Тепловая мощность реактора	$W$	300 МВт
Давление теплоносителя первого контура	$P_1$	12 МПа
Температура теплоносителя на выходе из реактора	$t_{вых}$	320°C
Средний подогрев теплоносителя в реакторе	$\Delta t_T$	30°C
Распределение удельного теплового потока по высоте активной зоны	$q(z)$	$q(z) = q^{\max} \cdot \cos(1,327 \cdot z)$ $z$ – безразмерная координата, $z = (-1 \dots 1)$ .
Число ТВЭЛ в канале	$n_{ТВ}$	37 шт
Наружный диаметр оболочки ТВЭЛ	$d_{ТВ}$	8 мм
Высота активной зоны	$H_0$	1,1 м
Диаметр активной зоны	$D_0$	0,9 м
Топливо		UO <sub>2</sub>

Коэффициент теплоотдачи на участке развитого пристенного кипения:

#### 1. Методика 1

Наличие и протяженность участка развитого пристенного кипения теплоносителя можно определить путем сопоставления распределения температуры теплоносителя  $t_T(z)$  с распределением температуры теплоносителя, при которой может существовать пристенное кипение  $t_{нк}(z)$ .

Определим область существования пристенного кипения

$$t_T(z) > t_{нк}(z). \quad (7)$$

Температуру  $t_{нк}$  рассчитываем по формуле (3).

Графики распределения температур  $t_m$  и  $t_{нк}$  по высоте канала представлены на рис. 2.

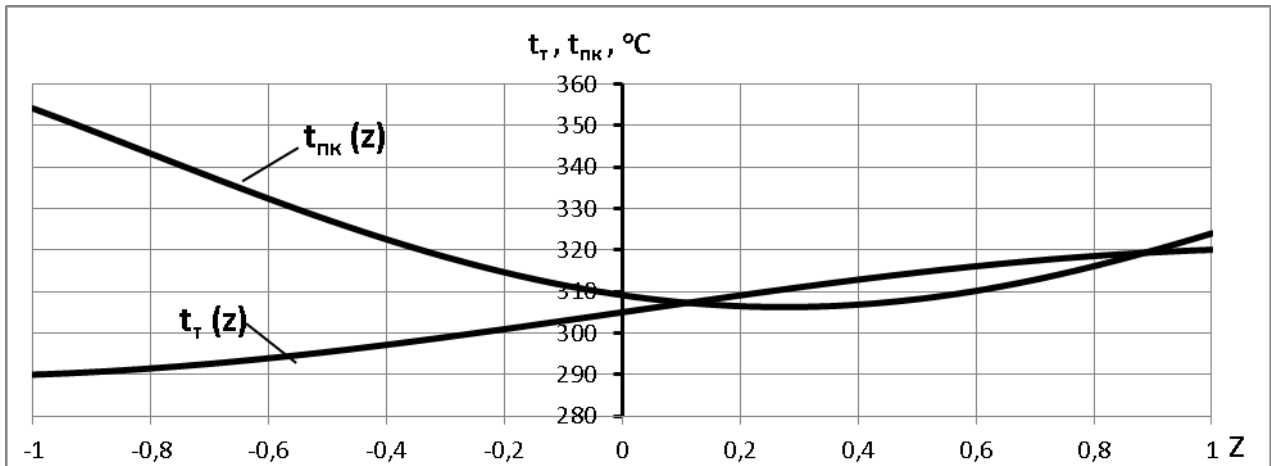


Рис. 2. График распределения температур  $t_T$  и  $t_{пк}$  по высоте канала

Определяем область пристенного кипения:  $0,12 \leq z \leq 0,88$

В области  $-1 \leq z \leq 0,12$ ;  $0,88 \leq z \leq 1$ ;  $\alpha(z) = \alpha_{конв}$  – конвективный теплообмен.

В области  $0,12 \leq z \leq 0,88$   $\alpha(z) = \alpha_{пк}$  – пристенное кипение теплоносителя.

Распределение температуры наружной поверхности ТВЭЛ  $t_{об}^{нар}$  представлено на рис. 3.

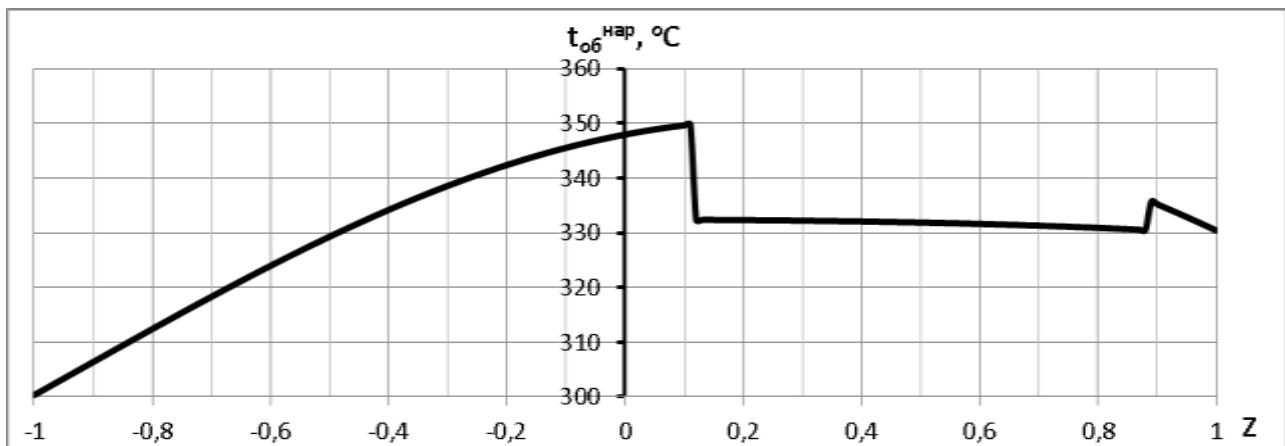


Рис. 3. График распределения температуры  $t_{об}^{нар}$  по высоте канала

## 2. Методика 2

Для расчета коэффициента теплоотдачи на участке пристенного кипения по формуле (6), необходимо знать температуру стенки  $t_{об}^{нар}(z)$ .

В общем случае температуру  $t_{об}^{нар}$  в координате  $z = i$  находим следующим образом:

$$t_{об\ i}^{нар} = t_{Ti} + \frac{q_i \cdot \cos(\gamma_i)}{\alpha_i(T_{об\ i-1}^{нар})}, \quad (8)$$

$$\alpha_i(T_{об\ i-1}^{нар}) = \alpha_{конв} + (\alpha_{пк\ i} - \alpha_{конв}) \cdot S_{пк}(T_{об\ i-1}^{нар}), \quad (9)$$

$$S_{пк}(T_{об\ i-1}^{нар}) = 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}} \cdot (f(T_{об\ i-1}^{нар}, T_{cp}, T_s) - 1) \right], \quad (10)$$

$$f(T_{об\ i-1}^{нар}, T_{cp}, T_s) = \frac{\exp[r \cdot \Delta T_{cp} / R_{\Gamma} T_{cp} T_s] - 1}{\exp[r \cdot \Delta T_{si-1}(z) / R_{\Gamma} T_{об\ i-1}^{нар} T_s] - 1}. \quad (11)$$

После нахождения температуры  $t_{об}^{нар}{}_i$ , методом итераций находим значения функций  $f_i$ ,  $S_{крит}$  и  $\alpha_i$ , соответствующие полученной температуре стенки, предварительно задавшись требуемой точностью (например, 1%).

Графики распределения полученных по двум методам коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  по высоте расчетного канала представлены на рис. 3.

I – метод 1, II – метод 2.

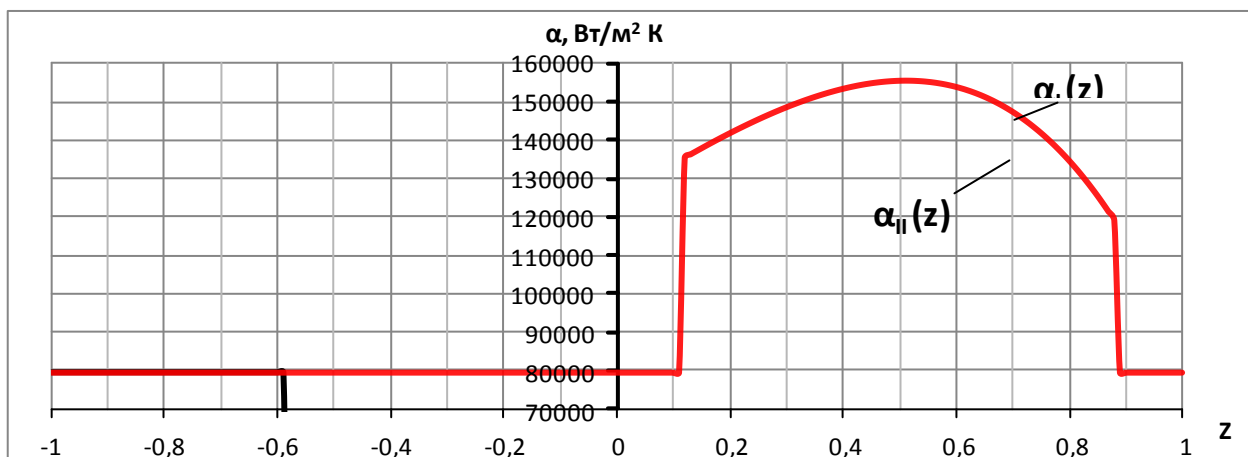


Рис. 3. График распределения коэффициента теплоотдачи по высоте канала

Графики распределения температуры наружной стенки  $t_{об}^{нар}$ , полученные по двум методам, представлены на рис. 4.

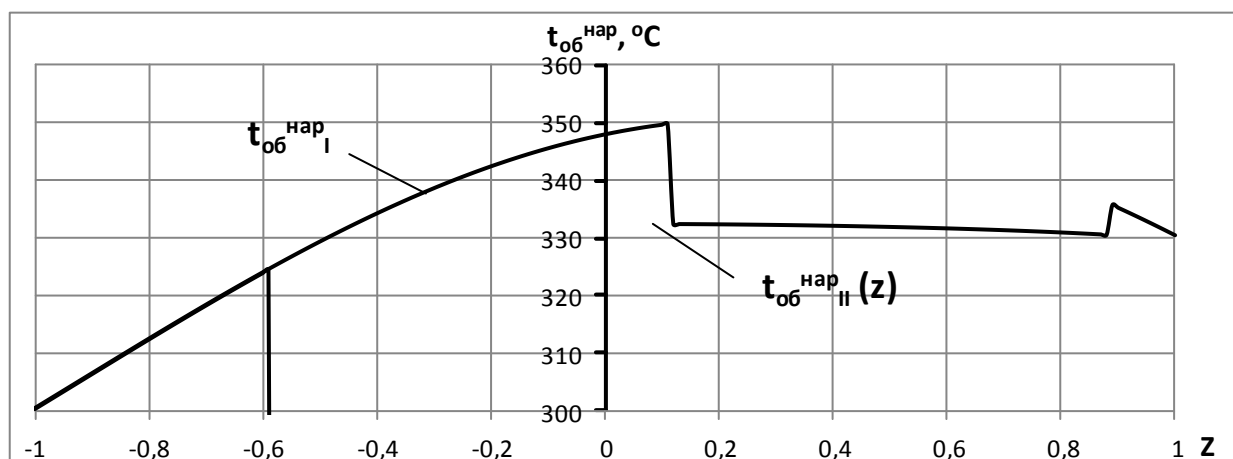


Рис. 4. График распределения температуры наружной оболочки по высоте канала

### Заключение

Таким образом, полученные результаты расчетных значений коэффициента теплоотдачи и температуры наружной поверхности оболочки ТВЭЛа (рис. 3, 4) существенно зависят от методики расчета, особенно на начальном и конечном участке пристенного кипения, и отражают особенности основных положений использованной методики расчета. Так, методика 1 соответствует «предельному» подходу, при котором наступление пристенного кипения характеризуется ступенчатым увеличением коэффициента теплоотдачи и соответствующим ступенчатым уменьшением температуры поверхности оболочки от значений при конвективном теплообмене к значениям при развитом пристенном кипении.

В то же время методика 2 предполагает более детальный учет процессов возникновения и развития пристенного кипения, что и предопределило более плавный переход коэффициента теплоотдачи и температуры поверхности оболочки от значений при конвективном теплообмене к значениям при развитом пристенном кипении на начальном и конечном участках пристенного кипения. На участке развитого пристенного кипения величины коэффициентов теплоотдачи и соответствующих температур поверхности оболочки, полученные по методикам 1 и 2, практически совпадают.

Очевидно, что целесообразность использования той или иной методики расчета будет зависеть от целей расчета. В случае, когда целью расчета является определение фактической минимальной температуры поверхности оболочки ТВЭЛа на участке пристенного кипения, то достаточно использовать методику 1. Если же целью расчета является также определение границ участка с поверхностным кипением, то, безусловно, расчеты необходимо проводить по методике 2.

В случае же необходимости получения оценки амплитуды пульсаций температуры поверхности стенки на всем участке с пристенным кипением, связанных либо с самим процессом пристенного кипения, либо с нестационарностью режима работы ЯЭУ, целесообразно использовать результаты расчета по обоим методикам.

### Библиографический список

1. **Клемин, А.И.** Теплогидравлический расчет и теплотехническая надежность ядерных реакторов / А.И. Клемин, Л.Н. Полянин, М.М. Стригулин. – М.: Атомиздат, 1980. – 261 с.
2. Теплообмен при кипении воды в широком диапазоне изменения давления насыщения / В.М. Боришанский [и др.] // Теплофизика высоких температур. 1964. №1.
3. Методика расчета теплообмена при кипении жидкости / В.И. Деев, Зар Ни Аунг, К.В. Куценко [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. № 5 С. 387–394.
4. **Аношкин, Ю.И.** Тепловой расчёт активной зоны водо-водяного реактора: метод. указания к практическим занятиям, курсовому и дипломному проектированию / Ю.И. Аношкин; НГТУ. – Н. Новгород, 1996.

*Дата поступления  
в редакцию 20.11.2014*

**Y.I. Anoshkin<sup>1</sup>, D.M. Zhilov<sup>1,2</sup>, K.V. Kutsenko<sup>2</sup>**

### ON THE ISSUE OF METHOD OF ACCOUNTING ANALYSIS OF TEMPERATURE CONDITION OF FUEL ELEMENT OF REACTOR CORE IN AREA OF WALL BOILING OF WATER COOLANT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
National Research Nuclear university MEPHI<sup>2</sup>

**Purpose:** The main purpose of the paper is comparison of various methods of account of temperature condition of fuel element.

**Methodology/approach:** The paper presents the main points of various methods of account of temperature condition. The study performed the comparison of various methods. Several publication and studies were taken as the basis for the paper.

**Research limitations/implications:** The paper presents analysis of account of heat-transfer coefficient and the wall temperature of fuel element on a site of wall boiling.

**Findings/originality/value:** The results of the calculated values of heat transfer coefficient and the temperature of the outer surface of fuel element depend on the method of calculation and reflect the characteristics of the main provisions of the calculation methodology. Appropriateness of the use of a particular method of calculation depends on the purpose of calculation.

*Key words:* boiling of coolant, heat-transfer coefficient, thermal-hydraulic design, heat exchange, fuel element.