

Вид функции энерговыделения в зависимости от координаты по высоте активной зоны для кипящих реакторов имеет сложный вид. С увеличением паросодержания, уменьшается плотность теплоносителя, а, следовательно, и замедляющие свойства. Из-за этого поток нейтронов, с которым практически линейно связано энерговыделение, в верхней части активной зоны существенно ниже, чем в нижней. В проектных организациях, при полноценном проектировании реакторов, поиск данной зависимости осуществляется итерационным путем с помощью последовательных теплофизических и нейтронных расчетов. В нашем же случае, проводятся лишь первичные оценочные теплофизический и нейтронный расчеты. Поэтому примем, что функция энерговыделения зависит от высоты по косинусоидальному закону:

$$q_l(z) = q_{l0} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эфф}}\right)$$

где $H_{эфф}$ - эффективная высота активной зоны.

$$K_z = \frac{1}{\frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}\right) dz}$$

Значения коэффициентов неравномерности по радиусу и высоте выберем равными $K_r = 1.5, K_z = 1.5$

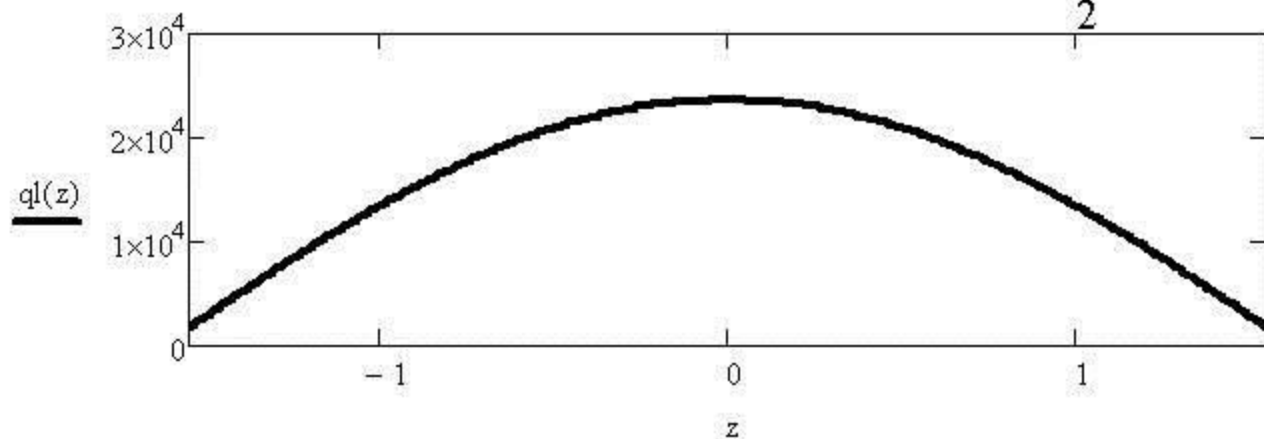
Выбранное значение коэффициента неравномерности по радиусу является максимально допустимыми для реакторов с водой под давлением.

Максимальное значение теплового потока, достигаемое в центре активной зоны ($z = 0$) найдем по формуле:

$$q_{l0} = \frac{Q_m}{N_{твэл} N_{твс} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эфф}}\right) dz}$$

Среднее значение теплового потока по высоте:

$$q_{lcp} = \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} q_l(z) dz$$



$$h_{ex} = \frac{h' \cdot (G - D) + h_{nb} \cdot D}{G}$$

Зная энтальпию и давление, по таблицам термодинамических свойств найдем температуру на входе в активную зону $T_{ex} = T(P, h_{ex})$

Оценим среднюю теплоемкость воды:

$$C_p = \frac{h' - h_{ex}}{T_s - T_{ex}}$$

Распределение относительной энтальпии по высоте активной зоны:

$$X(z) = \frac{h_{ex} + \frac{N_{твэл} N_{твс}}{G} \int_{\frac{H}{2}}^z q_l(z) dz - h'}{h'' - h'}$$

$$h_{ex} = \frac{h' \cdot (G - D) + h_{nb} \cdot D}{G}$$

Зная энтальпию и давление, по таблицам термодинамических свойств найдем температуру на входе в активную зону $T_{ex} = T(P, h_{ex})$

Оценим среднюю теплоемкость воды:

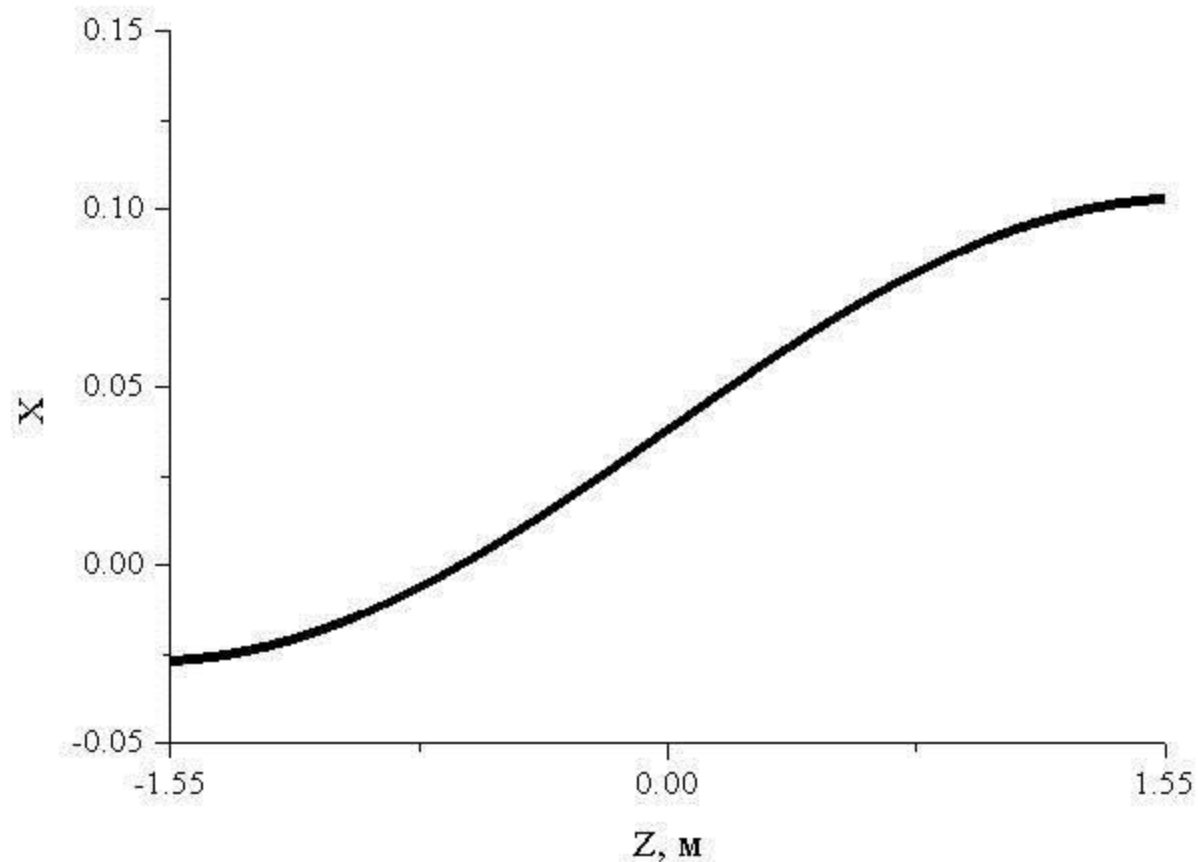
$$C_p = \frac{h' - h_{ex}}{T_s - T_{ex}}$$

Распределение относительной энтальпии по высоте активной зоны:

$$X(z) = \frac{h_{ex} + \frac{N_{твэл} N_{твс}}{G} \int_{\frac{H}{2}}^z q_l(z) dz - h'}{h'' - h'}$$

Распределение относительной энтальпии по высоте активной зоны:

$$X(z) = \frac{h_{ex} + \frac{N_{твэл} N_{твс}}{G} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_l(z) dz - h'}{h'' - h'}$$



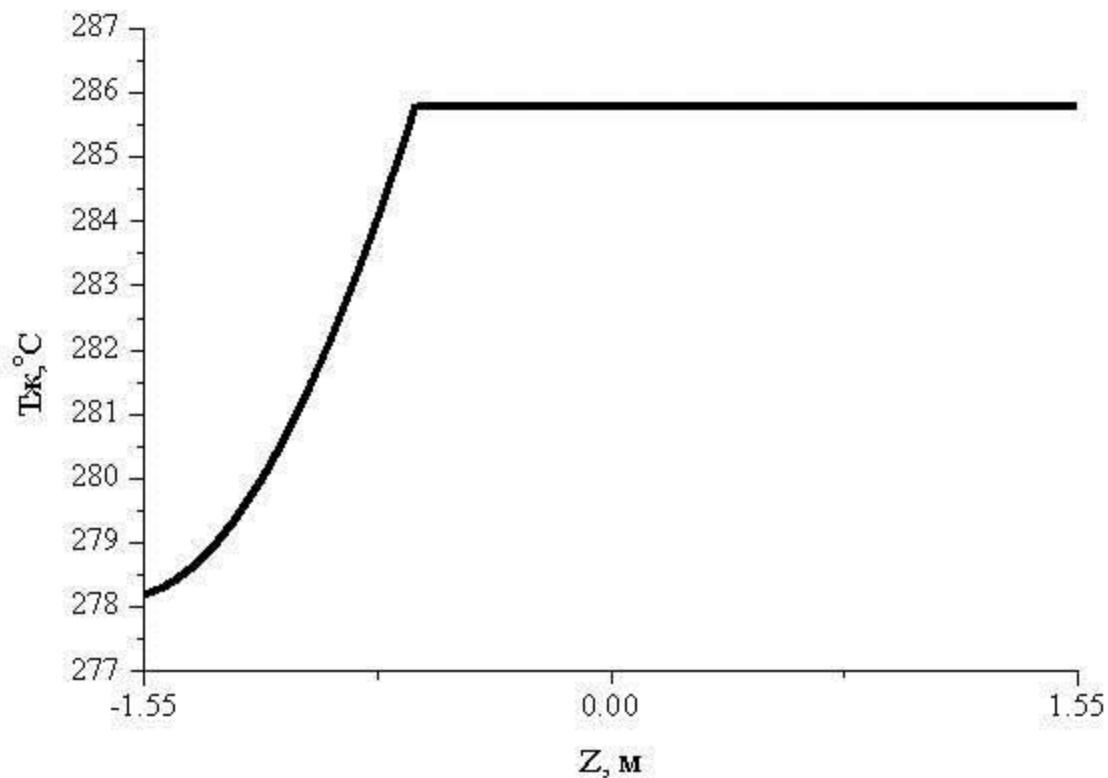
Распределение относительной энтальпии по высоте активной зоны:

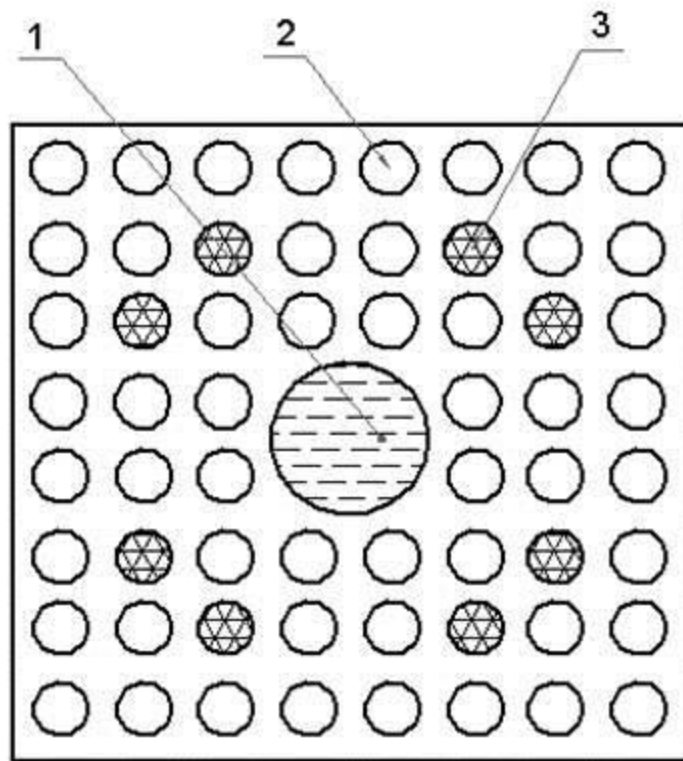
$$X(z) = \frac{h_{ex} + \frac{N_{твэл} N_{твс}}{G} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_l(z) dz - h'}{h'' - h'}$$

Далее температуру жидкости при достижении развитого кипения будем считать равной температуре насыщения. Для определения распределения температуры найдем координату точки перехода к развитому кипению из уравнения:

$$X(Z_{рк}) = 0$$

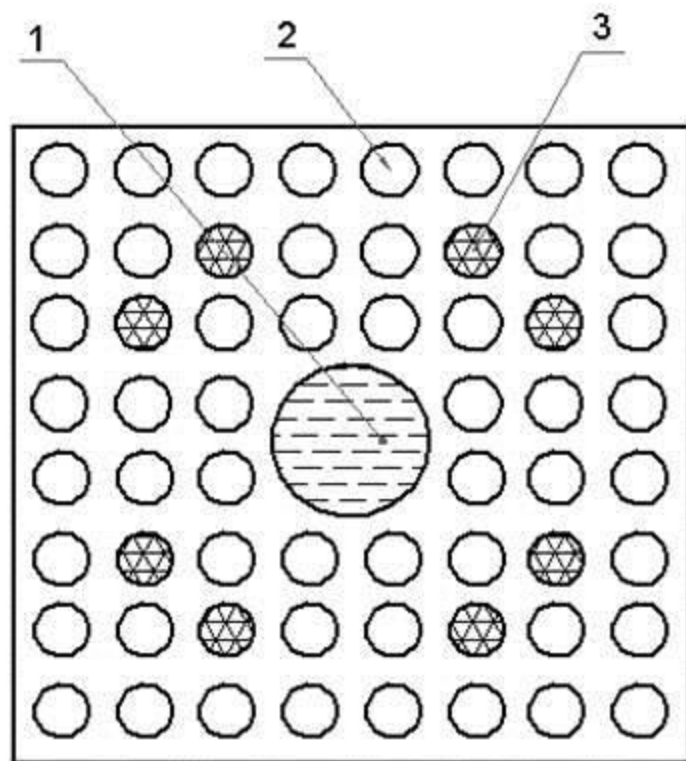
$$T_{\text{жс}}(z) = \begin{cases} T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{теэл}} N_{\text{тес}}}{G \cdot C_p} \int_{-\frac{H}{2}}^z q_l(z) dz, & z < Z_{\text{рк}} \\ T_s, & z \geq Z_{\text{рк}} \end{cases}$$





1. Центральный канал с некипящим замедлителем. 2. тепловыделяющий элемент. 3. Направляющая труба.

- Внешняя ширина кассеты A_k ;
- Толщина стенки кассеты δA_k ;
- Внешний диаметр центрального канала с водой D_k ;
- Толщина стенки центрального канала с водой δ_k ;
- Шаг решетки твэл Δ ;
- Суммарное количество направляющих стержней и твэл в кассете $N_{ст}$.



Площадь проходного сечения
кассеты:

$$S_{\text{прох}} = (A_k - 2\delta A_k)^2 - N_{\text{ст}} \cdot \pi \frac{d_{\text{мс}}^2}{4} - \pi \frac{D_k^2}{4}$$

Смачиваемый периметр кассеты:

$$\Pi_{\text{см}} = 4(A_k - 2\delta A_k) + N_{\text{ст}} \cdot \pi d_{\text{мс}} + \pi D_k$$

Гидравлический диаметр кассеты:

$$d_e = \frac{4S_{\text{прох}}}{\Pi_{\text{см}}}$$

Безразмерный шаг решетки твэл: $S = \frac{\Delta + d_{\text{мс}}}{d_{\text{мс}}}$

Определение коэффициента теплоотдачи по **формуле Петухова**:

$$Re = \frac{\rho W \cdot d_2}{\mu'}$$

$$\rho W = \frac{G}{S_{прох} N_{мес}}$$

$$\xi = (1.82 \cdot \log Re - 1.64)^{-2}$$

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

$$\alpha_{конв} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_2}$$

Определение коэффициента теплоотдачи по формуле Диттуса-Белтера:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_2}$$

Определение коэффициента теплоотдачи по **методу Осмачкина**

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{занятая стержнями}}}{S_{\text{полн}}}$$

$$d_{\text{эф}} = \frac{2\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} - \frac{3}{2} - \frac{\ln \varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \cdot d_z$$

$$\text{Re}_{\text{эф}} = \frac{\rho W \cdot d_{\text{эф}}}{\mu'}$$

$$Nu = 0.023 \cdot \text{Re}_{\text{эф}}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4}$$

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_z}$$

Коэффициент теплоотдачи при кипении в трубах рассчитать невозможно, его можно лишь оценить. К тому же, данная величина зависит от теплового потока, а в нашем случае, следовательно, и от высоты. Поэтому для начала найдем значение коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме.

$$\alpha_{\text{кип}}(z) = K_{\text{кип}} \cdot \left(\frac{q_l(z)}{\pi d_{\text{тв}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

где первый множитель можно рассчитать двумя способами:

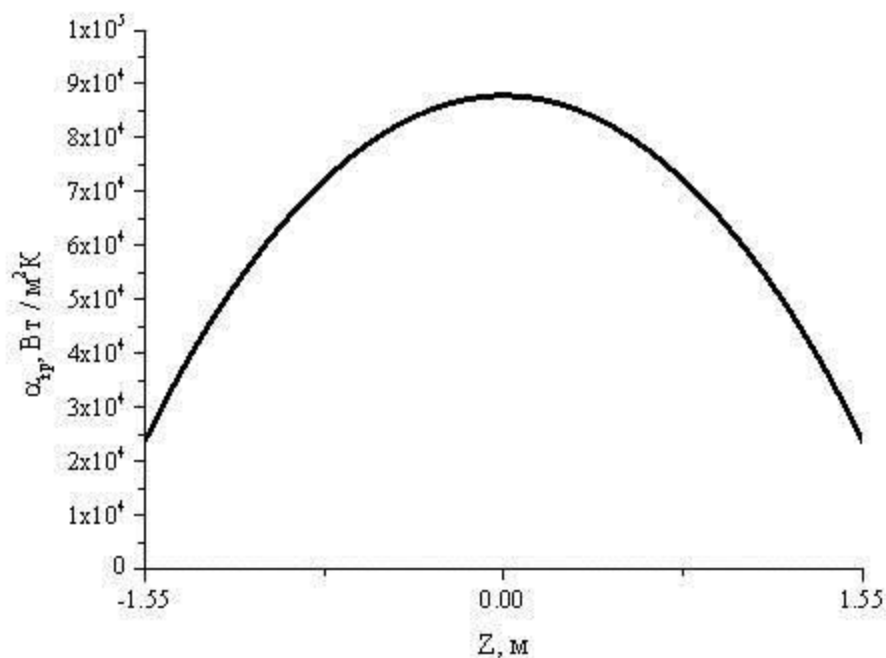
$$K_{\text{кип}1} = \frac{3.4 \cdot (10 \cdot P)^{0.18}}{1 - 0.045 \cdot P}, [P] = \text{МПа} \quad K_{\text{кип}2} = 3.1 \cdot P^{0.25}, [P] = \text{атм}$$

Усредним результаты, полученные в обеих формулах:

$$K_{\text{кип}} = \frac{K_{\text{кип}1} + K_{\text{кип}2}}{2}$$

Коэффициент теплоотдачи при кипении в трубном пространстве оценим как среднегеометрическое значение коэффициентов теплоотдачи при конвекции и кипении в большом объеме:

$$\alpha_{тр}(z) = \sqrt{\alpha_{конв}^2 + \alpha_{кип}(z)^2}$$

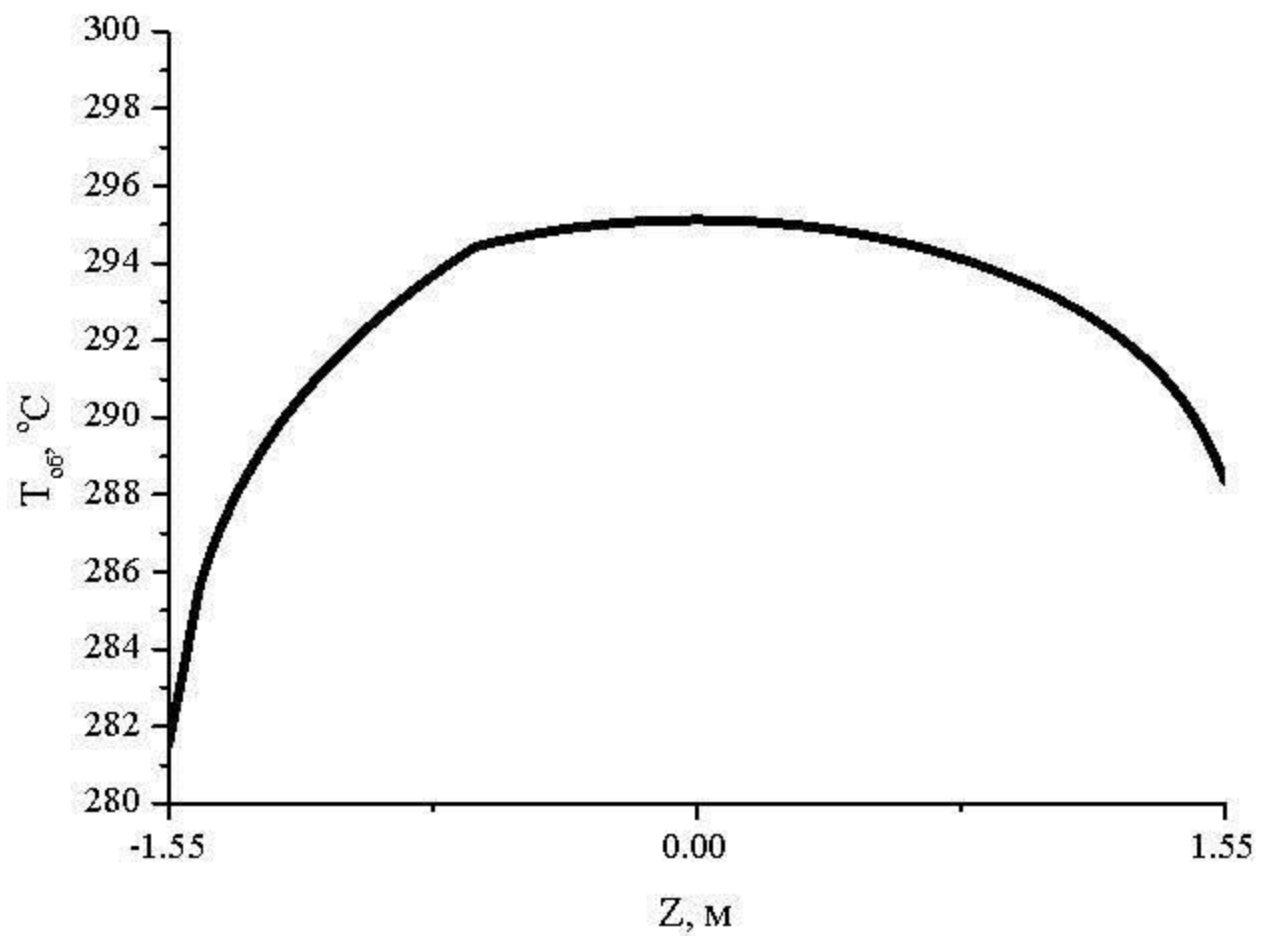


Разность температур оболочки твэл и охлаждающей жидкости при фиксированном тепловом потоке определяется величиной коэффициента теплоотдачи. На участке развитого кипения эта величина равна коэффициенту теплоотдачи при кипении, на участке конвективного охлаждения – коэффициенту теплоотдачи при конвекции. В переходной области (кипение с недогревом) оценить величину коэффициента теплоотдачи крайне проблематично. Поэтому фиктивно соединим найденные на двух других участках краевые значения температуры оболочки сглаживающей функцией. Для начала определим точку начала кипения, являющуюся концом участка конвективного теплоотвода, из следующего соотношения:

$$T_s = T_{ж}(Z_{нк}) + \frac{q_l(Z_{нк})}{\pi \cdot d_{тв} \cdot \alpha_{конв}}$$

Фактически данное соотношение вытекает из приближения, что кипение с недогревом возможно, если температура оболочки твэл выше температуры насыщения жидкости. Тогда зависимость температуры оболочки от высоты будет выглядеть следующим образом:

$$T_{об}(z) = \begin{cases} T_{жс}(z) + \frac{q_l(z)}{\pi \cdot d_{тв} \cdot \alpha_{конв}}, & z < Z_{НК} \\ T_s + \frac{1}{\alpha_{мп}(z)} \left[\frac{q_l(z)}{\pi \cdot d_{тв}} - \alpha_{конв} \cdot (T_s - T_{жс}(z)) \right], & Z_{НК} \leq z \leq Z_{ПК} \\ T_s(z) + \frac{q_l(z)}{\pi \cdot d_{тв} \cdot \alpha_{мп}(z)}, & z > Z_{ПК} \end{cases}$$



В центре топлива достигается максимальная температура в реакторе. Термическое сопротивление между центром топливной таблетки и внешней границей оболочки твэл составляют: сама оболочка, газовый зазор и топливная таблетка.

Сопротивление рассчитываем по формуле:

$$R_{терм} = \frac{\ln \frac{d_{тв}}{d_{тв} - 2\delta_{об}}}{2\pi\lambda_{об}} + \frac{\ln \frac{d_m + 2\delta_z}{d_m}}{2\pi\lambda_z} + \frac{1}{4\pi\lambda_m}$$

Зависимость температуры центра топлива от высоты находим из следующего соотношения:

$$T_{ц}(z) = T_{об}(z) + q_l(z) \cdot R_{терм}$$

