

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Институт ядерной энергетики и технической физики

Кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»

ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА С ВОДЯНЫМ КИПЯЩИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Методические указания к практическим занятиям, курсовому и дипломному
проектированию

Нижний Новгород
2015

Общие положения

В водо-водяных кипящих реакторах, в которых кипящая вода одновременно служит теплоносителем и замедлителем, распределение энерговыделения по высоте активной зоны зависит от распределения истинного объемного паросодержания. Поскольку распределение истинного объемного паросодержания при заданном расходе теплоносителя определяется распределением энерговыделения по высоте активной зоны, то теплогидравлический расчет активной зоны такого реактора носит итерационный характер. Кроме этого, в случае кипящих реакторов с естественной циркуляцией теплоносителя его расход через реактор изначально не известен и определяется по результатам теплогидравлического расчета реактора. При этом при заданной геометрии контура циркуляции, величина расхода теплоносителя при естественной циркуляции в значительной степени зависит от истинного объемного паросодержания в активной зоне и на подъемном участке контура.

В этом самом общем случае расчет кипящего реактора начинается с того, что задается, например, профиль энерговыделения по высоте активной зоны и определяются теплогидравлические характеристики реактора. Из последующего физического расчета в соответствии с полученным распределением истинного объемного паросодержания определяются распределения тепловых нейтронов и энерговыделения. Таким образом, проводится несколько итераций до сходимости расчета с заданной точностью.

В кипящих канальных реакторах с графитовым и тяжеловодным некипящим замедлителем изменения энерговыделения по высоте активной зоны практически не искажаются в связи с кипением теплоносителя в каналах, так как его доля по сравнению с объемом замедлителя в этих реакторах чрезвычайно мала. В этом случае существенно упрощается процедура теплогидравлического расчета, поскольку отпадает необходимость итерационного расчета распределения энерговыделения по высоте активной зоны, обусловленного соответствующим распределением объемного паросодержания в кипящем теплоносителе.

Общим и основным этапом теплогидравлического расчета любого типа реактора с кипящим теплоносителем является расчет распределения теплогидравлических параметров по высоте кипящего канала. При этом при заданном расходе теплоносителя и распределении энерговыделения по высоте активной зоны методика расчета основных теплогидравлических характеристик является общей для различного типа

реакторов с кипящим теплоносителем. В данной работе эта методика излагается на примере кипящего канального реактора с графитовым или некипящим замедлителем.

Исходные данные и методика расчета

Методику расчета теплогидравлических параметров канала с кипящим теплоносителем рассмотрим на примере расчета рабочего канала с кипящим водяным теплоносителем и графитовым замедлителем (типа РБМК). Перечень исходных данных при расчете в общем случае, а также численное значение исходных параметров применительно к рассмотренному примеру расчета приведены в табл. 5.1

Таблица 5.1

Исходные данные для расчета

| Название параметра | Условное обозначение | Размерность | Численное значение для примера расчета |
|---|--------------------------|-------------------|--|
| 2 | 3 | 4 | 5 |
| Тепловая мощность реактора | $Q_{\text{тепл}}$ | Вт | $3,2 \cdot 10^9$ |
| Удельное объемное энерговыделение в активной зоне | q_v | Вт/м ³ | $4 \cdot 10^6$ |
| Температура теплоносителя на входе в активную зону | $T_{\text{вх}}$ | °С | 265 |
| Давление теплоносителя на входе в активную зону | $P_{\text{вх}}$ | Па | $8 \cdot 10^6$ |
| Среднее массовое паросодержание на выходе активной зоны | x | - | 0,15 |
| Высота активной зоны | H_0 | м | 7,0 |
| Шаг расположения ТВС | a | м | 0,25 |
| Внутренний диаметр чехла ТВС | d | м | 0,08 |
| Число твэлов ТВС | n | - | 18 |
| Наружный диаметр оболочки твэла | d_2 | м | $13,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Внутренний диаметр оболочки твэла | d_1 | м | $11,7 \cdot 10^{-3}$ |
| Диаметр топливного сердечника | d_0 | м | $11,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Диаметр центральной трубки | d | м | $15 \cdot 10^{-3}$ |
| Конструкционный материал | сплав на основе циркония | | |
| Материал топливного сердечника | диоксид урана | | - |

Последовательность, расчетные соотношения для расчета теплогидравлических характеристик кипящего канала в общем случае и результаты для примера исходных данных приведены в табл. 5.2-5.5.

Таблица 5.2

Последовательность расчета, расчетные соотношения для расчета
теплогидравлических характеристик кипящего канала в общем случае и результаты
расчета для примера исходных данных

| Параметр | Формула или исходное значение | Численные значения |
|---------------------------------------|--|----------------------|
| Объем активной зоны, м ³ | $V = Q_{\text{тепл}} / q_v$ | 800 |
| Диаметр активной зоны, м | $D_0 = \sqrt{V / 0,785 H_0}$ | 12 |
| Площадь одной ячейки, м ² | $f_{\text{яч}} = a^2$ | 0,0625 |
| Число ячеек в активной зоне | $N = 0,7854 D_0^2 / f_{\text{яч}}$ | 1810 |
| Проходное сечение ТВС, м ² | $S_{\text{ТВС}} = 0,7854 [(d_{\text{T}\delta}^{\text{BH}})^2 - n d_2^2 - d^2]$ | $2,27 \cdot 10^{-3}$ |
| Гидравлический периметр ТВС, м | $\Pi_{\Gamma} = \pi (d_{\text{T}\delta}^{\text{BH}} + n d_2 + d)$ | 1,06 |
| Тепловой периметр ТВС, м | $\Pi_{\text{тепл}} = \pi d_2 n$ | 0,763 |
| Гидравлический диаметр, м | $d_{\Gamma} = 4 S_{\text{ТВС}} / \Pi_{\Gamma}$ | $8,57 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 5.3

Последовательность расчета, расчетные соотношения для расчета
теплогидравлических характеристик кипящего канала в общем случае и результаты
расчета для примера исходных данных

| Параметры | Формула или исходное значение | | Численное значение |
|--|---|--|--------------------|
| | для средней нагрузки | для максимальной нагрузки | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Расход теплоносителя через один канал, кг/с | $G = \frac{Q_{\text{тепл}}}{(i'_{\text{вх}} - i_{\text{вх}} + i r_{\text{вх}}) N}$ | $G = \frac{Q_{\text{тепл}} k_r}{(i'_{\text{вх}} - i_{\text{вх}} + x r_{\text{вх}}) N}$ | 4,73 5,203 |
| Коэффициент неравномерности по радиусу | $k_r = 1,1$ | | |
| Скорость циркуляции, м/с | $\omega_0 = G / S_{\text{ТВС}} \rho'_{\text{вх}}$ | | 3,09 |
| Перепад давления в канале в предположении, что в нем течет только вода при температуре насыщения, Па (где $g = 9,81$) | $\Delta p = \xi'_{\text{пр}} \rho'_{\text{вх}} \omega_0^2 / 2 + (g \rho'_{\text{вх}} H_0)$ | | 86051 |
| Приведенный коэффициент сопротивления | $\xi'_{\text{п}\delta} = \sum_i \xi_M + \xi_{\text{T}\delta} \frac{H_0}{d_r}$, где $\sum_i \xi_M = 9,5$; $\xi_{\text{T}\delta} = 0,0035$ | | 12,36 |
| Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора, Вт/м | $q_{l,0} = \frac{Q_{\text{тепл}} k_z}{H_0 N}$ | $q_{l,0} = \frac{Q_{\text{тепл}} k_v}{H_0 N}$ | 0,0884 0,1263 |
| | где $k_v = 2$ – коэффициент неравномерности по объему; $k_z = 1,4$ – коэффициент неравномерности по высоте | | |

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|------------------|
| Высота участка, на котором происходит подогрев теплоносителя до температуры насыщения, м Среднее значение линейного теплового потока на участке подогрева, Вт/м | $z_n = (i'_{\text{вх}} - i_{\text{вх}}) / \left(\frac{di' \Delta p'}{dp H_0} + \frac{\bar{q}_l}{G} \right),$ <p>где $\frac{di'}{dp} = 0,0048$ - табличная величина</p> | 3,1 |
| | $\bar{q}_l = \frac{q_{l,0} H}{z_n \pi} \left(\cos \frac{\pi \delta}{H} - \cos \frac{\pi(z_n + \delta)}{H} \right),$ <p>где $\delta=0,8$ м – экстраполированная добавка; $H=H_0+2\delta$ – экстраполированная высота, м</p> | $106 \cdot 10^3$ |

Таблица 5.4

Последовательность расчета, расчетные соотношения для расчета теплогидравлических характеристик кипящего канала в общем случае и результаты расчета для примера исходных данных

| Параметры | Формула | Источник |
|---|--|---------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Энтальпия теплоносителя по высоте канала, Дж/кг, где z изменяется от 0 до H_0 через 0,35м | $i_T(z) = i_{\text{вх}} + \frac{q_{l,0} H}{G \pi} \left(\cos \frac{\pi \delta}{H} - \cos \frac{\pi(z+\delta)}{H} \right)$ | См. табл. 5.5 |
| Массовое паросодержание (относительная энтальпия) по высоте канала | $x(z) = \frac{i_n(z) - i'(z)}{i''(z) - i'(z)}$ | См. табл. 5.5 |
| Линейный тепловой поток по высоте канала, Вт/м | $q_l(z) = q_{l,0} \sin \frac{\pi(z+\delta)}{H}$ | См. табл. 5.5 |
| Тепловая нагрузка по высоте канала, Вт/м | $q(z) = 0,94 q_l(z) / \Pi_{\text{тепл}}$ | См. табл. 5.5 |
| Относительная энтальпия в точке начала закипания, где: | $x_{\text{н.к.}} = -0,49 \left(\frac{q(z)}{\rho' \omega_0 r} \right)^{0,3} \text{Re}_q^{0,4} \left(\frac{p}{p_{\text{кр}}} \right)^{0,15}$ | -0,041 |
| число Рейнольдса | $\text{Re}_q = \frac{(q/\rho' r) \sqrt{\sigma/[g(\rho' - \rho'')]}}{\nu'}$ | |
| критическое давление, Па | $p_{\text{кр}} = 2,2115 \cdot 10^7$ | |
| координата точки начала кипения $z_{\text{н.к.}}$, м | $z_{\text{н.к.}} = z_i + \frac{x_i - x_{\text{н.к.}}}{x_i - x_{i-1}} \Delta z$ | -1,3 |
| истинное объемное паросодержание в точке с координатой z_i | $\varphi_n = 0,43 \left(\frac{q(z)}{\rho' \omega_0 r} \right)^{0,15} \text{Re}^{0,2} \left(\frac{p}{p_{\text{кр}}} \right)^{-0,255}$ | 0,17 |

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| Истинное объемное паросодержание на участке от $z_{н.к}$ до z_n | $\varphi(z) = \varphi_n \left(1 - \frac{x(z)}{x_{н.к}}\right)$ | См. табл. 5.5 |
| Объемное расходное паросодержание в области $x > 0$, при котором начинается равновесное кипение | $\beta_p = 3,22 \left(\frac{q}{\rho' \omega_{0r}}\right)^{0,2}$ | См. табл. 5.5 |
| Массовое паросодержание в точке начала равновесного кипения | $x_p = \frac{1}{1 + \frac{1 - \beta_p}{\beta_p} \frac{\rho'}{\rho''}}$ | 0,06 |
| Координата точки начала равновесного кипения z_p , м | $z_p = z_i + \frac{x_p - x_i}{x_{i+1} - x_i} \Delta z$ | |
| Коэффициент проскальзывания в точке z_p , где: | $s_p = 1 + \frac{0,6 + 1,5 \beta_p^2}{Fr^{0,25}} \left(1 - \frac{p}{p_{кр}}\right)$ | 0,8 |
| число Фруда скорость смеси, м/с приведенная скорость пара, м/с | $Fr = \omega_{см}^2 / g d_r$ $\omega_{см} = \omega_0'' - \omega_0'$ $\omega_0' = \omega_0'' (1 - \beta) / \beta$ | 1,2 |
| Расходное объемное паросодержание β на участке $z > z_p$ Истинное объемное паросодержание* на участке z | $\beta(z) = \left[1 + \frac{[1 - x(z)] \rho''}{x(z) \rho'}\right]^{-1}$ $\varphi(z) = \left[1 + \frac{1 - x(z)}{x(z)} s \frac{\rho''}{\rho'}\right]^{-1}$ | 0,5 |
| Массовое паросодержание в точке z_n | $x_n = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varphi_n}{\varphi_n} \frac{\rho'}{\rho''}}$ | См. табл. 5.5 |
| Определение потери давления по высоте испарительного канала | $\Delta p = \Delta p_{к} + \Delta p_{п.к} + \Delta p_{р.к}$ | 0,0129 |
| Потеря давления на конвективном участке (от $z=0$ до $z_{н.к}$), Па | $\Delta p_{к} = \sum_i \left(\xi_{тр.кi} \frac{\Delta z_{кi}}{d_r} + \xi_{м,кi} \right) \frac{\omega_0^2}{2} \rho_{кi} + \sum_i g \rho_{кi}$, где $\xi_{тр.кi} = 0,035$ – на всех участках без исключения; $\xi_{м,кi} = 0,4$ – в пределах каждого участка, за исключением Δz_{10} и Δz_{11} , в пределах которых $\xi_{м,кi} = 1,15$ (за счет местного сопротивления в зазоре между верхней и нижней ТВС) | 326,7 · 10 ³ 57,9 · 10 ³ |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| <p>Потеря давления на участке поверхностного кипения (от $z_{н.к}$ до z_p), Па, где:</p> <p>потеря на трение в пределах каждого участка, Па</p> <p>потеря на местное сопротивление, Па</p> <p>потеря на ускорение, Па</p> | $\Delta p_{п.к} = \sum_i \Delta p_{тр,п.к_i} + \sum_i \Delta p_{м,п.к_i} + \sum_i \Delta p_{уск,п.к_i} + \sum_i \Delta p_{нив,п.к_i}$ $\Delta p_{тр,п.к_i} = \Delta p_{тр,п.к_i}^{б.о} \left[1 + 18,5 \left(\frac{q_i}{r \rho'' \omega_0} \right)^{0,7} \right]$ $\Delta p_{тр,п.к_i}^{б.о} = \xi_{гр} \frac{\Delta z_i}{d_r} \left[1 + x_i \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \frac{\omega_0^2}{2} \rho'$ $\Delta p_{м,п.к_i} = \xi_{м_i} \left[1 + x_i \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \frac{\omega_0^2}{2} \rho'$ $\Delta p_{уск,п.к_i} = \frac{\omega_0^2}{2} \rho' \frac{2\Delta\varphi_i \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)}{1 - \Delta\varphi_i \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)},$ <p>где $\Delta\varphi_i$ – приращение истинного объемного паросодержания на i-м участке</p> | <p>$82,83 \cdot 10^3$</p> <p>$39,84 \cdot 10^3$</p> <p>$19,53 \cdot 10^3$</p> <p>$9,28 \cdot 10^3$</p> |
| <p>нивелирная составляющая, Па</p> | $\Delta p_{нив,п.к_i} = g \rho_{см,i} \Delta z,$ <p>где $\rho_{см,i} = \rho'' \varphi_i + \rho' (1 - \varphi_i)$</p> | <p>$14,18 \cdot 10^3$</p> |
| <p>Потеря давления на участке развитого кипения</p> | $\Delta p_{р.к} = \sum_i \Delta p_{тр,р.к_i} + \sum_i \Delta p_{м,р.к_i} + \sum_i \Delta p_{уск,р.к_i} + \sum_i \Delta p_{нив,р.к_i}$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>Потеря на трение, Па</p> | $\Delta p_{тр,р.к_i} = \xi_{гр} \frac{\Delta z_i}{d_r} \left[1 + x_i \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \frac{\omega_0^2}{2} \rho'$ | <p>$186 \cdot 10^3$</p> |
| <p>Потеря на местное сопротивление, Па</p> | $\Delta p_{м,р.к_i} = \xi_{м_i} \left[1 + x_i \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \frac{\omega_0^2}{2} \rho'$ | <p>$111 \cdot 10^3$</p> |
| <p>Потеря на ускорение, Па</p> | $\Delta p_{уск,р.к_i} = \frac{\omega_0^2}{2} \rho' \frac{2\Delta\varphi_i \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)}{1 - \Delta\varphi_i \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right)}$ | <p>$45 \cdot 10^3$</p> |
| <p>Нивелирная составляющая, Па</p> | $\Delta p_{нив,р.к_i} = g \rho_{см,i} \Delta z$ | <p>$5 \cdot 10^3$</p> |
| <p>Температура теплоносителя на высоте канала</p> | <p>Определяется по энтальпии и давлению в пределах каждого участка</p> | |

| | | |
|--|--|--------------------------------------|
| <p>Температура оболочки твэла на участке конвективного теплообмена (от $z=0$ до $z_{н.к}$), °С, где:</p> | $\theta_{об}(z) = \theta_T(z) + \frac{q(z)}{\alpha}$ | <p>$25 \cdot 10^3$</p> |
| <p>коэффициент теплообмена, Вт/(м²К)</p> | $\alpha = 0,021 \left(\frac{\lambda}{d_r} \right) Re^{0,8} Pr^{0,43}$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>число Рейнольдса</p> | $Re = \frac{\omega d_r}{\nu}$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>число Нуссельта без кипения</p> | $Nu_{б.к} = \frac{\alpha d_r}{\lambda}$ | |
| <p>Определение коэффициента теплоотдачи на участке поверхностного кипения (от $z_{н.к}$ до z_p), где</p> | $\frac{Nu_{кип}}{Nu_{б.к}} = 6250 \left[\frac{q}{r \rho'' \omega'} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{1,45} \left(\frac{r}{c_p \theta_s} \right)^{0,333} \right]^{0,7}$ | <p>$19,55 \cdot 10^3$</p> |
| <p>скорость воды, м/с</p> | $\omega' = \frac{\omega'_0}{1 - \varphi}$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>приведенная скорость воды, м</p> | $\omega'_0 = \omega_{см}'' (1 - \beta)$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>скорость смеси, м/с</p> | $\omega_{см} = \omega_0 \left[1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>расходное объемное паросодержание</p> | $\beta = \left[1 + \frac{1 - x \rho''}{x \rho'} \right]^{-1}$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>Коэффициент теплоотдачи в зоне поверхностного кипения, Вт/(м²К)</p> | $\alpha_{п.к} = \frac{\lambda_{п.к} Nu_{кип}}{d_r},$ <p>где $\lambda_{п.к}$ – коэффициент теплопроводности для воды при температуре соответствующего интервала</p> | <p>$68 \cdot 10^3$</p> |
| <p>Температура оболочки твэла в зоне поверхностного кипения, °С</p> | $\theta_{об}(z) = \theta_T(z) + \frac{q(z)}{\alpha_{п.к}(z)}$ | <p>См. табл. 5.5</p> |
| <p>Определение коэффициента теплоотдачи на участке развитого кипения (от z_p до $z_{вых}$)</p> | $St = 1,25M \left(\frac{p \sqrt{\frac{\sigma}{g \rho''}}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}},$ | |
| | <p>где $M = \frac{q}{r \rho'' \omega_{см}} \left(\frac{k \rho' a}{q \sqrt{\frac{\sigma}{g \rho''}}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{r}{c_p \theta_s} \right)^{0,5}$</p> | |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² К) | $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \text{Pr}}$ | 65 · 10 ³ |
| Температура оболочки по высоте канала в зоне развитого кипения, °С | $\alpha_{\text{p.к}} = c_p \rho' \omega_{\text{cm}} \text{St}$ $\theta_{\text{об}}(z) = \theta_{\text{T}}(z) + \frac{q(z)}{\alpha_{\text{p.к}}(z)}$ | См. табл. 5.5 |
| Критический тепловой поток, Вт/м ² | $q_{\text{кр}} = 845 \cdot 10^3 (\rho \omega)^{0,2} (1 - 3,35 \cdot 10^{-8} p)(1 - x)^{1,2},$ <p>где $p = \text{Па}$; $\rho \omega = \frac{G}{\text{Ствс}}$, кг/(м²с)</p> | См. табл. 5.5 |
| Запас до кризиса теплообмена | $k(z) = \frac{q_{\text{кр}}(z)}{q(z)}$ | См. табл. 5.5 |
| Температура оболочки твэла на внутренней поверхности по высоте канала, °С | $\theta_{\text{об}}^{\text{вн}}(z) = \theta_{\text{об}}(z) + \frac{q_l(z) \delta_{\text{об}}}{\pi d_{\text{об}} \lambda_{\text{об}}},$ <p>где $\delta_{\text{об}} = \frac{d_2 - d_1}{2}$, $d_{\text{об}} = \frac{d_2 + d_1}{2}$, $\lambda_{\text{об}} = 20,6 \text{ Вт/(мК)}$</p> | См. табл. 5.5 0,9 · 10 ³ 12,6 · 10 ³ |
| Температура топливного сердечника на наружной поверхности, °С | $\theta_{\text{с}}^{\text{н}}(z) = \theta_{\text{об}}^{\text{вн}}(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_3 \alpha'}$ <p>где $d_3 = \frac{d_1 + d_0}{2}$</p> | См. табл. 5.5 11,6 · 10 ³ |

Примечание. Расчет ведется методом последовательных приближений, для чего задают величину z_n , определяют q_l , b и по формуле подсчитывают z_n . Итерации ведутся до тех пор, пока z_n заданное не будет равно подсчитанному (с точностью, например, до 1%).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дементьев, Б. А. Ядерные энергетические реакторы / Б. А. Дементьев. – М. Энергоатомиздат, 1990.
2. Полянский, Л. Н. Вопросы теплофизики водоохлаждаемых установок / Л. Н. Полянский. – М. : Энергоиздат, 1994.
3. Тепловой расчёт активной зоны водо-водяного реактора: методические указания к практическим занятиям, курсовому и дипломному проектированию / сост. Ю. И. Аношкин. – Н. Новгород, НГТУ, 1996.
4. Кузнецов, Ю. Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов / Ю. Н. Кузнецов. – М. : Энергоатомиздат, 1989.