

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ МБИР ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Антипин Е.С., Платонов И.В., Ларионов И.А.
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Объект рассмотрения данной работы – воздушный теплообменник реакторной установки МБИР. В данной работе рассмотрена разработка и использование математической модели воздушного теплообменника и шиберной заслонки данного теплообменника, программная реализация вышеупомянутых моделей и их интеграция в расчетный код PRISET-MBIR.

Существующая модель ВТО обладает некоторыми недостатками, а именно: при расчете коэффициента теплопередачи от трубок теплообменника к воздуху не учитывается изменение теплофизических свойств теплоносителя, расход воздуха, хоть и учитывает поправку от разности температур натрия и воздуха, но поправка задана таблично для заранее определенных состояний. Также не реализован алгоритм управления температуры натрия на выходе из ВТО, использующий шиберную заслонку как исполнительный механизм управления.

Для увеличения точности расчета поставлены следующие задачи:

- Реализовать расчет расхода воздуха в зависимости от температур теплообменных труб;
- Реализовать расчет локального коэффициента теплопередачи от каждой трубки к воздуху;
- Учесть переменность теплофизических свойств теплоносителя;
- Создать модель автоматического регулятора шиберной заслонки ВТО.

1. Описание конструкции ВТО, его схема и принцип работы

1.1 Описание контура САОТ

На рисунке 1 представлена принципиальная схема одной из петель РУ МБИР, на схеме изображены первый и второй контур реактора, а также промежуточный контур САОТ.

Контур САОТ предназначен для отведения остаточного тепловыделения при исходных событиях с прекращением теплоотвода через второй и третий контуры РУ, но также, контур задействован при номинальном режиме работы реакторной установки, отводит шесть процентов от общего тепловыделения.

Циркуляция в контуре САОТ – естественная, но, при случае если ЕЦ не установится самостоятельно, предусмотрен насос для активации циркуляции в контуре. Нагретый в АТО натрий поступает в ВТО, где он охлаждается потоком воздуха. После чего теплоноситель поступает в расширительный бак (РБ), предназначенный для компенсации объема натрия при изменении его температуры. Из РБ натрий поступает в АТО.

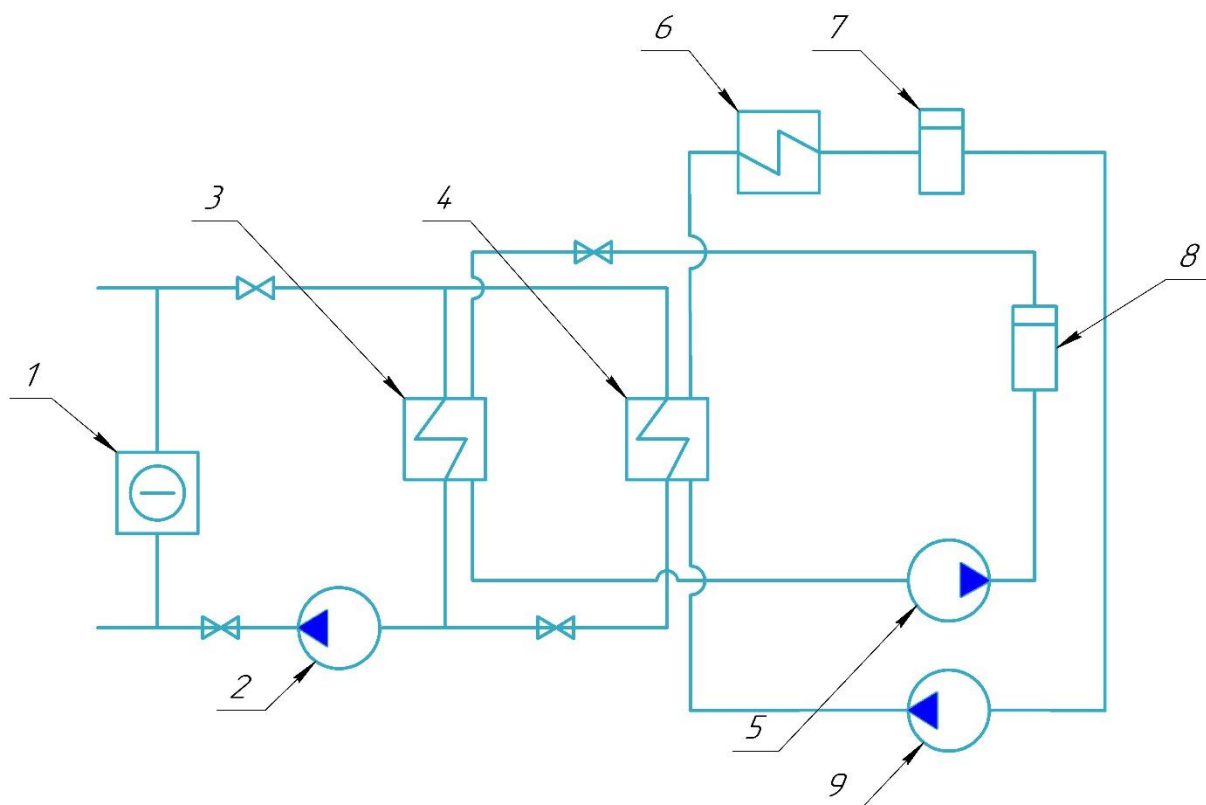


Рис. 1. Принципиальная схема одной петли РУ МБИР:

1 – реактор; 2 – главный циркуляционный насос (ГЦН); 3 – промежуточный теплообменник (ПТО); 4 – аварийный теплообменник (АТО); 5 – электромагнитный насос второго контура (ЭМН); 6 – воздушный теплообменник (ВТО); 7 – расширительный бак; 8 – расширительный бак; 9 – электромагнитный насос контура САОТ

1.2 Назначение воздушного теплообменника (ВТО)

ВТО предназначен для отвода тепла от реактора при нормальной эксплуатации и отказе основных теплоотводящих систем (теплообменников первого и второго контуров). Благодаря тому, что в контуре САОТ и ВТО осуществляется естественная циркуляция, возможно отведение остаточного тепла от реакторной установки при отказе основных систем, отключении питания и т. д.

ВТО является теплообменником типа натрий – воздух. Он используется в составе контура системы аварийного отвода тепла. Циркуляция натрия обеспечивается разностью высотных отметок входного и выходного коллекторов, а воздух циркулирует за счет естественной конвекции.

1.3 Конструкция ВТО

Воздушный теплообменник представляет собой двуполостный теплообменный аппарат поверхностного типа с перекрестным движением сред, в которых осуществляется теплообмен между натрием второго контура, движущимся сверху вниз в трубках, и воздухом, движущимся снизу вверх в межтрубном пространстве.

В состав ВТО (рис. 2) входят:

- теплообменная секция;
- воздухопроводная секция;
- нижний и верхний шиберы с приводами.

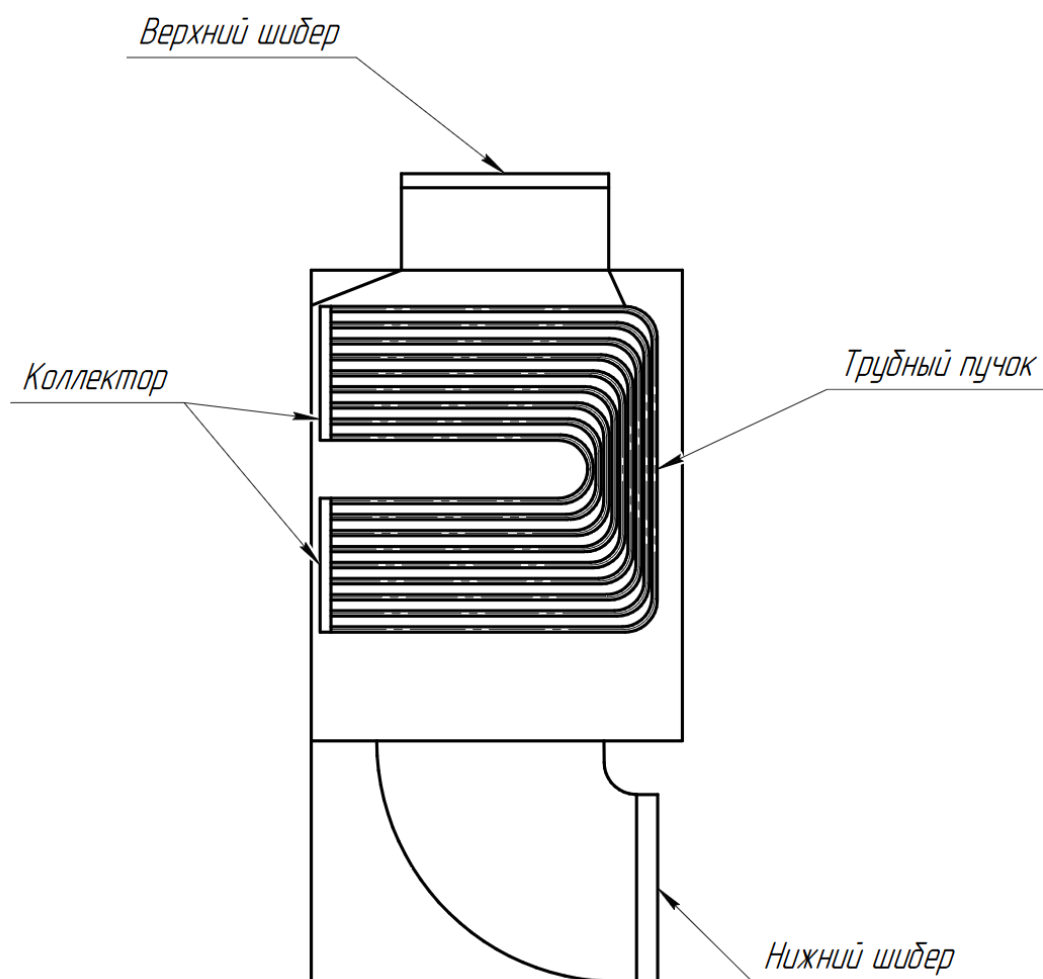


Рис. 2. Схема ВТО

В состав теплообменной секции входят: корпус секции и трубная система, состоящая из входного и выходного коллекторов ВТО и 24 унифицированных плоских модулей. Каждый модуль поверхности теплообмена состоит из девяти U-образных трубок, имеющих по два прямых участка теплообмена и соединенных выходным и входным коллекторами. Трубы расположены под углом 2° к горизонту в направлении течения натрия и имеют поперечное (спиральное) оребрение. По краям оребренных участков труб каждого модуля установлены специальные пластины, которые образуют составные перегородки, препятствующие течению воздуха мимо теплообменной поверхности.

Внутри воздуховодной секции имеются направляющие листы, установленные с целью снижения сопротивления воздуха при его повороте на прямой угол и выравнивания скоростей.

Верхний и нижний шибер имеют одинаковую конструкцию. Они состоят из корпуса, привода, лопаток и механизма поворота. Сечение шиберов – прямое прямоугольное с тремя поворотными лопатками. Нижний шибер является отсечным. Верхний шибер является запорно-регулирующим.

На шиберах установлены электрические приводы для поворота лопаток, обеспечивающие полное закрытие и открытие. Это позволяет осуществлять поворот и фиксацию лопаток в любом положении от 0 до 90 градусов. Электрические приводы также имеют ручные приводы для поворота лопаток в случае отказа вышеупомянутых приводов либо отключения питания.

2. Модель воздушного теплообменника

2.1 Расчетная схема

Для расчета температур организована итерационная схема, температуры рассчитываются на каждой из восемнадцати трубок теплообменного аппарата. В первую очередь рассчитывается стационарное распределение температуры, далее, исходя из полученных при расчете данных, производится динамический расчет теплообменника с заданным шагом и точностью.

Уравнения для счета температур в теплообменнике записывались в следующем виде:

$$\begin{aligned} (C\gamma V)_{TO1} \frac{dT_{TO1n+1}}{d\tau} &= g_{TO1} C_{pTO1} N_{TO} (T_{TO1n} - T_{TO1n+1}) + \\ &+ 0,5K_{TO} F_{TO} (T_{TO2n+1} + T_{TO2n} - T_{TO1n+1} - T_{TO1n}) \\ (C\gamma V)_{TO2} \frac{dT_{TO2n}}{d\tau} &= g_{TO2} C_{pTO2} N_{TO} (T_{TO2n+1} - T_{TO2n}) + \\ &+ 0,5K_{TO} F_{TO} (T_{TO2n+1} + T_{TO2n} - T_{TO1n+1} - T_{TO1n}) \end{aligned} \quad (1)$$

где n – текущая точка по высоте

N_{TO} – количество точек по высоте

$(C\gamma V)$ – Интегральная теплоемкость

g – расход теплоносителя по контуру САОТ

C_p – адиабатная теплоемкость теплоносителя

N_{TO} – количество теплообменных трубок

K_{TO} – коэффициент теплопередачи

F_{TO} – площадь теплообмена

δ – толщина стенки трубки

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки

Граничными и начальными условиями являются температура натрия и температура воздуха на входе в теплообменник.

Система приводилась к конечно-разностной форме заменой временной производной на $\frac{T - T^0}{\Delta\tau}$. Полученная система линейных уравнений решалась матричной

прогонкой, температуры воздуха и натрия известны только на входе в теплообменник.

Каждую итерацию, как по времени, так и при переходе между рядами трубок, происходит уточнение теплофизических свойств воздуха, а также расчет местного коэффициента теплопередачи и расхода воздуха.

2.2 Расчет коэффициента теплопередачи

Движущий напор в теплообменнике:

$$\Delta P = h_{\text{обогр.}} g (\rho_{\text{горячее}} - \rho_{\text{холодное}})$$

$h_{\text{обогр.}}$ – высота обогреваемой части ВТО;

g – ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{холодное}}$ – плотность воздуха при температуре окружающей среды;

$\rho_{\text{горячее}}$ – плотность воздуха при максимальной температуре;

Также ΔP можно получить исходя из следующей формулы:

$$\Delta P = \left(\frac{\xi}{\chi}\right) \chi^{0.5} \rho_i w^2 z$$

w – скорость в наименьшем проходном сечении;

z – число рядов;

ρ_i – местная плотность воздуха;

χ ; ξ/χ – коэффициенты сопротивления коридорных пучков, определяемые по номограмме, представленной на рисунке 3.

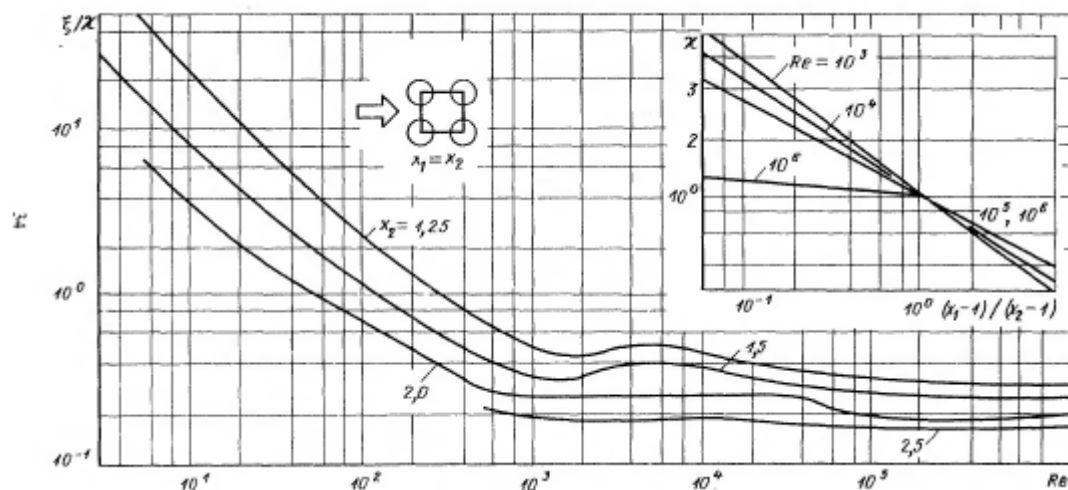


Рис. 3. Номограмма для определения коэффициента сопротивления коридорных пучков труб

Из формул 1 и 2 выразим w (скорость в наименьшем проходном сечении)

$$w_i = \left(h_{\text{обогр.г}} \frac{\rho_{\text{холодное}} - \rho_{\text{горячее}}}{\left(\left(\frac{\xi}{\chi} \right) \chi^{0.5} \rho_i z \right)} \right)^{0.5}$$

Имея w , находим Re по известной формуле

$$Re = (w d_2) / \nu$$

d_2 – внешний диаметр трубки теплообменника;

ν – кинематическая вязкость воздуха;

Коэффициенты теплоотдачи в межтрубном пространстве α_1 и внутри трубы α_2 определяются по следующим формулам:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 * \lambda_1}{d_2}$$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 * \lambda_2}{d_1}$$

d_1 и d_2 – внутренний и внешний диаметр трубки теплообменника;

λ_1 и λ_2 – теплопроводность воздуха и натрия.

Определим число Нуссельта.

Расчет теплоотдачи от труб к воздуху осуществляется по формулам для коридорного пучка из справочника по теплогидравлическим расчетам за авторством П. Л. Кириллова, Ю. С. Юрьева и В. П. Бобкова

$$Nu_1 = 1.13 * C_z * C_q * Re^m * Pr^{0.33} * C_{\text{оп}}$$

$C_z = 1$ – поправка на число поперечных рядов;

C_q – Коэффициент, зависящий от коэффициента оребрения и параметра формы трубного пучка;

$$C_q = (1.36 - th(X)) * \left(\frac{1.1}{\varphi + 8} - 0.014 \right)$$

$$X = 4 * \left(2 + \frac{\varphi}{7} - \sigma_2 \right)$$

X – промежуточный коэффициент для упрощения расчета.

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{d_2}$$

$$\varphi = \frac{\left(\frac{(d_3^2 - d_2^2)}{2} + d_3 * \delta_p + d_2 * (S_p - \delta_p) \right)}{d_2 * S_p}$$

$$m = 0.7 + 0.08 * th(X) + 0.005 * \varphi$$

$C_{оп} = 0.81$ – поправка по результатам испытаний;

$\alpha_{пр}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи от трубок к воздуху, отнесенный к полной поверхности оребренной трубы;

d_3 – диаметр по оребрению;

d_2 – внешний диаметр трубы;

δ_p – толщина ребра;

S_p – шаг ребра.

$$\alpha_{пр} = \alpha_1 * \left(\frac{F_p}{F_p + F_t} * E * \psi + \frac{F_T}{F_p + F_t} \right)$$

α_1 – коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху в межтрубном пространстве;

ψ – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерное распределение теплоотдачи от поверхности ребра и непостоянство температур газа, омывающего ребра;

F_p – площадь внешней поверхности ребра;

F_t – площадь поверхности трубы между ребрами.

$$\psi = 1 - 0.058 * \beta * h_p$$

E – коэффициент эффективности ребра

$$E = \frac{th(\beta * h_{pp})}{\beta * h_{pp}}$$

$$h_{pp} = h_p + \frac{\delta_p}{2}$$

h_p – высота ребра;

δ_p – толщина ребра;

$$\beta = \sqrt{\frac{2 * \alpha_1}{\lambda_p * \delta_p}}$$

λ_p – теплопроводность ребра;

Критерий Нуссельта для расчета КТО от натрия к трубе определяется по формулам:

$$Nu_2 = 4.36 + 0.016 * Pe, \quad Pe < 300$$

$$Nu_2 = 7.5 + 0.005 * Pe, \quad Pe \geq 300$$

Коэффициент теплопередачи, отнесенный к наружной поверхности гладких труб d_2 :

$$K_{To} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} * \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 * \lambda_{ст}} * \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{пр*φ}}}$$

Коэффициенты теплоотдачи определяются в зависимости от режима и типа течения, как указано выше.

2.3 Расчет расхода воздуха через ВТО

Выражение для расчета скорости в наименьшем проходном сечении возьмем из предыдущего пункта

$$w_i = \left(h_{обогр.g} \frac{\rho_{холодное} - \rho_{горячее}}{\left(\left(\frac{\xi}{\chi} \right) \chi^{0.5} \rho_i z \right)} \right)^{0.5}$$

Далее посчитаем расход воздуха через ВТО, воспользовавшись общеизвестной формулой для массового расхода:

$$G = F * w_i * \rho_i$$

F_i – суммарная площадь всех проходных сечений теплообменника

3. Описание расчетной схемы

Расчет температур производится решением системы уравнений теплового баланса. Система приводится к конечно-разностному виду и решается методом обратной матричной прогонки. Каждое уравнение соответствует одному из 18 высотных уровней. В каждой точке по высоте уточняются теплофизические свойства теплоносителя, используя интерполяцию таблиц теплофизических свойств, а также находится местный коэффициент теплопередачи от натрия к воздуху через стенку теплообменной трубки.

Также рассчитывается расход воздуха, исходя из температуры воздуха в самой горячей и самой холодной точках.

Блок-схема метода расчета динамического шага (шага по времени) представлена рисунке 4.

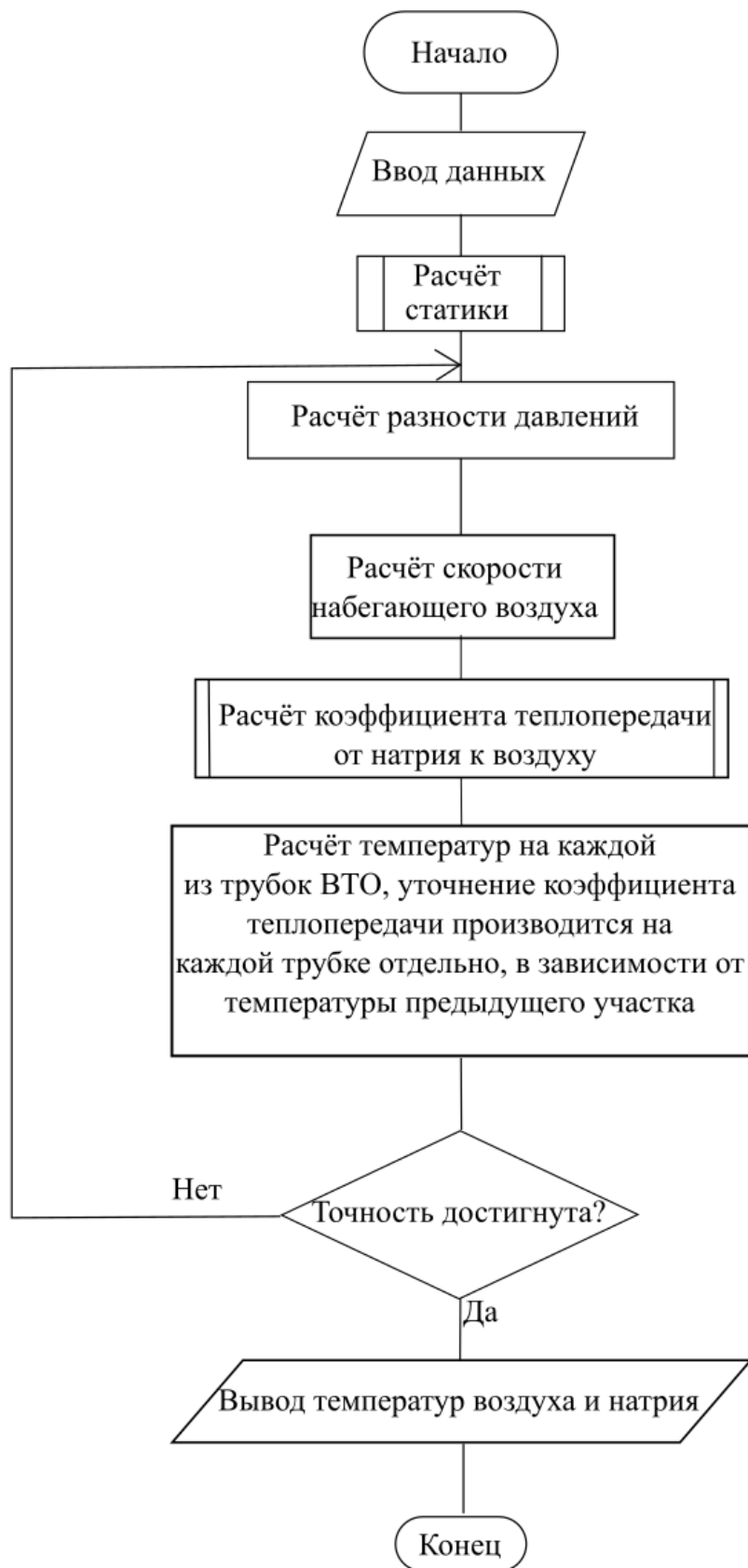


Рис. 4. Блок-схема расчета температур в ВТО

4. Описание модели автоматического регулятора шибберной заслонки

На рисунке 5 представлена схема автоматического регулирования шиберной заслонки ВТО.

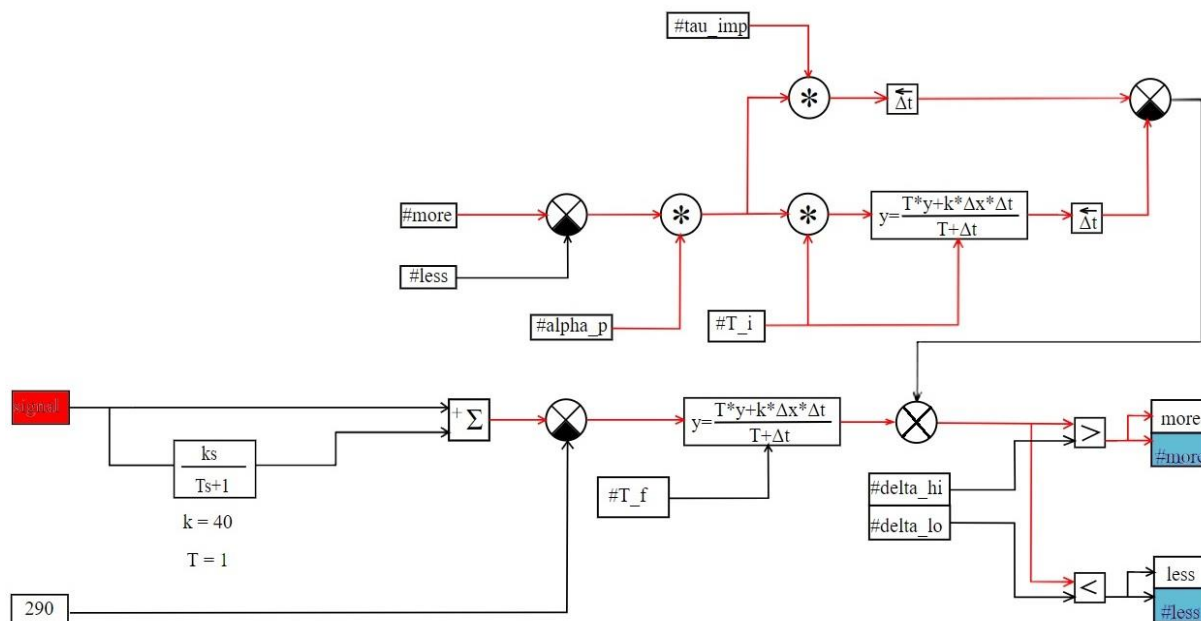


Рис. 5. Структурная схема автоматического регулятора шиберной заслонки

Регулятор осуществляет поддержание температуры натрия на выходе из ВТО. Для номинального режима работы в данной модели уставка температуры натрия на выходе из ВТО принята равной 290 °С. Установленная температура поддерживается за счет изменения расхода воздуха через ВТО, за счет открытия или закрытия створки входного шибера теплообменника.

5. Результаты расчета режима останова ГЦН-1

Для демонстрации работоспособности модели рассматриваем режим останова ГЦН-1 в одной из петель реакторной установки.

При останове ГЦН первого контура согласно алгоритму расхолаживания реактора, срабатывает аварийная защита, второй насос продолжает работать на номинальном режиме, за счет чего своим напором подпирает обратный клапан аварийной петли, из-за чего в ней какое-то время отсутствует циркуляция натрия. Из-за этого температура натрия на входе одного из ВТО повышается. На рисунке 1 можно заметить этот перекося в виде снижения температуры натрия на входе и выходе ВТО аварийной петли. Система автоматического управления шиберной заслонкой стремится поддержать температуру натрия за ВТО на заданном уровне и закрывает шибер ВТО аварийной петли, что можно наблюдать на рисунке 2 – шибер закрывается до отметки ~10% от начального. температура натрия в рабочей петле выше из-за чего температура воздуха на выходе из вытяжной трубы возрастает (см. рис. 6), а система автоматического регулирования открывает полностью шиберную заслонку. После отключения ГЦН рабочей петле отпирается обратный клапан в аварийной петле и в обеих петлях устанавливается естественная циркуляция. Режим работы ВТО обеих петель стабилизируется.

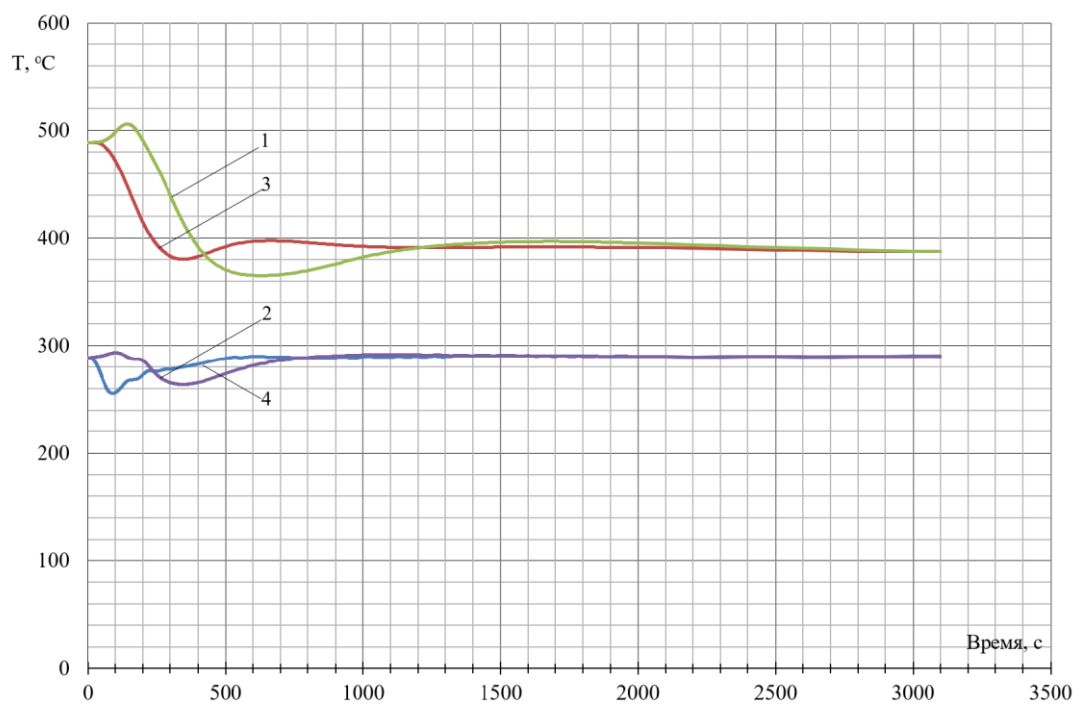


Рис. 6. Изменение температур натрия на входе/выходе ВТО:
 1 – температура натрия на входе в ВТО рабочей петли,
 2 – температура натрия на выходе из ВТО рабочей петли,
 3 – температура натрия на входе в ВТО аварийной петли,
 4 – температура натрия на выходе из ВТО аварийной петли

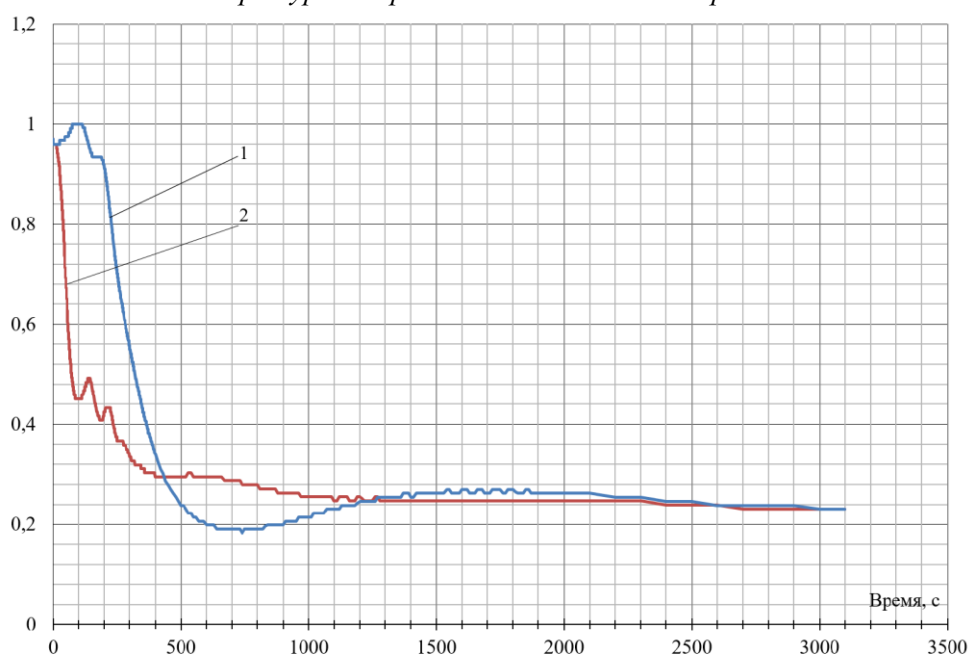


Рис. 7. Относительное положение шиберной заслонки ВТО:
 1 – относительное положение шибер ВТО рабочей петли,
 2 – относительное положение шибер ВТО аварийной петли

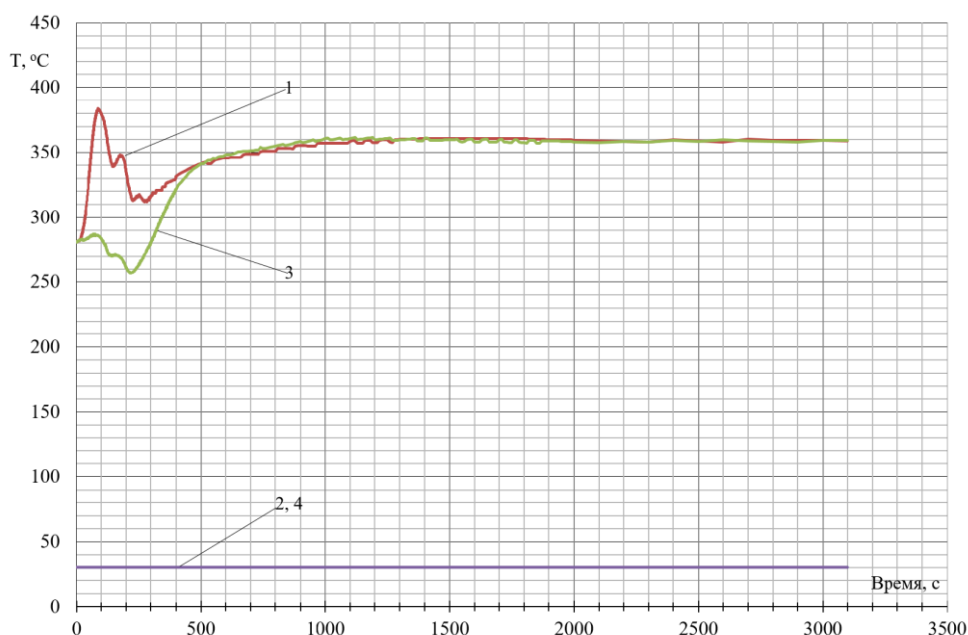


Рис. 8. Изменение температур воздуха на входе/выходе ВТО:

- 1 – температура воздуха на выходе из ВТО рабочей петли,*
- 2 – температура воздуха на входе в ВТО рабочей петли,*
- 3 – температура воздуха на выходе из ВТО аварийной петли,*
- 4 – температура воздуха на входе в ВТО аварийной петли*

Заключение

Расчет показывает адекватность модели, усовершенствованная модель ВТО моделирует отдачу тепла от натрия к воздуху в режимах нарушения НЭ и может быть использована для дальнейших отработок алгоритмов автоматического управления технологическими параметрами РУ.

Список литературы

1. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Москва, Энергоатомиздат, 1990.
2. Жемков И.Ю. «Научно-методическое сопровождение эксплуатации исследовательского реактора на быстрых нейтронах».
3. И.Я. Емельянов, В.И. Михан, В.И. Солонин «Конструирование ядерных реакторов»: учебное пособие для вузов; под общ. редакцией Н.А. Доллежала, Москва, Энергоатомиздат, 1982.
4. Б.А. Дементьев «Ядерные энергетические установки», 2-е издание, переработанное и дополненное, Москва, Энергоатомиздат, 1990.
5. Плотников В. А. «МБИР основы конструкции и физики»
6. Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалёв, С. Л. Соловьёв «Теплообмен в ядерных энергетических установках», Москва, Энергоатомиздат, 1974.