

УДК 681.51

**Ткаченко В.В.**

Одесский национальный политехнический университет

**Беглов К.В.**

Одесский национальный политехнический университет

**Улицкая Е.О.**

Одесский национальный политехнический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ПГВ-1000

*Во время эксплуатации парогенераторов, работающих совместно с ядерными реакторами ВВЭР-1000 атомных электростанций, неизбежно возникает проблема растрескивания трубок и протекания воды первого контура, что обуславливает проведение планово-предупредительных ремонтов. Во время планово-предупредительных ремонтов заглушают потекшие трубки, в результате чего, с одной стороны, уменьшается площадь теплообмена, а с другой – увеличивается скорость движения теплоносителя. Поэтому актуально исследование зависимости изменения температуры теплоносителя первого контура ядерного реактора при изменении количества трубок в парогенераторе атомной электростанции. Произведена оценка влияния изменения температуры воды первого контура на мощность реактора.*

**Ключевые слова:** парогенератор, ВВЭР-1000, температура, количество трубок, АЭС.

**Постановка проблемы.** Эффективное управление парогенераторами (далее – ПГ) атомных электростанций (далее – АЭС) с ВВЭР в нормальных и аварийных режимах в значительной степени обеспечивает динамическую устойчивость системы регулирования как отдельного котлоагрегата, так и всего энергоблока. Важнейшим параметром, от которого зависит выполнение этих функций, является уровень воды в ПГ, который должен поддерживаться на определенном нормированном значении. В горизонтальном ПГ обеспечивается большая площадь зеркала испарения, что облегчает сепарацию влаги из пара, естественная циркуляция рабочего тела повышает надежность установки, хотя и приводит к некоторому увеличению размеров ПГ.

Управление участком питания ПГ АЭС с ВВЭР, состоящим из четырех парогенераторов с регулирующими питательными клапанами (далее – РПК) перед каждым ПГ, в настоящее время осуществляется двумя автоматическими системами регулирования: уровня воды и производительности питательных турбонасосов (далее – ПТН). Работа этих систем взаимосвязана через объект управления, однако настраиваются они индивидуально независимо друг от друга. При глубоких внутренних и

внешних возмущениях эти системы регулирования не могут обеспечить поддержку технологических параметров в пределах нормальной эксплуатации, что приводит к разгрузке или остановке энергоблока и экономическим потерям [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Моделирование реактора типа ВВЭР-1000 очень актуально. Много статей посвящено исследованиям моделирования поведения тела реактора при различных режимах нагрузки [2], усовершенствованию автоматизированной системы управления мощностью энергоблока АЭС для эксплуатации в маневренных режимах суточного цикла [3], моделированию энергоблока с ВВЭР-1000 как объекта управления мощностью [4], модели оценки отказа оболочки для циклической ядерной установки [5]. Однако неисследованным остается вопрос влияния изменения количества трубок теплоносителя в четырех парогенераторах реактора ВВЭР-100 на мощность энергоблока, так как во время эксплуатации изменение количества трубок невозможно.

**Постановка задания.** Целью статьи является разработка математического описания процесса теплопередачи энергии воды первого контура (от ядерного реактора) к теплоносителю второго

контура при изменении количества трубок в парогенераторе для исследования изменения мощности реактора ВВЭР-1000.

**Изложение основного материала исследования.** Водо-водяной реактор состоит из двух непересекающихся контуров. Первый контур – это и есть реактор, в котором загружено ядерное топливо. Кроме того, в этот же контур включается парогенератор и насосы, позволяющие перекачивать воду, находящуюся под давлением.

В первом контуре водо-водяного реактора вода разогревается до 320°C, жидкое состояние воды поддерживается за счет давления в 16 МПа.

Вода, нагретая за счет реакции деления ядер атомов, двигается по трубам к парогенератору. Там она превращается в пар и подогревает коллектор с водой второго контура. Благодаря такой технологии радиоактивная вода не попадает во второй контур.

Нагретая паром первого контура вода попадает в парогенератор второго контура, где ее температура равна 280°C, а давление – 6,4 МПа. В таком состоянии пар продолжает двигаться по трубам второго контура и достигает турбины, при раскручивании которой образовывается электричество [6].

Задачей данного исследования является определение зависимости температуры теплоносителя первого контура от изменения количества трубок в парогенераторе.

Количество трубок, участвующих в теплообмене, определяет площадь поверхности теплообмена, вычисляемую по формуле площади боковой поверхности цилиндра (1):

$$S = n \cdot \pi \cdot d_H \cdot h, \quad (1)$$

где  $h$  – длина одной трубки теплоносителя, (м);  $d_H$  – внешний диаметр трубки (м);  $n$  – количество трубок (шт.).

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле (2):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от первого теплоносителя к стенке;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки ко второму теплоносителю;  $\delta_w$  – толщина стенки трубки (мм);  $\lambda_w$  – теплопроводность материала теплообменной трубки (Вт/°C).

Зная толщину стенки трубки и теплопроводность материала, из которого она изготовлена, коэффициенты теплоотдачи можно вычислить по формулам (3):

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_B} \text{ и } \alpha_2 = 0,146 \cdot p^{0,5} \cdot \Delta t^{2,33}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность первичного теплоносителя (Вт/°C);  $Nu$  – число Нуссельта;  $d_B$  – внутренний диаметр трубки (м);  $p$  – давление в парогенераторе (Па);  $\Delta t$  – разность температур (°C), которая для первого приближения задается в размере 30°C.

Для нахождения коэффициента теплоотдачи необходимо найти число Нуссельта:

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Также необходимо определить такие составляющие, как число Прандтля и число Рейнольдса.:

$$Pr = \frac{v \cdot c \cdot \rho}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $v$  – коэффициент кинематической вязкости (Па·с);  $c$  – удельная теплоемкость (Дж/кг·°C);  $\rho$  – плотность жидкости (кг/м<sup>3</sup>);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (Вт/°C);

$$Re = \frac{w \cdot d_B}{\nu}, \quad (6)$$

где  $w$  – скорость движения первичного теплоносителя (м/с).

Скорость движения первичного теплоносителя определяется по формуле (7):

$$w = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d_B^2 \cdot n \cdot \rho}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность первичного теплоносителя (кг/м<sup>3</sup>);  $m$  – массовый расход греющей воды (кг/с).

Разность температур первого контура (8):

$$\Delta t_r = (t_1 - t_2) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot S}{G \cdot c}}\right), \quad (8)$$

где  $t_1$  – температура на входе в парогенератор (°C);  $t_2$  – температура насыщения внутри парогенератора (°C).

Зная разность температур, определим искомую температуру:

$$t = t_1 - \Delta t_r. \quad (9)$$

Было принято допущение, что в реактор подается вода из четырех парогенераторов (рис. 1) с разным количеством трубок. С уменьшением числа задействованных в процессе теплопередачи трубок на 5, 10 и 15% от номинального количества рассчитана температура на выходе каждого из четырех парогенераторов. Результаты расчетов приведены в таблице 1 [7].

Определим среднее отклонение температуры от номинальной (280°C):

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4}{4} = 1,56 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10)$$

Существует такое понятие, как «температурный эффект реактивности» (далее – ТЭР) реактора – при рассматриваемой средней температуре теплоносителя в активной зоне  $t_r$  это величина

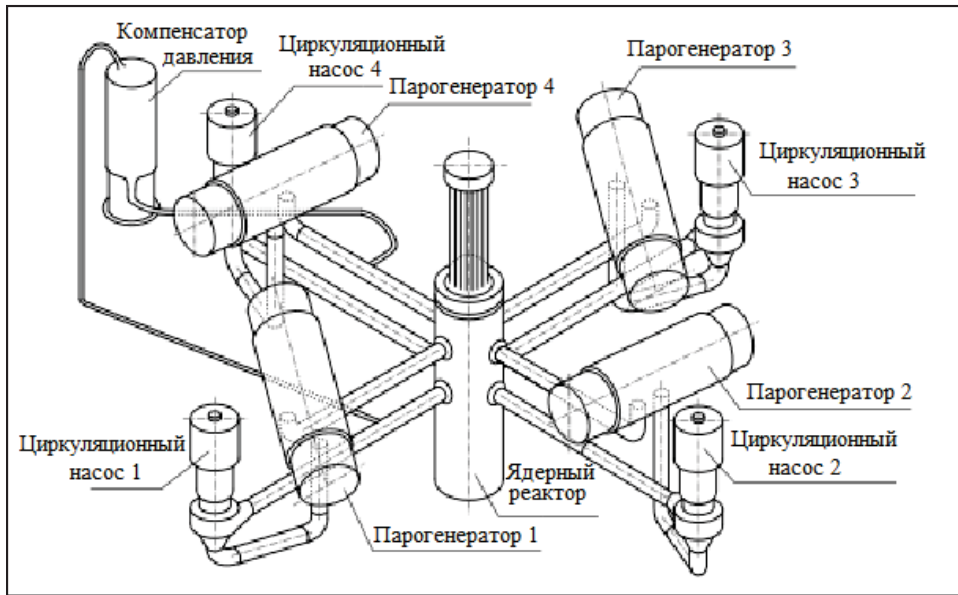


Рис. 1. Схема подключения парогенераторов к реактору

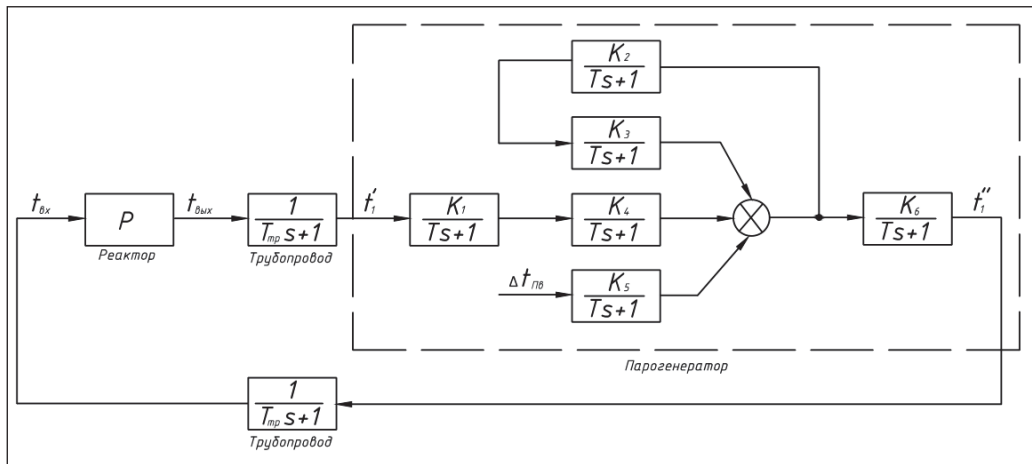


Рис. 2. Структурная схема энергоблока реактора ВВЭР-1000

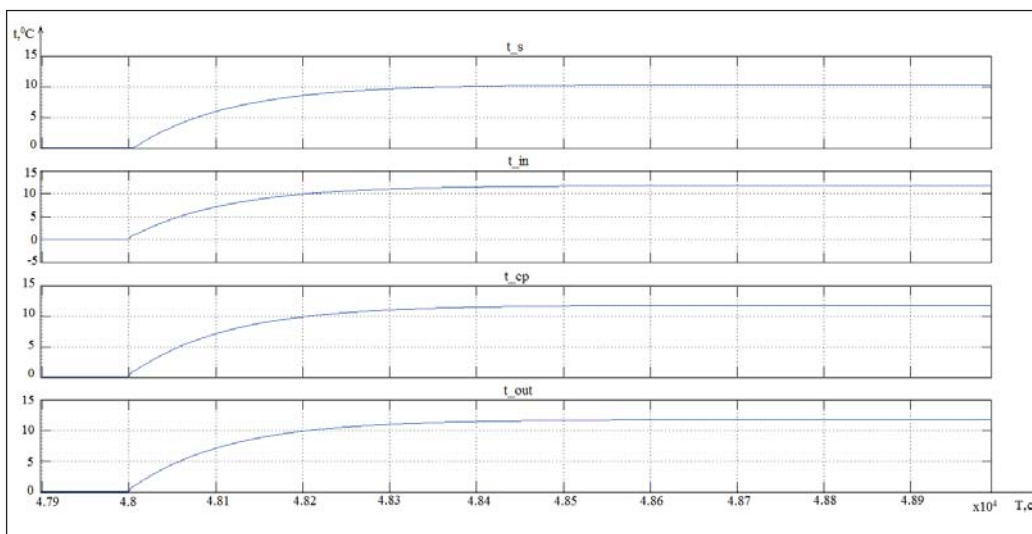


Рис. 3. Изменение температуры

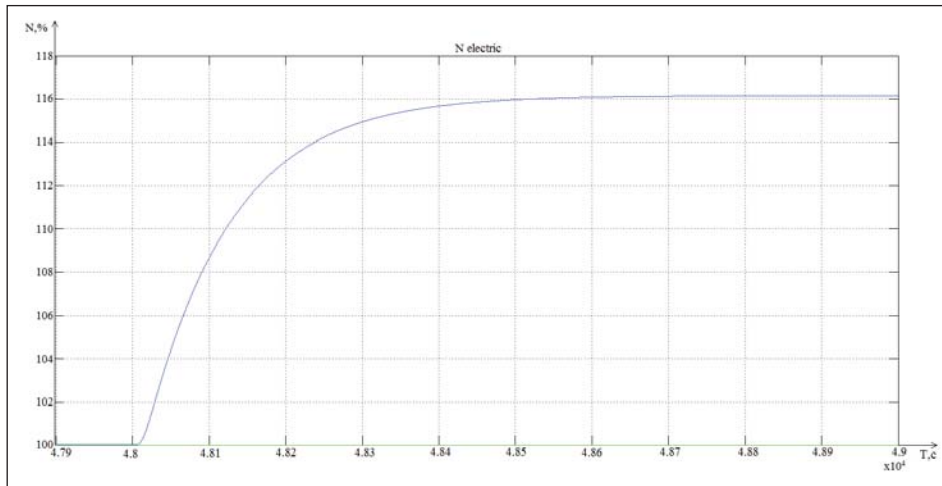


Рис. 4. Изменение мощности

изменения реактивности реактора при его разогреве от 20°C до этой температуры.

Температурный эффект реактивности в общем случае определяется по формуле:

$$\rho_i(t_T) = \int_{20}^{t_T} \alpha_i(t_T) dt_T, \quad (11)$$

где  $\alpha_i(t_T)$  – температурный коэффициент реактивности (ТКР).

Таблица 1

Зависимость температуры от количества трубок

Парогенератор	Количество трубок	% соотношение	Температура, °C
1	11 000	100	280,7
2	10 450	95	281,24
3	9 900	90	281,83
4	9 350	85	282,48

В узком диапазоне изменения температур значение ТКР принимается постоянным, поэтому эффект реактивности определяют по формуле:

$$\Delta\rho_i = \alpha_i(t_T) \cdot \Delta t_T. \quad (12)$$

Однако важные с точки зрения эксплуатации температурные изменения реактивности в работающем реакторе и возникают именно при изменениях уровня мощности реактора.

Зная отклонения по температуре, смоделируем поведение реактора, используя имитационную модель энергоблока. Обобщенная структурная схема имитационной модели представлена на рисунке 2. Определим, как влияет на поведение реактора установленное отклонение температуры входного теплоносителя на 1,56°C.

Используемая математическая модель для двухконтурной ядерной энергетической установки с реакторами типа ВВЭР-1000 учитывает все сложные динамические процессы и описывается системой многих нелинейных дифференциальных уравнений [8].

В результате выполнения задачи в графической среде имитационного моделирования Simulink (Matlab) с установленной величиной возмущения температуры входного в реактор теплоносителя  $\Delta t = 1,56^\circ\text{C}$  были получены кривые разгона (рис. 3 и 4), указывающие на значительное отклонение параметров рассматриваемой системы.

Изменения температур:

$t_s$  – температура насыщения;

$t_{in}$  – температура воды на входе в реактор;

$t_{cp}$  – средняя температура;

$t_{out}$  – температура на выходе из реактора.

На графиках мы видим, что при увеличении температуры воды теплоносителя на 1,56°C после парогенератора за счет обратных связей в реакторе температура теплоносителя увеличивается примерно на 12°C, а мощность энергоблока увеличивается на 16%. Выявленные отклонения технологических параметров существенно влияют на работу энергоблока.

**Выводы.** В результате моделирования работы энергоблока при изменённом количестве трубок в парогенераторах, а следовательно, уменьшенной суммарной поверхности теплообмена четырех парогенераторов, работающих с реактором, выяснили, что при отклонении температуры даже в 1,5°C мощность реактора увеличивается более чем на 10%.

**Список літератури:**

1. Демченко В. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт. 2001.
2. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Пер. с англ. С. Пелых. Одесса: Астропринт, 2010. 248 с.
3. Цисельська Т. Удосконалення автоматизованої системи керування потужністю енергоблока АЕС для експлуатації у маневрених режимах добового циклу: автореф. дис. ... канд. техн. Наук. Одеса: ОНПУ, 2012. 24 с.
4. Maksimov M., Beglov K., Tsiselskaya T. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. Proceedings of the Odessa polytechnic university. Odessa, 2012. Iss. 1 (38). P. 99–106.
5. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M. Maksimov, S. Pelykh, O. Maslov, V. Baskakov. Nuclear Engineering and Design. 2009. Vol. 239. № 12. P. 3021–3026.
6. Новости высоких технологий. URL: <https://pop-hi-tech.ru/energetika/princip-raboty-aes-atomnoj-elektrostantsii.html>.
7. Рассохин Н. Парогенераторные установки атомных электростанций. Москва: Энергоатомиздат, 1987.
8. Максимов М., Беглов К., Цисельська Т. Модель реактора ВВЕР-1000 як об'єкта управління: монографія. Сучасні технології управління. Одеса: Вид-во С.В. Купрієнко, 2012.

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У ПАРОГЕНЕРАТОРІ ПГВ -1000**

*Під час експлуатації парогенераторів, що працюють спільно з ядерними реакторами ВВЕР-1000 атомних електростанцій, неминуче постає проблема розтріскування трубок і протікання води першого контуру, що зумовлює проведення планово-попереджувальних ремонтів. Під час планово-попереджувальних ремонтів заглушають трубки, що протекли, у результаті, з одного боку, зменшується площа теплообміну, а з іншого – збільшується швидкість руху теплоносія. Отже, актуальне дослідження залежності зміни температури теплоносія першого контуру ядерного реактора за зміни кількості трубок у парогенераторі атомної електростанції. Оцінено вплив зміни температури води першого контуру на потужність реактора.*

**Ключові слова:** парогенератор, ВВЕР-1000, температура, кількість трубок, АЕС.

**MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE STEAM GENERATOR SGV-1000**

*During the operation of steam generators working in conjunction with VVER-1000 nuclear power reactors of nuclear power plants, the problem of pipe cracking and the flow of primary circuit water inevitably arise, which causes scheduled preventive maintenance (PM). During PM, the flowing pipes are drowned, as a result of which, on the one hand, the heat exchange area decreases, and on the other hand, the velocity of the coolant increases. Thus, the problem of studying the dependence of the change in the temperature of the coolant of the primary circuit of the nuclear reactor, when the number of tubes in the steam generator of the nuclear power plant changes, becomes urgent. The effect of changing the water temperature of the primary circuit on the reactor power is estimated.*

**Key words:** Steam Generator, VVER-1000, temperature, number of tubes, Nuclear Power Plant (NPP).