

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА МОДЕЛИ РЕАКТОРА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ПРИКЛАДНОМ МАТЕМАТИЧЕСКОМ ПАКЕТЕ MATHCAD

А.В. Тихоненко

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Разработан комплекс программ аналитико-численных вычислений в прикладном математическом пакете MATHCAD для расчета модели реактора теплоснабжения малой мощности. В рамках модели решаются системы нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, описывающих стационарные и переходные теплогидравлические процессы при различных режимах работы реактора.

ВВЕДЕНИЕ

Возможности разработки реактора для теплоснабжения малой мощности (300 кВт) рассматривались в работах [1-5]. Затем в работе [6] была показана принципиальная возможность разработки реактора малой мощности с саморегулированием, причем для численного решения системы уравнений, описывающих стационарные и нестационарные режимы работы установки были использованы два независимых подхода: в виде программы на языке С и аналитико-численного алгоритма в прикладном математическом пакете MATHCAD.

Теплогидравлический расчет реактора МАСТЕР ИАТЭ [6] для переходного и стационарного режимов (см. схему и описание реактора в [6] и теплогидравлические соотношения в [7]) состоит в решении дифференциально-алгебраической системы нелинейных уравнений:

- системы дифференциальных уравнений нестационарной теплогидравлики, связывающих: среднее значение плотности потока тепла q_R на поверхности реактора с тепловой мощностью реактора N_R и производной по времени от средней температуры реактора T_R ; причем с учетом уравнения, связывающего среднюю температуру реактора T_R со средними значениями температур воды первого контура перед реактором T_{f1} и за реактором T_{f2} , средним значением плотности потока тепла q_R на поверхности реактора и тепловой мощностью реактора N_R , из дифференциального уравнения можно исключить величину q_R (с учетом среднего значения плотности ρ_R и удельной теплоемкости c_R материала реактора); среднее значение плотности потока тепла q_R на поверхности реактора с массовым расходом воды G_f первом контуре, раз-

ность средних значений температур воды первого контура перед реактором T_{f1} и за реактором T_{f2} и производной по времени от полусуммы T_{f1} и T_{f2} ; причем из этого дифференциального уравнения также можно исключить величину q_R ; расходные теплоемкости воды первого $G_f \cdot C_f$ и второго контуров $G_0 \cdot C_{f0}$ с разностями $(T_{f2} - T_{f1})$ и $(T_{02} - T_{01})$ температур, а также с производными по времени от полусумм этих температур (с учетом масс металла M_{W_ex} и воды M_{f_ex} в теплообменнике, удельной теплоемкости C_{ex} металла трубок теплообменника, массы воды M_f и массы металла M_w в корпусе первого контура установки, удельной теплоемкости C_w металла корпуса первого контура);

- системы алгебраических уравнений, связывающих массовый расход воды G_f в первом контуре установки при естественной циркуляции с разностью средних значений температур воды первого контура перед реактором T_{f1} и за реактором T_{f2} ; среднюю температуру реактора T_R со средними значениями температур воды первого контура перед реактором T_{f1} и за реактором T_{f2} , средним значением плотности потока тепла q_R на поверхности реактора и тепловой мощностью реактора N_R ; выражение для расчета температуры T_{02} через температуры T_{01} и T_{f2} , расходные теплоемкости воды первого $G_f \cdot C_f$ и второго контуров $G_0 \cdot C_{f0}$ и коэффициент теплопередачи в теплообменнике, для которого использовалась соответствующая формула;

- уравнения теплового баланса, связывающего массовые расходы воды G_f и G_0 в первом и во втором контурах соответственно со средними значениями температур воды первого контура перед реактором T_{f1} и за реактором T_{f2} и значениями температур воды на входе T_{01} и на выходе T_{02} второго контура соответственно; уравнения теплопередачи, связывающего эти параметры с площадью поверхности теплообменника;

- системы уравнений нестационарной кинетики установки: двумя дифференциальными уравнениями, связывающими тепловую мощность реактора N_R с реактивностью реактора ρ , долей запаздывающих нейтронов β и концентрацией предшественников запаздывающих нейтронов C_{star} ; формулой для реактивности реактора ρ , выраженной через ее начальное значение и зависящей от разностей начальной T_{R0} и текущей T_R температурами реактора, начальной T_{f1_0} и текущей T_{f1} средними значениями температур воды первого контура перед реактором, начальной T_{01} и текущей T_{01t} температурами реактора воды на выходе из второго контура, начальным G_0 и текущим G_{0t} массовыми расходами воды во втором контуре; уравнениями, связывающими тепловую N_R и нейтронную N_{R_n} мощности реактора;

- формул, определяющих коэффициент теплоотдачи от поверхности реактора к воде первого контура α_f ; коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве теплообменника α_{f_ex} ; коэффициент теплоотдачи в трубке теплообменника α_{f0} .

В систему входят параметры, включающие суммарный приведенный коэффициент ξ_Σ сопротивления первого контура; среднее значение коэффициента теплопроводности λ_R реактора; коэффициент теплоотдачи α_f от поверхности реактора к воде первого контура; удельные теплоемкость, плотность, коэффициент термического расширения, коэффициент теплопроводности, динамический коэффициент вязкости, число Прандтля воды, определяемые для средней температуры воды первого контура (c_f , ρ_f , β_f , λ_f , μ_f , Pr_f); удельная теплоемкость воды во втором контуре c_{f0} ; коэффициент теплопроводности материала трубок λ_{ex} ; коэффициент теплопроводности, динамический коэффициент вязкости, число Прандтля воды, определяемые по средней температуре во втором контуре (λ_{f0} , μ_{f0} , Pr_{f0}); температурный коэффициент реактивности α_R ; коэффициент реактивности по среднему значению температуры воды первого контура перед реактором α_{T_f1} ; коэффициент реактивности по среднему значению температуры воды на входе второго контура α_{T_01} ; коэффициент реактивности по массовому расходу воды во втором контуре α_{G_0} ; постоянную распада λ ; время жиз-

ни нейтронов в реакторе τ_m ; другие параметры, определяющие геометрические, тепловые и технические характеристики реактора.

Заметим, что значение T_{f2} выбирается из условий эксплуатации, а значение T_{f1} рассчитывалось по найденному значению ΔT_f .

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ В MATHCAD

Особенности применения пакета MATHCAD [8] требуют сначала определения параметров и необходимых функций, и только потом записи самой системы уравнений (заметим также, что с этим связано использование в работе некоторых нетрадиционных обозначений). Поэтому система уравнений, описывающая теплогидравлические процессы (с учетом отрицательных обратных связей) и связывающая мощность реактора с температурой реактора и температурами теплоносителя первого и второго контуров, приводится после процедуры задания параметров.

Переменные и параметры системы в MATHCAD

Опишем совокупность переменных и параметров, определяющих работу реактора. Система уравнений содержит большое количество параметров, часть из которых являются константами, а остальные – функциями, зависящими от переменных системы.

1. Переменными, описывающими переходные процессы при работе реактора, являются: T_R – средняя температура реактора; $T_{f12} = (T_{f1} + T_{f2})/2$ – полусумма средних значений температур воды первого контура перед реактором и за реактором; $\Delta T_f = (T_{f2} - T_{f1})$ – разность средних значений температур воды первого контура перед реактором и за реактором; T_{02} – температура воды на выходе из второго контура; N_{R_n} – нейтронная мощность реактора; C_{star} – концентрация предшественников запаздывающих нейтронов.

2. Система уравнений содержит более 40 постоянных параметров; причем их количество может изменяться при наложении на систему дополнительных связей и введении новых соотношений. Эти параметры описывают геометрические и механические свойства системы, тепловые свойства веществ, характеристики реактора. В частности, давление воды первого контура на середине высоты реактора принимается при расчетах равным $p = 1.4$ атм, высота активной зоны реактора принимается равной $H_R = 1.6$ м и т.п.

Все значения параметров задаются в системе СИ (поэтому далее, если специально не оговорено, размерности опускаются).

3. Система уравнений содержит 12 параметров, зависящих от температур воды и реактора: коэффициент теплопроводности λ_f воды, число Прандтля Pr_f , динамический коэффициент вязкости воды μ_f , удельная теплоемкость воды C_f , коэффициент термического расширения воды β_f , плотность воды ρ_f , определяемые по средней температуре в первом контуре: $\lambda_f = \lambda_f(T_{f12})$ и т.п.; коэффициент теплопроводности воды λ_{f0} , число Прандтля Pr_{f0} , динамический коэффициент вязкости воды μ_{f0} , удельная теплоемкость воды C_{f0} , определяемые по средней температуре во втором контуре: $\lambda_{f0} = \lambda_{f0} \cdot [0.5 \cdot (T_{01} + T_{02})]$ и т.п.; коэффициент теплопроводности материала реактора $\lambda_R(T_R)$, среднее значение плотности материала реактора $\rho_R(T_R)$, среднее значение удельной теплоемкости материала реактора $C_R(T_R)$, температурный коэффициент реактивности λ_R .

Параметры, зависящие от температуры (λ_f , Pr_f , μ_f , C_f , β_f , ρ_f , ρ_R , C_R , λ_R), средствами MATHCAD представлены в виде полиномов, для чего была составлена специальная программа.

Система для нестационарной теплогидравлики реактора в MATHCAD

Не выписывая систему дифференциальных и алгебраических уравнений для нестационарной теплогидравлики реактора в MATHCAD целиком, приведем в качестве примера одно из уравнений системы

$$N_R = \frac{T_R - \frac{T_{f1} + T_{f2}}{2}}{\frac{1}{\alpha_f} + \frac{R_R}{4 \cdot \lambda_R}} \cdot F_R + V_R \cdot c_R \cdot \rho_R \cdot \frac{dT_R}{dt}, \quad (1)$$

где α_f – коэффициент теплоотдачи от поверхности реактора к воде первого контура, G_f – массовый расход воды в первом контуре установки при естественной циркуляции:

$$\alpha_f = \frac{0.023 \cdot \lambda_f}{(D - 2 \cdot R_R)} \cdot \left(\frac{2 \cdot G_f}{\mu_f \cdot \pi (R_R + D/2)} \right)^{0.8} \cdot Pr_f^{0.4}, \quad (2)$$

$$G_f = \rho_f \cdot F_p \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \beta_f}{\xi_\Sigma} \cdot (H_R + 2L_{ry} - H_{ex}) \cdot (T_{f2} - T_{f1})}, \quad (3)$$

для того, чтобы показать, насколько вид программируемых в MATHCAD выражений (рис. 1) близок к виду формул (1)–(3) соответственно:

$$N_R(t) = F_R \cdot \frac{T_R(t) - \frac{T_{f1}(t) + T_{f2}(t)}{2}}{\frac{1}{\alpha_f(T_{f12}(t))} + \frac{R_R}{4 \cdot \lambda_R(T_R(t))}} + V_R \cdot \rho_R(T_R(t)) \cdot C_R(T_R(t)) \cdot \frac{d}{dt} T_R(t) \quad (4)$$

$$\alpha_f(T_{f12}(t)) = \frac{0.023 \cdot \lambda_f(T_{f12}(t))}{D - 2 \cdot R_R} \cdot \left[\frac{2 \cdot G_f(T_{f12}(t), \Delta T_f(t))}{\mu_f(T_{f12}(t)) \cdot \pi \cdot \left(R_R + \frac{D}{2} \right)} \right]^{0.8} \cdot Pr_f(T_{f12}(t))^{0.4} \quad (5)$$

$$G_f(T_{f12}(t), \Delta T_f(t)) = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} - R_R^2 \right) \cdot \rho_f(T_{f12}(t)) \cdot \sqrt{\frac{g \cdot (2 \cdot L + H_R - H_{ex})}{\xi_\Sigma} \cdot \beta_f(T_{f12}(t)) \cdot \Delta T_f(t)} \quad (6)$$

Рис. 1. Часть скриншота программы в MATHCAD

При этом в формулах (4)–(6) часть параметров системы представляют собой функции соответствующих температур, зависящих в свою очередь от времени. Все уравнения системы (которая качественно была описана во введении) для совокупности переменных T_R , T_{f12} , ΔT_f , T_{02} , N_{R_n} , C_{star} , R_1 , R_2 , R_3 программируются аналогичным образом.

При программировании системы учитываются возможности работы реактора с обратной связью по среднему значению температуры воды первого контура перед реактором, температуре воды на входе второго контура и массовому расходу воды во втором контуре (коэффициенты $\alpha_{T_{01}}$, $\alpha_{T_{f1}}$, $\alpha_{G_{00}}$). Кроме того, система уравнений может дополнительно модифицироваться средствами MATHCAD для того, чтобы учесть концентрацию предшественников запаздывающих нейтронов.

Система уравнений для стационарного состояния в MATHCAD

Для решения дифференциально-алгебраической системы нелинейных уравнений, описывающих динамику процессов в реакторе, необходимо задание начальных значений параметров системы. В качестве начальных значений параметров зададим их значения для некоторого стационарного состояния. Для этого необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений, описывающих заданное стационарное состояние.

Система нелинейных алгебраических уравнений для стационарного состояния для совокупности переменных $T_R, T_{f12}, \Delta T_f, T_{02}, C_{star}, R_1, R_2, R_3$ может быть получена в MATHCAD из дифференциально-алгебраической системы, обращением в нуль всех производных по времени; и здесь эта система не приводится. Конкретное стационарное состояние можно определить, задавая начальное значение средней температуры воды на входе второго контура T_{01} и начальную нейтронную мощность реактора соответственно N_{R_n} .

СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ

Получим решение системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих стационарное состояние реактора, характеризуемых начальными температурой $T_{01} = 20^\circ\text{C}$ на входе второго контура и нейтронной мощностью $N_{R_n} = 2 \text{ Вт}$. Для этого воспользуемся инструментами MATHCAD для решения системы нелинейных алгебраических уравнений: при этом сначала задаются «затравочные» значения неизвестных параметров системы уравнений и такая система решается в MATHCAD автоматически («затравочные» значения можно получить, выполнив несколько итераций).

В результате для стационарного состояния получим решение системы в виде набора значений параметров (табл. 1) (кроме самих решений здесь приведены некоторые связанные с ними параметры).

Аналогично могут быть получены решения для других стационарных состояний.

Таблица 1

Решения системы для стационарного состояния

T_R	T_{f1}	T_{f2}	T_{02}	C_{star}	R_1	R_2	R_3
20.01	20	20	20	182	3.11	23.33	77.33

ДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Процессы, воздействующие на систему

Смоделируем процессы, воздействующие на реактор, который находится в описанном стационарном состоянии. Зададим время работы реактора $t_R = 9 \cdot 10^5 \text{ с}$, коэффициент, определяющий рост реактивности реактора $k = 1.4$ и коэффициенты, определяющие сброс расхода воды во втором контуре (на 50 и 99% соответственно) $r_1 = 0.5$ и $r_2 = 0.99$. В рамках модели для исследования решения системы опишем (с помощью гиперболических функций) переходные процессы в реакторе: изменение во времени реактивности реактора, температуры воды на входе во втором контуре и массового расхода воды во втором контуре (эти изменения представлены графически на рис. 2–4).

Переходные режимы

Для получения отклика системы на внешние воздействия необходимо решить дифференциально-алгебраическую систему нелинейных уравнений. Отклик системы за-

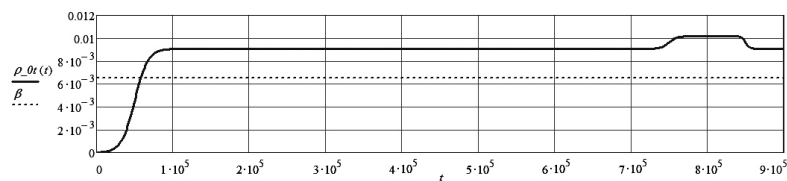


Рис. 2. Реактивность реактора

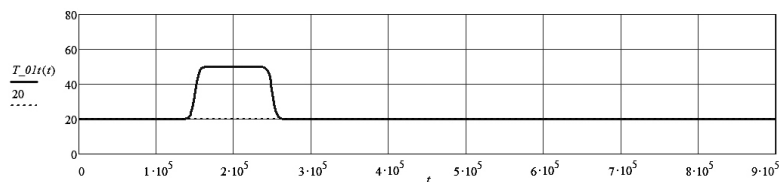


Рис. 3. Температура воды на входе во втором контуре

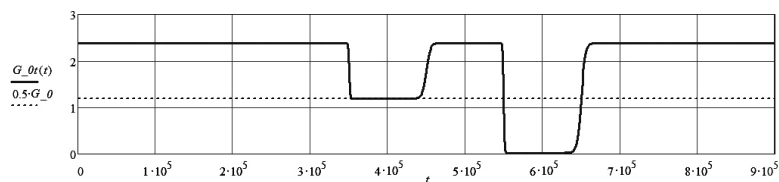


Рис. 4. Массовый расход воды во втором контуре

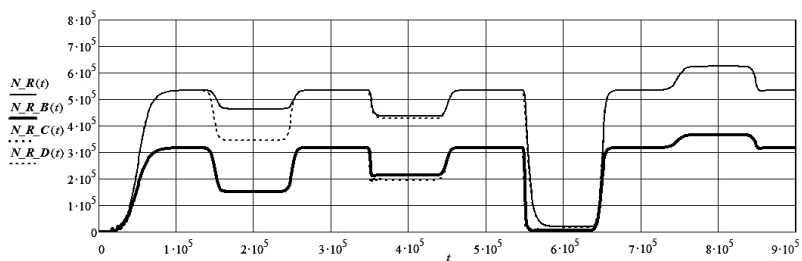


Рис. 5. Мощность реактора

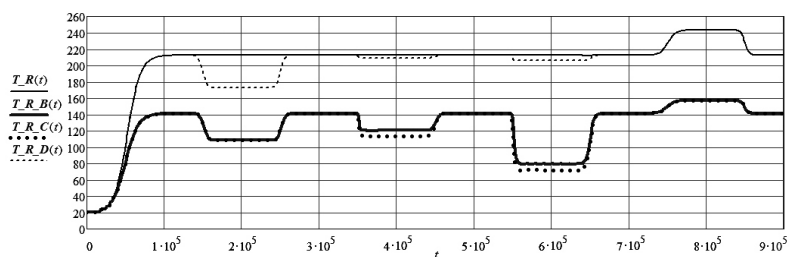


Рис. 6. Температура реактора

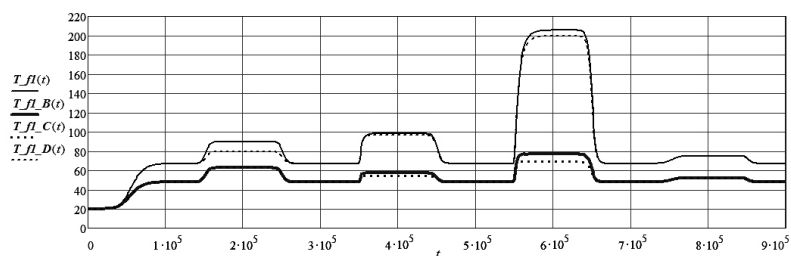


Рис. 7. Средняя температура воды первого контура

висит от ее динамических свойств и от наличия (или отсутствия обратных связей), которые можно учесть использованием соответствующих модельных режимов (табл. 2).

Замечание. Наличие регулировки по T_{f1} означает наличие обратной связи по среднему значению температуры воды первого контура перед реактором; наличие регулировки по G_0 означает наличие обратной связи массовому расходу воды во втором контуре; наличие регулировки по T_{01} означает наличие обратной связи массовому расходу воды во втором контуре.

Таблица 2

Переходные режимы

Режим	Дополнительные регулировки	Значения параметров		
		$\alpha_{T,1}$	$\alpha_{G,0}$	$\alpha_{T,01}$
Режим А	–	0	0	0
Режим В	1 регулировка по T_{f1}	10^{-4}	0	0
Режим С	2 регулировки по T_{f1} , G_0	10^{-4}	$0.5 \cdot 10^{-3}$	0
Режим D	2 регулировки по G_0 , T_{01}	0	10^{-4}	$0.5 \cdot 10^{-4}$

Численные значения переменных и их графическая визуализация

Численное решение системы уравнений в MATHCAD для переходных режимов записывается оператором, возвращающим численные значения переменных T_R , T_{f12} , ΔT_f , T_{01} , $N_{R,n}$, C_{star} , R_1 , R_2 , R_3 . Кроме того, исходя из этих решений, можно определить и некоторые другие параметры, характеризующие систему. MATHCAD дает возможность получить численные значения переменных системы для любого момента времени, а также выполнить интерактивную визуализацию результатов расчетов путем вывода данных в виде обычных и анимированных во времени графиков зависимостей параметров, определяющих работу реактора.

Приведем в качестве результатов расчетов графики изменения со временем параметров реактора для предложенных режимов (рис. 5–7).

Кроме того, программа дает возможность получить графические и численные результаты для всего набора переменных, характеризующих работу реактора: нейтронной мощности реактора, реактивности реактора, температуры воды на выходе из второго контура и. т.п. MATHCAD позволяет также произвести в программе простые и наглядные изменения значений параметров реактора, изменения системы уравнений (для учета необходимых связей и модельных приближений).

На графиках тонкой сплошной линией на отражен режим А, толстой сплошной линией – режим В; пунктирной – режим С и точечной линией – режим D.

Приведем также численные значения некоторых параметров реактора для 11 характерных моментов времени (табл. 3).

Таблица 3

Характерные значения параметров реактора

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho\rho$	0	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$
T_{01}	1	0	$6.65 \cdot 10^{-6}$	$2.49 \cdot 10^{-8}$	$1.17 \cdot 10^{-10}$	$-1.09 \cdot 10^{-10}$	$1.97 \cdot 10^{-10}$	$-1.45 \cdot 10^{-10}$	$-1.01 \cdot 10^{-7}$	$-5.01 \cdot 10^{-10}$	$-7.64 \cdot 10^{-11}$
G_{01}	2	20	20	20	50	20	20	20	20	20	20
G_{02}	3	2.38	2.38	2.38	2.38	1.19	2.38	$2.38 \cdot 10^{-2}$	2.38	2.38	2.38
N_R	4	2	$2.45 \cdot 10^5$	$5.33 \cdot 10^5$	$4.64 \cdot 10^5$	$5.34 \cdot 10^5$	$4.36 \cdot 10^5$	$5.34 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^4$	$5.34 \cdot 10^5$	$6.24 \cdot 10^5$
T_R	5	20.01	$1.02 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$	$2.43 \cdot 10^2$	$2.12 \cdot 10^2$
T_{f1}	6	20	33.49	66.71	89.78	66.96	97.96	66.96	$2.06 \cdot 10^2$	66.96	74.99
T_{f2}	7	20	41.62	79.73	$1.01 \cdot 10^2$	80	$1.09 \cdot 10^2$	80	$2.07 \cdot 10^2$	80	89.13
ΔT_f	8	$4.5 \cdot 10^{-3}$	8.13	13.02	11.25	13.04	10.63	13.04	1.08	13.04	14.14
T_{02}	9	20	36.94	73.38	96.53	73.64	$1.08 \cdot 10^2$	73.64	$2.07 \cdot 10^2$	73.64	82.73

Разработанные в рамках модели программы дают возможность анализировать работу реактора при различных стационарных состояниях и переходных режимах, изучить влияние обратных связей и необходимости дополнительных регулировок (в частности, как видно из графиков, режим А не соответствует условиям эксплуатации реактора).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана программа в среде прикладного пакета MATHCAD, с помощью которой решена система нелинейных алгебраических уравнений, описывающая стационарные режимы работы реактора малой мощности МАСТЕР ИАТЭ, характеризующиеся начальными температурой и нейтронной мощностью.

2. Разработан комплекс программ в MATHCAD, с помощью которого решена система нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, описывающая переходные теплогидравлические процессы реактора МАСТЕР ИАТЭ, учитывающие:

- а) изменение со временем реактивности реактора;
 - б) изменение со временем температуры воды на входе второго контура;
 - в) изменение со временем массового расхода воды во втором контуре;
- при различных режимах работы реактора с дополнительными регулировками:
- а) по среднему значению температуры воды первого контура перед реактором;
 - б) по массовому расходу воды во втором контуре;
 - в) по температуре воды на входе второго контура.

3. Комплекс программ в MATHCAD дает возможность моделировать различные режимы работы реактора путем элементарных действий по изменению значений параметров, изменений системы уравнений, учитывающих дополнительные связи и возможности дополнительных модельных приближений (с целью интерактивного анализа и выявления оптимальных режимов работы реактора). Комплекс позволяет проводить контроль над каждым этапом решения систем уравнений, включающий: аналитическую проверку уравнений и связей, получение численных данных для любых переменных и параметров на любом этапе, графическое представление промежуточных любых данных, а также интерактивную визуализацию результатов расчетов путем вывода данных в виде обычных и анимированных во времени графиков зависимостей отдельных или всех параметров, определяющих работу реактора.

4. Численные решения систем уравнений, описывающих стационарные и переходные режимы работы установки, полученные аналитико-численным алгоритмом в прикладном математическом пакете MATHCAD совпадают с результатами, полученными в виде программы на языке С [6].

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. Ю.А. Казанскому и д.т.н. Ю.С. Юрьеву за физическую постановку задачи, внимание к работе и полезные замечания.

Литература

1. Казанский Ю.Л., Матусевич Е.С., Левченко В.А., Юрьев Ю.С. и др. Технические предложения для разработки концепции подземной ЯЭУ сверхмалой мощности МАСТЕР ИАТЭ/ Сборник тезисов, докладов и сообщений. Ядерное общество России. X ежегодная конференция (Обнинск, 28 июня – 2 июля 1999г.). – Обнинск, 1999. – С. 173.
2. Кураченко Ю.А., Матусевич Е.С. Расчет характеристик защиты от излучений малогабаритного реактора МАСТЕР ИАТЭ/ Сборник тезисов, докладов и сообщений. Ядерное общество России. X ежегодная конференция (Обнинск, 28 июня – 2 июля 1999 г.). – Обнинск, 1999. – С. 230.
3. Балакин И.П., Казанский Ю.А., Уваров А.А. Исследование свойств саморегулирования реактора МАСТЕР ИАТЭ/ VI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: Тезисы докл. (Обнинск, 4-8 октября 1999 г.). – Обнинск: ИАТЭ, 1999. – С. 35.
4. Левченко В.А., Юрьев Ю.С., Казанцев А.А. и др. Теплогидравлические характеристики установки МАСТЕР ИАТЭ/ VI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кад-

ров». Тезисы докл. (Обнинск, 4-8 октября 1999 г.). – Обнинск: ИАТЭ, 1999. – С. 40.

5. Казанский Ю.А., Травлеев А.А. Линеаризация роста во времени реактивности за счет выгорающего поглотителя/ VII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Тезисы докл. - Обнинск: ИАТЭ, 2001. - С.70.

6. Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С., Юрьев Ю.С., Балакин И.П., Белугин В.А., Дорохович С.Л., Казанцев А.А., Тихоненко А.В., Травлеев А.А., Уваров А.А. Саморегулируемый реактор сверхмалой мощности для теплоснабжения «МАСТЕР-ИАТЭ»//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. - № 3. – С. 63-71.

7. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.

8. Тихоненко А.В. Компьютерные математические пакеты в курсе общей физики. – Обнинск: ИАТЭ, 2003. – 84 с.

Поступила в редакцию 5.02.2007