

**На конкурс научных работ Российской ассоциации содействия науки**  
*(в рамках реализации социально значимого проекта «Научные традиции: диалог поколений»)*

**Исследование статистических характеристик показаний датчиков СКГО РБМК**

Автор: Луговая Дарья Андреевна, студент гр. Б13-501, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Москва, 02 «июня» 2017 г.

## **Аннотация**

Страниц 21, рисунков 3 , таблиц 4 , графиков 6, список литературы из 15 наименований.

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК, АЗОТНАЯ АКТИВНОСТЬ, АКТИВНАЯ ЗОНА, РБМК, РАСХОД ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ, МОДЕЛЬ АКТИВАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

В пояснительной записке приведено исследование зависимости статистических характеристик показаний датчиков СКГО от величины и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале. Исследования проводились с помощью математической модели азотной активности теплоносителя в реакторе РБМК.

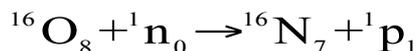
## **Оглавление:**

Введение.....	4
1. Технические средства контроля активности теплоносителя в ТК реактора РБМК.....	5
2. Математическая модель азотной активности теплоносителя в реакторе РБМК .....	6
3. Программная реализация математической модели азотной активности теплоносителя.....	9
3.1. Выбор программного средства для реализации модели активации теплоносителя.....	9
3.2. Адаптация программы под современную среду программирования.....	10
4. Исследование зависимости статистических характеристик показаний датчиков СКГО от величины и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале .....	11
Заключение.....	16
Список литературы.....	17

## Введение

На энергоблоках с реакторами типа РБМК установлена система контроля за герметичностью оболочек (СКГО) тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Основной задачей этой системы является фиксация гамма-излучения осколков деления, выходящих в теплоноситель в случае разгерметизации ТВЭЛ.

Вместе с тем, для измерения  $\gamma$ -активности теплоносителя в реакции быстрых нейтронов (с энергией более 10 МэВ) с кислородом воды:



(радионуклид  $^{16}\text{N}$  испускает гамма-кванты с энергиями 6,13–7,11 и 2,75 МэВ[13])

также может быть использована СКГО, которая в энергетическом диапазоне выше 3,5 МэВ фиксирует наведенную активность теплоносителя.

Наведенная активность воды в активной зоне (АЗ) зависит от величины плотности потока быстрых нейтронов, т.е. от мощности, а в точке измерения радиоактивности – от времени доставки, т.е. при известном расстоянии – от расхода теплоносителя. Таким образом, величина «азотной» активности теплоносителя несет в себе информацию и о мощности, и о расходе теплоносителя[1, 2, 12].

Как было показано в различных работах, существует возможность определения расхода теплоносителя по информации об его активности[1, 2, 6, 12, 14].

Целью данной учебно-исследовательской работы является исследование зависимости статистических характеристик показаний датчиков СКГО от величины и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале с помощью математической модели азотной активности теплоносителя в реакторе РБМК.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучение математической модели активации теплоносителя в реакторе РБМК.
2. Выбор программного средства для реализации модели активации теплоносителя и адаптация программы под современную среду программирования.
3. Разработка схемы проведения исследований.
4. Анализ результатов исследования статистических характеристик показаний датчиков СКГО и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале.

## 1. Технические средства контроля активности теплоносителя в ТК реактора РБМК

Система контроля герметичности оболочек твэлов предназначена для обнаружения технологических каналов с негерметичными тепловыделяющими сборками, оценки степени негерметичности оболочек твэлов, а также для контроля активности продуктов деления в паре после сепараторов и контроля расхода теплоносителя через ТК[2]. Вместе с тем, СКГО измеряет также активность теплоносителя, обусловленную взаимодействием быстрых нейтронов (с энергией более 10 МэВ) с кислородом воды. Понятно, что наведенная в теплоносителе активность зависит от мощности канала и расхода теплоносителя через него.

Конструктивно система КГО состоит из восьми сдвоенных коллиматоров с блоками детектирования, установленных на тележках и с помощью системы перемещения передвигающихся в восьми коробах, которые расположены вдоль вертикальных рядов трубопроводов пароводяных коммуникаций. С каждой стороны короба расположено до 115 трубопроводов, объединенных в нитку. Всего ниток 16. Коллимационные отверстия детекторов направлены в противоположные стороны, и поэтому каждый детектор может контролировать по одному ряду трубопроводов. Коллимационные отверстия расположены таким образом и имеют такую конфигурацию, что при движении детектора вдоль рядов трубопроводов на кристалл каждого блока детектирования в основном попадают  $\gamma$ -кванты от трубопровода, напротив которого находится в данный момент отверстие коллиматора.

При движении тележки системы КГО (рис.1.) расположенный на ней датчик регистрирует  $\gamma$ -излучение через равные промежутки времени осуществляет «прописку». При приближении к ПВК (пароводяные коммуникации) регистрируется максимальное значение активности, а форма регистрируемого сигнала напоминает колокол. При необходимости датчик поканального КГО может быть остановлен против трубопровода «подозреваемого» ТК для временного контроля осколочной активности и записи характера ее изменения только в данном выбранном ТК. Максимальное значение сигнала в каждом пике соответствует суммарной активности теплоносителя и окружающего оборудования (барабана-сепаратора, металлоконструкций и др.). Сигналы с блоков детектирования по высокочастотным кабелям подаются на сигнально-измерительную аппаратуру. Значение активности в каналах с дополнительным поглотителем меньше и обусловлено активацией за счет быстрых нейтронов, рожденных в ТВС соседних каналов. Также могут встречаться неразведенные ПВК.

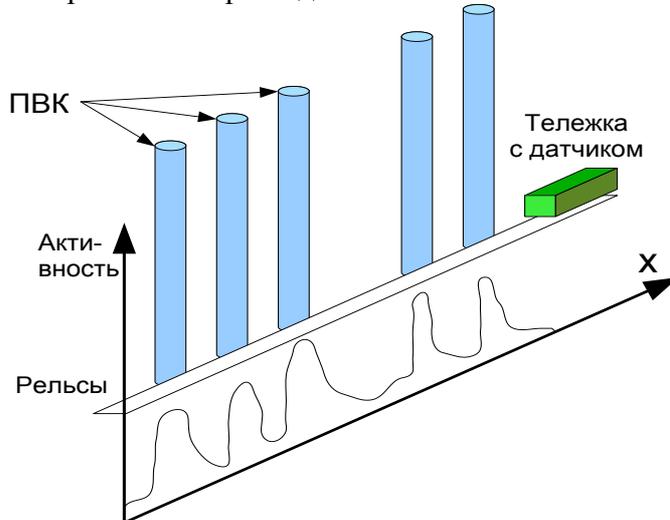


Рисунок 1: Схема прокатки и получения активности.

## 2. Математическая модель азотной активности теплоносителя в реакторе РБМК

В топливном канале (ТК) реактора РБМК теплоноситель, поступающий на вход в активную зону, нагревается до температуры насыщения на экономайзерном участке, затем частично испаряется на испарительном участке. Таким образом, характерная особенность процесса активации – наличие двух фаз: жидкой и паровой. Физической моделью двухфазного потока, охватывающей широкий круг режимов и практически применяемой для РБМК, является модель гомогенного потока со скольжением (ГСМ). При этом концентрации фаз можно считать непрерывными функциями координат [9]. Именно такая модель потока и принята при выводе модели активации теплоносителя в реакторе типа РБМК.

Введем следующие обозначения:

$A$  – переводной коэффициент,  $1/(\text{Дж} \cdot \text{кг})$ ;

$N'$  – плотность ядер азота в жидкой фазе теплоносителя,  $\text{м}^{-3}$ ;

$N''$  – плотность ядер азота в паровой фазе теплоносителя,  $\text{м}^{-3}$ ;

$z$  – координата по высоте АЗ и ПВК, м;

$S$  – проходное сечение ТК или ПВК,  $\text{м}^2$ ;

$W$  – мощность ТК, МВт;

$\bar{W}_0$  – средняя мощность окружения ТК, МВт;

$\lambda = 0,101 \text{ с}^{-1}$  – постоянная распада ядер азота;

$\rho'$  – плотность воды на линии насыщения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho''$  – плотность пара на линии насыщения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$G$  – массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\omega'$  – скорость жидкой фазы,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\omega''$  – скорость паровой фазы,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$K = \omega''/\omega'$  – коэффициент проскальзывания пара;

$\varphi$  – истинное объемное паросодержание;

$r$  – удельная теплота парообразования,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;

$q_l$  – линейная нагрузка,  $\text{Вт}/\text{м}$ ;

$\rho$  – плотность недогретой воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$H$  – высота АЗ, м;

$L$  – длина ПВК, м;

$z_0$  – координата точки начала кипения теплоносителя, м;

$\alpha = 0,07$  – доля быстрых нейтронов из соседних каналов (окружения).

В основе модели лежат уравнения баланса ядер азота.

Выделим элементарный объем  $Sdz$  (рис.2), где  $S=S(z)$  – проходное сечение ТК в активной зоне:

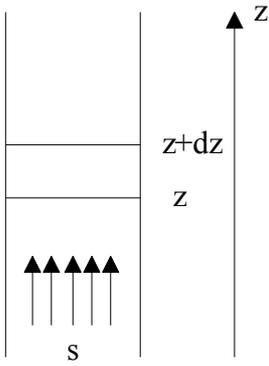


Рис.2. Элементарный объем  $Sdz$

Скорость изменения количества ядер азота в указанном объеме складывается из скорости убыли и скорости прибыли ядер.

Математическая модель активации теплоносителя в топливном канале реактора РБМК при работе реактора в стационарном режиме, представляет собой систему следующих дифференциальных уравнений[1,2,12]:

*В активной зоне, экономайзерный участок:*

$$\begin{cases} \frac{dq'_N}{dz} = -\frac{\lambda}{\omega'} q'_N + A(W + \alpha \bar{W}_0) S\rho, \\ q'_N(0) = 0, \\ 0 \leq z \leq z_0. \end{cases} \quad (1),$$

где  $q'_N = N'S\omega'$  – поток ядер азота в жидкой фазе.

*В активной зоне, испарительный участок:*

$$\begin{cases} \frac{dq'_N}{dz} = -\left(\frac{\lambda}{\omega'} + \frac{W}{H\rho'rS(1-\varphi)\omega'}\right) q'_N + A(W + \alpha \bar{W}_0) S\rho'(1-\varphi), \\ \frac{dq''_N}{dz} = -\frac{\lambda q''_N}{\omega''} + \frac{q'_N}{S(1-\varphi)\omega'} \frac{W}{H\rho'}, \\ q'_N(z = z_0) = q'_{Nz_0}, \\ q''_N(z = z_0) = q''_{Nz_0}, \\ z_0 \leq z \leq H. \end{cases} \quad (2)$$

где  $q''_N = N''S\omega''\varphi$  – поток азота в паровой фазе.

*В пароводяной коммуникации:*

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dz} q'_N = -\frac{\lambda q'_N}{\omega'}, \\ \frac{d}{dz} q''_N = -\frac{\lambda q''_N}{\omega''}, \\ q'_N(H) = q'_{NH}, \\ q''_N(H) = q''_{NH}, \\ H \leq z \leq H + L. \end{array} \right. \quad (3)$$

Показания датчика СКГО пропорциональны концентрации азота на конце ПВК, равной

$$N = N'(1-\varphi) + N''\varphi = \frac{q'}{S\omega'} + \frac{q''}{S\omega''}.$$

На пароводяной коммуникации изменение потока ядер азота обусловлено только распадом азота. Отсутствует активация, не будем учитывать также и обмен между фазами.

*Скорости фаз:*

$$\omega' = \frac{G}{S[\rho'(1-\varphi) + \rho''\varphi K]},$$

$$\omega'' = K\omega' = \frac{GK}{S[\rho'(1-\varphi) + \rho''\varphi K]},$$

где  $\rho', \rho'', \varphi, K, r$  определяются из теплогидравлических расчетов.

Таким образом, математическая модель активации теплоносителя представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений в частных производных относительно потока (или концентрации) ядер азота с известными начальными условиями.

Начальные условия приняты нулевыми, так как время циркуляции теплоносителя по контуру КМПЦ (контур многократной принудительной циркуляции) в реакторе РБМК в несколько раз больше среднего времени жизни ядер азота. Неизвестные значения функций, стоящих в правых частях дифференциальных уравнений (скорости и плотности фаз), определяются из теплогидравлического расчета. В данной работе теплогидравлический расчет выполнялся по алгоритму, принятому в известной и апробированной для РБМК программе «Гидра».

### **3. Программная реализация математической модели азотной активности теплоносителя.**

#### **3.1. Выбор программного средства для реализации модели активации теплоносителя**

В качестве программы для расчёта азотной активности была использована программа из работы [1], написанная на языке программирования С, и реализующая математическую модель активации теплоносителя в технологическом канале реактора РБМК при работе реактора в стационарном режиме. В этой работе для численной реализации математической модели использовался метод Рунге – Кутты четвертого порядка, шаг интегрирования определяется числом точек разбиения по высоте АЗ и длине ПВК.

Предоставленная в работе [1] расчетная программа обладает рядом недостатков, а именно: это DOS-программа и на современных компьютерах может работать только с помощью эмулятора для ПК, создающего DOS-окружение – DOSBox. Работа с DOSBox в настоящее время является уже не практичной и сильно уступает в работе с современными средами программирования. Поэтому была поставлена задача реализовать этот функционал в современной среде.

В качестве среды разработки для данной программы был выбран Visual Studio 2015. Visual Studio – интегрированная среда разработки ПО на языке программирования С++. Включает в себя все основные классы, которые могут потребоваться при разработке прикладного программного обеспечения является полностью объектно-ориентированным, легко расширяемым и поддерживающим технику компонентного программирования. Так как Visual Studio работает с такими языками программирования как С++ и С#, это упрощает реализацию данной программы под выбранную среду программирования. Также он имеет удобный интерфейс для компиляции и редактирования кода (рис.3)

## 3.2. Адаптация программы под современную среду программирования.

Ниже представлен скриншоты программы (рис.3).

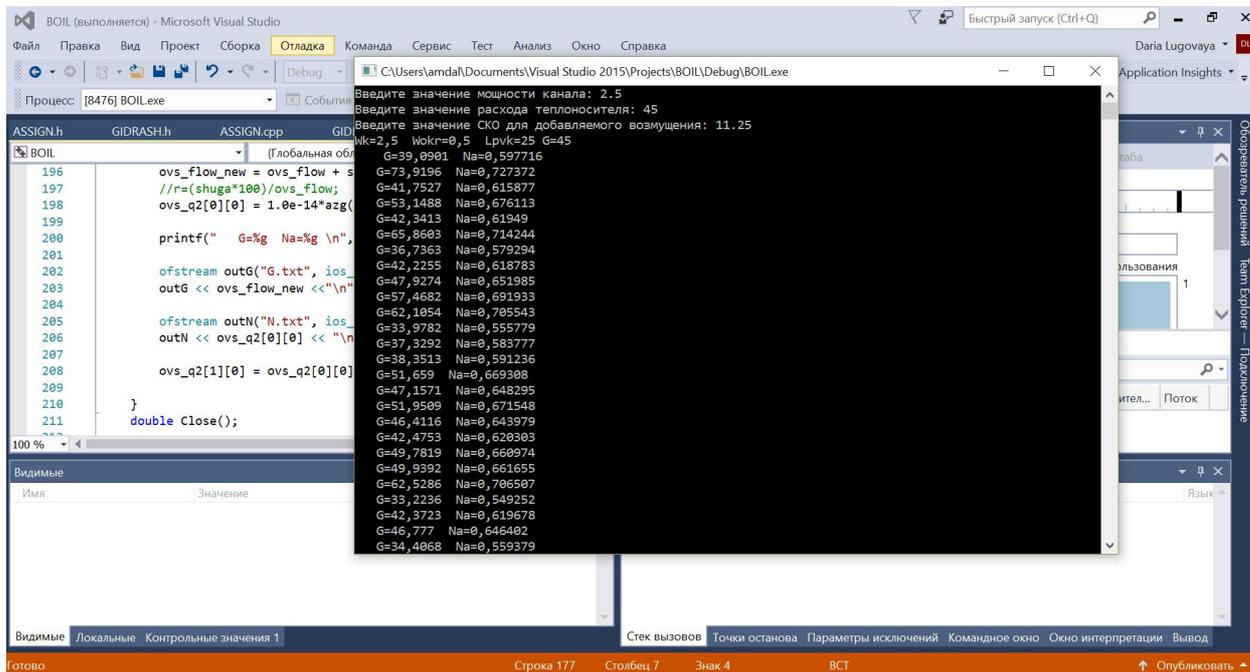


Рис.3. Интерфейс программы.

Приведем описание основных функций и типов использованных в программе:

- 1) gidra (G, N, p0, t0, Lpvk) – теплогидравлический расчет, рассчитывается распределение плотности теплоносителя и паросодержание по высоте.

G - расход теплоносителя через канал, м<sup>3</sup>/ч

N - мощность канала, МВт

t0 - температура на входе в АЗ,С

p0 - давление в барабан-сепараторе, кг/см<sup>2</sup>

Lpvk - длина ПВК + высота в АЗ

- 2) azg(Wmidl, N, G, p0, t0, Lpvk) – расчет азотной активности, возвращает значение азотной активности на конце ПВК.

Wmidl - средняя мощность окружения, МВт

N - мощность канала, МВт

G - расход теплоносителя через канал, м<sup>3</sup>/ч

p0 - давление в барабан-сепараторе, кг/см<sup>2</sup>

t0 - температура на входе в АЗ,С

Lpvk - длина ПВК

- 3) normal(d) – возвращает случайную величину, распределённую по нормальному закону.

d – на вход подаётся значение дисперсии. Мат. ожидание равно 0.

#### **4. Исследование зависимости статистических характеристик показаний датчиков СКГО от величины и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале**

Для того, чтобы исследовать зависимость статистических характеристик концентрации азота в точке измерения от статистических характеристик расхода, в расход вносилось возмущение и рассматривалось, какие при этом значения принимает азотная активность.

Исследование проводилось при длине ПВК  $L=25$  м, мощности окружения  $W_{\text{окр}}=0.5$  МВт, мощности канала  $W_{\text{к}}=2.5, 2.0, 1.0, 0.5$  МВт.

Значения расхода теплоносителя  $G$  были взяты как 25, 30, 35, 40, 45 м<sup>3</sup>/с.

В качестве возмущения были выбраны случайные значения, которые генерировались по нормальному закону распределения. Коэффициент вариации шума брался как 5, 10, 15, 20, 25% .

Для полученных значений расхода теплоносителя и азотной активности были рассчитаны коэффициенты вариации при мощностях канала  $W_{\text{к}}=2.5, 2.0, 1.0, 0.5$  МВт, данные были занесены в табл.1, табл.2, табл.3, табл.4 соответственно. Были получены координаты точки начала кипения, которые также были занесены в данные таблицы.

По значениям из табл. 1 и табл. 2 была построена зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_{\text{к}}=2.5$  МВт (Графики 1-3) и  $W_{\text{к}}=0.5$  МВт (Графики 4-6).

Табл.1. Коэффициент вариации для значения расхода G и азотной активности при  $W_k=2.5\text{МВт}$ .

<b>G+шум(%)</b>	<b>Коэфф.вариации _G</b>	<b>Коэфф.вариации _N</b>	<b>hкип</b>
25+5%	9%	6%	0,59
25+10%	18%	13%	0,59
25+15%	27%	21%	0,59
25+20%	33%	25%	0,59
25+25%	39%	29%	0,59
30+5%	8%	5%	0,95
30+10%	15%	10%	0,95
30+15%	23%	15%	0,95
30+20%	30%	21%	0,95
30+25%	35%	23%	0,95
35+5%	7%	4%	1,49
35+10%	13%	7%	1,49
35+15%	20%	11%	1,49
35+20%	26%	16%	1,49
35+25%	32%	21%	1,49
40+5%	6%	3%	1,85
40+10%	12%	6%	1,85
40+15%	17%	9%	1,85
40+20%	23%	12%	1,85
40+25%	29%	16%	1,85
45+5%	5%	2%	2,39
45+10%	10%	4%	2,39
45+15%	15%	7%	2,39
45+20%	21%	10%	2,39
45+25%	26%	13%	2,39

Табл.2. Коэффициент вариации для значения расхода G и азотной активности при  $W_K=2.0\text{МВт}$ .

G+шум(%)	Коэфф.вариации_G	Коэфф.вариации_N	hкип
25+5%	9%	5%	0,95
25+10%	17%	13%	0,95
25+15%	25%	16%	0,95
25+20%	32%	21%	0,95
25+25%	38%	25%	0,95
30+5%	7%	4%	1,31
30+10%	14%	8%	1,31
30+15%	22%	12%	1,31
30+20%	28%	15%	1,31
30+25%	34%	19%	1,31
35+5%	6%	3%	1,85
35+10%	12%	6%	1,85
35+15%	19%	9%	1,85
35+20%	25%	13%	1,85
35+25%	29%	15%	1,85
40+5%	5%	2%	2,39
40+10%	11%	4%	2,39
40+15%	16%	7%	2,39
40+20%	22%	9%	2,39
40+25%	27%	12%	2,39
45+5%	5%	2%	2,93
45+10%	10%	3%	2,93
45+15%	14%	5%	2,93
45+20%	19%	7%	2,93
45+25%	24%	10%	2,93

Табл.3. Коэффициент вариации для значения расхода G и азотной активности при  $W_k=1.0\text{МВт}$ .

G+шум(%)	Коэфф.вариации_G	Коэфф.вариации_N	hкип
25+5%	9%	4%	2,39
25+10%	17%	8%	2,39
25+15%	26%	13%	2,39
25+20%	33%	16%	2,39
25+25%	39%	19%	2,39
30+5%	7%	2%	3,11
30+10%	14%	5%	3,11
30+15%	22%	8%	3,11
30+20%	28%	11%	3,11
30+25%	34%	15%	3,11
35+5%	6%	2%	4,01
35+10%	12%	3%	4,01
35+15%	19%	5%	4,01
35+20%	25%	9%	4,01
35+25%	29%	10%	4,01
40+5%	5%	1%	4,61
40+10%	11%	2%	4,61
40+15%	16%	4%	4,61
40+20%	22%	6%	4,61
40+25%	27%	9%	4,61
45+5%	5%	1%	5,33
45+10%	10%	1%	5,33
45+15%	14%	2%	5,33
45+20%	19%	4%	5,33
45+25%	24%	6%	5,33

Табл.4. Коэффициент вариации для значения расхода G и азотной активности при  $W_k=0.5\text{MBT}$ .

G+шум(%)	Коэфф.вариации_G	Коэфф.вариации_N	hкип
25+5%	9%	2%	5,21
25+10%	17%	6%	5,21
25+15%	26%	11%	5,21
25+20%	33%	15%	5,21
25+25%	39%	19%	5,21
30+5%	7%	2%	6,41
30+10%	14%	4%	6,41
30+15%	21%	7%	6,41
30+20%	28%	10%	6,41
30+25%	34%	13%	6,41
35+5%	6%	1%	-
35+10%	12%	2%	-
35+15%	19%	4%	-
35+20%	25%	7%	-
35+25%	30%	9%	-
40+5%	5%	0%	-
40+10%	11%	1%	-
40+15%	16%	2%	-
40+20%	22%	4%	-
40+25%	27%	8%	-
45+5%	5%	1%	-
45+10%	10%	2%	-
45+15%	14%	2%	-
45+20%	19%	4%	-
45+25%	24%	6%	-

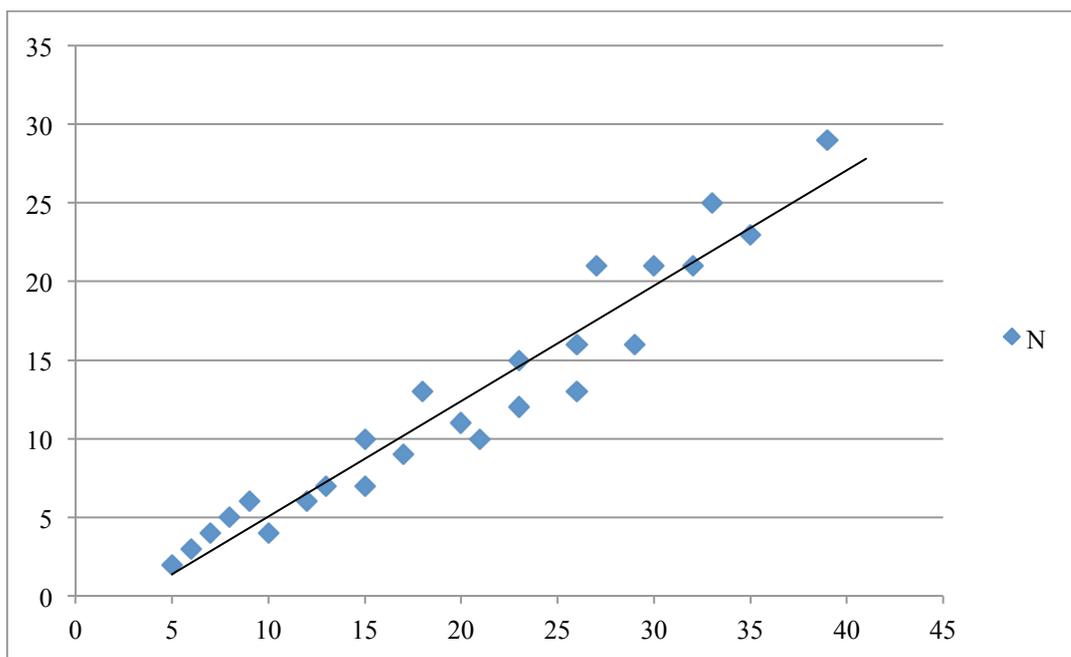


График 1. Зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_k=2.5$  МВт

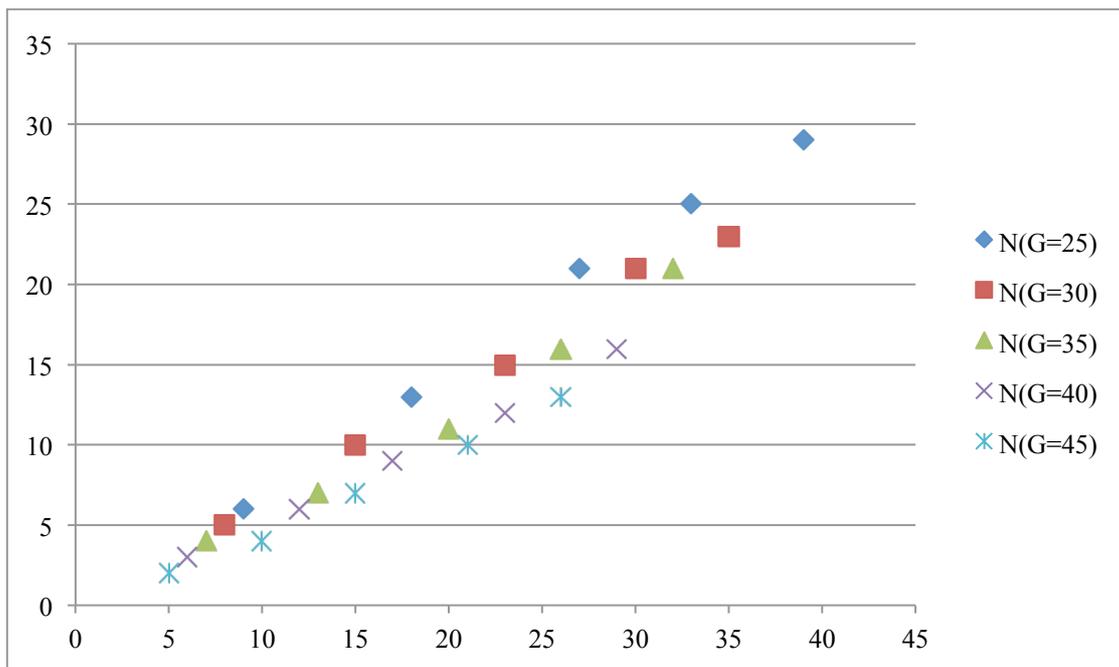


График 2. Зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_k=2.5$  МВт

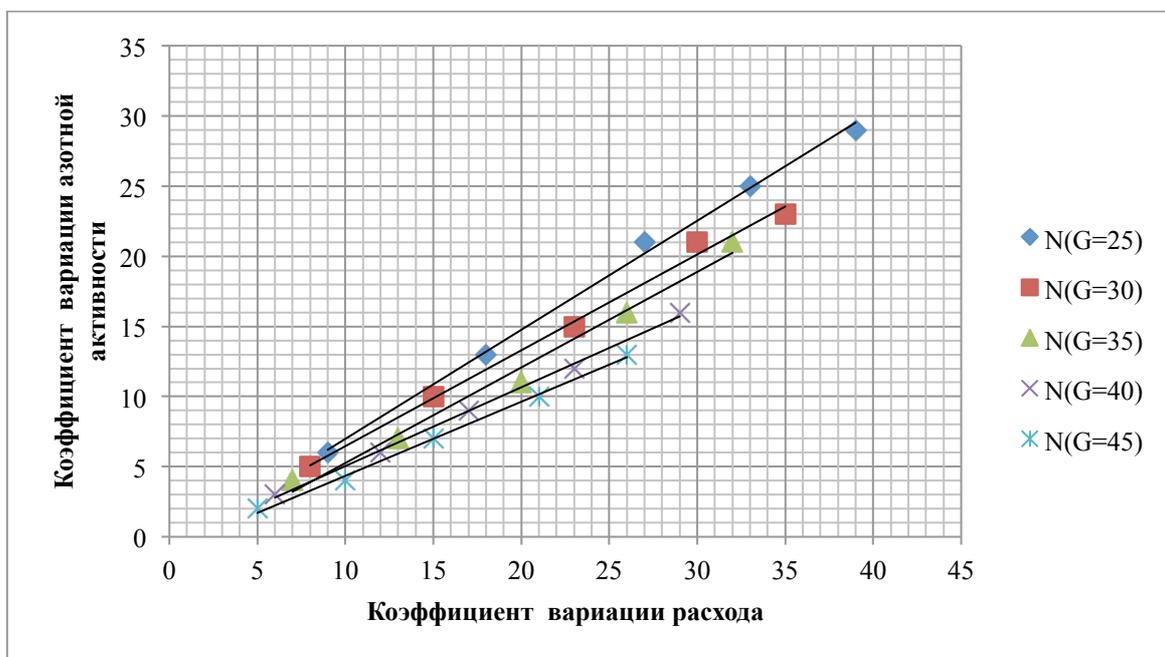


График 3. Зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_k=2.5$  МВт

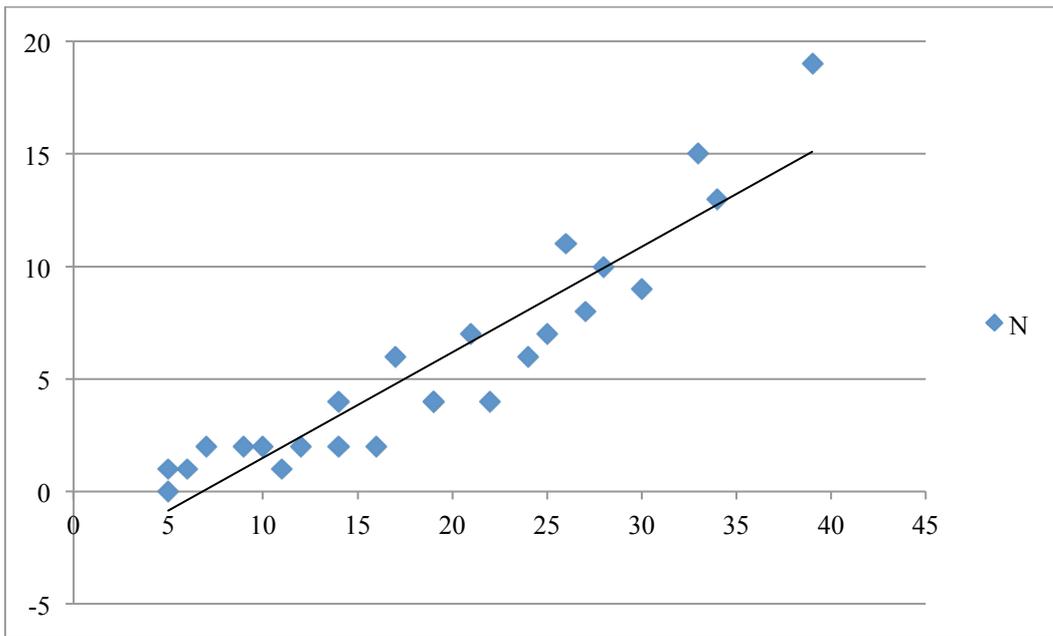


График 4. Зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_k=0.5$  МВт

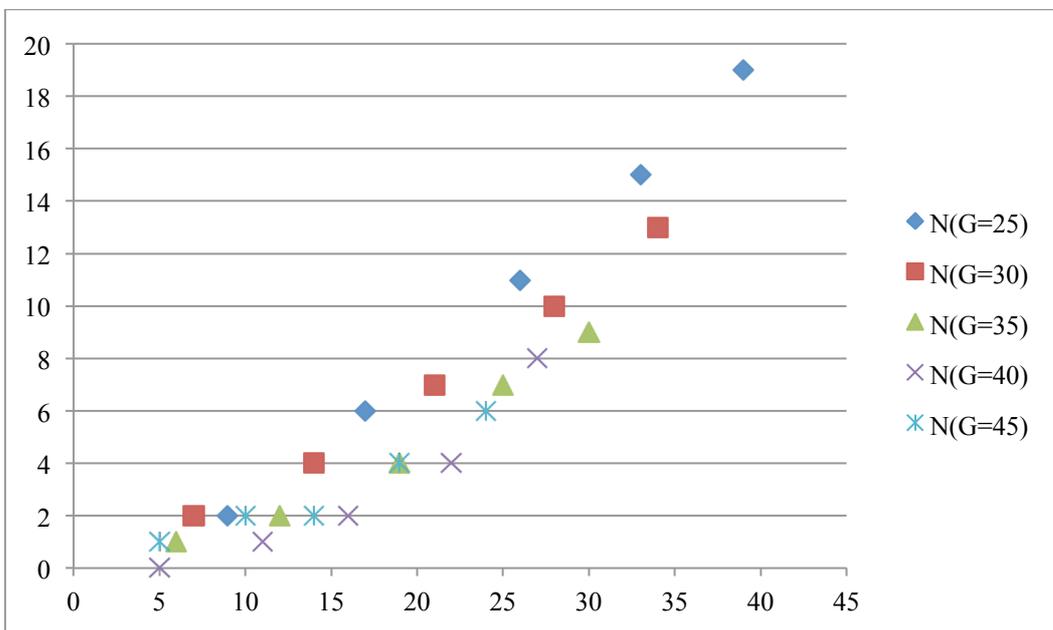


График 5. Зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_k=0.5$  МВт

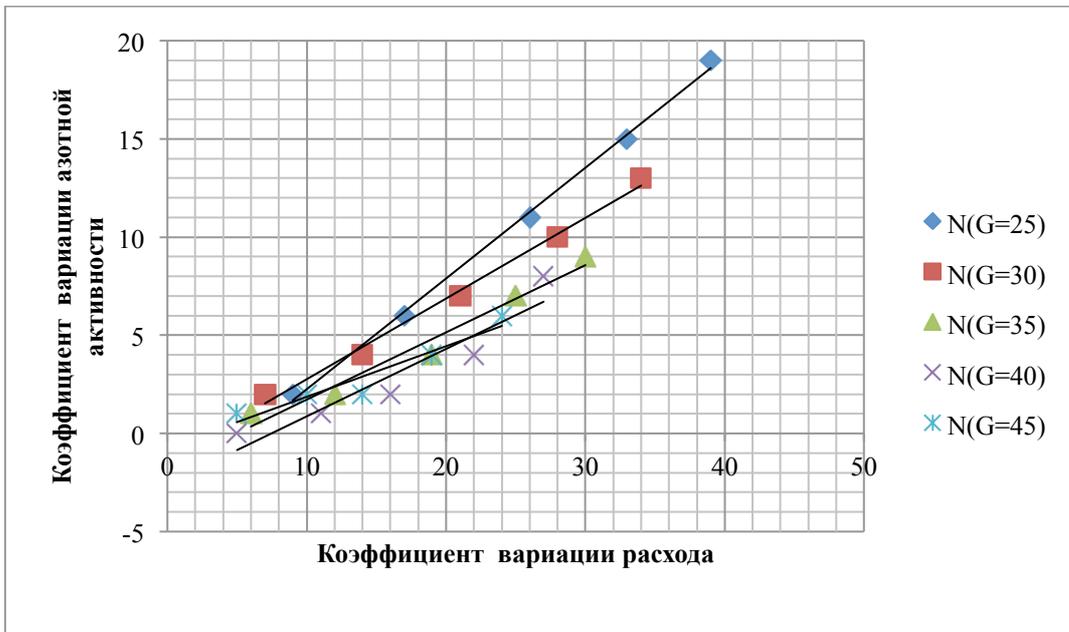


График 6. Зависимость коэффициентов вариации азотной активности от коэффициентов вариации расхода при  $W_k=0.5$  МВт

На основании полученных данных можно сделать выводы:

- По графикам 1 и 4 видно, что с уменьшением мощности канала, азотная активность имеет больший разброс значений.
- С увеличением значения расхода, зависимость азотной активности от расхода становится более нелинейной. Особенно при меньшем значении мощности канала. Это можно проследить из графиков 2, 3, 5 и 6.
- С увеличением мощности канала зависимость азотной активности и расхода принимает более линейный вид (графики 3 и 6).

## **Заключение**

В данной учебно-исследовательской работе исследовалась зависимость статистических характеристик показаний датчиков СКГО от величины и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале. Исследование проводилось с помощью стационарной математической модели азотной активности теплоносителя в реакторе РБМК.

Были получены следующие результаты.

1. Изучена математической модели активации теплоносителя в реакторе РБМК.
2. Было выбрано программное средство для реализации модели активации теплоносителя, и была выполнена адаптация программы под современную среду программирования.
3. Был произведён анализ значений статистических характеристик показаний датчиков СКГО и статистических характеристик расхода теплоносителя в канале.

Из исследования полученных данных можно сделать выводы, что:

- С уменьшением мощности канала, азотная активность имеет больший разброс значений.
- С увеличением значения расхода, зависимость азотной активности от расхода становится более нелинейной.
- С увеличением мощности канала зависимость азотной активности и расхода принимает более линейный вид.

## **Список литературы**

1. Загребяев А.М., Овсянникова Н.В. Математическая модель активации теплоносителя в реакторе РБМК-1000 и её использование для идентификации расхода через канал: Препринт 008-2002 М.:МИФИ, 2002.-28с.
2. Костанбаев С.В. Автореферат на тему: «Расчетно-измерительный комплекс контроля расхода теплоносителя в канале реактора рбмк по информации о наведенной активности»//Электронная библиотека НИЯУ МИФИ, 2010.
3. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат. 1980.
4. Попов А.Ф. Теплотехнический контроль на атомных электростанциях. М.: Энергоатомиздат. 1986.
5. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоиздат. 1981.
6. Ашурков В.К., Гарусов Ю.В., Загребяев А.М. Исследование возможности использования математической модели активации теплоносителя для уточнения данных системы КГО. – В кн.: Цифровая обработка измерительной информации. М.: Энергоатомиздат. 1987. С.15–17.
7. Панов Е.А., Яшников А.И. и др. Применение системы КГО для контроля теплофизических параметров в ТК: Отчет ВНИИАЭС – КАЭС. № гос.рег. ОЭ-0357/77. 1977.
8. Панов Е.А., Пискунов В.И. и др. Разработка методов и средств радиационного контроля теплофизических параметров реакторов РБМК и ВВЭР. Контроль теплотехнических параметров топливных каналов РБМК по наведенной активности азота-16: Отчет ВНИИАЭС – КАЭС. № гос.рег. 8106920. 1982
9. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат. 1984.
10. Belousov N.I., Bichkov S.A., Marchuk Y.V. et al. The code GETERA for cell and polycell calculations model capability. Proc. of the Top. Meet. an Advances in Reactor Physics. March 8–11. 1992. Charlston. USA.
11. Alexakov G.N., Kudryavtsev A.V., Fedorov V.A. (МЕРФИ), Kuzmin A.N., Kachanov V.M.(IAE), Neural-Similar Processor For RBMK Power Distribution Monitoring and Control. NPIC7HMIT2000 ANS/ENS Embedded Topical Meeting. P.88–100. 2000.
12. Костанбаев С.В. Диссертация. НИЯУ МИФИ
13. Физические величины: Справочник / Под редакцией Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат. 1991.
14. Калинин П.В. и др. Проверка способа калибровки штатных расходомеров реактора РБМК-1000 на МКУ корреляционным методом с внесением возмущения нейтронного потока в активной зоне. Отчет ВНИИАЭС-КАЭС, 1988
15. A.N., Kachanov V.M. (IAE), Neural-Similar Processor For RBMK Power Distribution Monitoring and Control. NPIC7HMIT2000 ANS/ENS Embedded Topical Meeting. P.88-100. 2000.