

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ГРАФИТОВЫХ КОЛОНН РЕАКТОРОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В.В. Петров, А.С. Нефедов (Чернобыльская АЭС, Украина)

Прогнозирование радиационного формоизменения графитовой кладки является актуальной задачей при определении ресурса работы реакторов РБМК. В данной работе представлены эмпирические модели для описания и прогнозирования радиационного формоизменения графитовых колонн реакторов Чернобыльской АЭС. Модели разработаны методом множественной регрессии на основе экспериментальных данных, полученных в процессе эксплуатации реакторов. Показано, что модели дают адекватное описание основных экспериментальных закономерностей и указывают на новые особенности в поведении графита РБМК. Модели могут быть использованы для других реакторов РБМК.

Обширные экспериментальные исследования, выполненные на исследовательских реакторах, показывают, что радиационное формоизменение (РФ) графита РБМК (ГР-280) сложным образом зависит от флюенса нейтронов, температуры облучения и внутренних напряжений в графите [1,2,3,6]. Последние исследования [4,5] указывают, что к перечисленным факторам необходимо добавить также гамма-излучение. Полученные на исследовательских реакторах экспериментальные результаты легли в основу ряда моделей [1,3], предложенных для количественного описания РФ. Однако до настоящего времени не разработана расчетная модель для графита РБМК, которая удовлетворяла бы потребности эксплуатации. Поэтому до сих пор расчетные оценки РФ графитовых колонн (ГК) выполняют по упрощенной модели, учитывающей только один фактор - энерговыработку на ячейку, которая пропорциональна флюенсу нейтронов в этой ячейке [6,7]. Цель данной работы заключается в разработке более реалистичной эмпирической модели, которая описывала бы основные закономерности РФ графита РБМК с учетом конкретных условий облучения.

Пространственное распределение нейтронов в реакторе РБМК и анизотропия свойств графита обуславливают необходимость раздельного рассмотрения аксиальной и радиальной компонент деформации ГК. Соответственно будут рассмотрены две модели, описывающие поведение высоты ГК и поведение диаметра отверстия ГК.

При разработке моделей исходили из следующих требований:

Модели должны описывать основные наблюдаемые закономерности РФ в рабочих интервалах энерговыработок (от 2500 до 10000 МВт·сут) и температур (от 400 до 600 °С).

Модель для описания диаметра ГК должна описывать также поведение минимального диаметра, так как именно этот параметр наиболее важен для эксплуатации реактора.

Модели должны быть пригодны для целей прогнозирования. Модели разрабатывали методом множественной регрессии [8] на основе экспериментальных данных по формоизменению ГК, полученных в процессе эксплуатации реакторов 1-го и 3-го энергоблоков Чернобыльской АЭС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения высоты ГК выполняли с помощью рулетки и телевизионной камеры. Основная погрешность измерений составила 2 мм. На каждой ГК выполняли, как правило, по одному измерению.

Измерения диаметра отверстия ГК выполнены с помощью специальной установки, разработанной и изготовленной в СКТБ ИЯИ АН Украины. Основная погрешность установки в интервале температур от 50 до 100°С не хуже 0,05 мм. Установка позволяла измерять профили диаметров по высоте ГК одновременно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На каждой ГК проводили от одного до трех измерений. Перед каждым измерением выполняли калибровку установки.

Температура ГК в разных сериях измерений изменялась от 70 до 90°С. Поправка на температурное расширение графита не вводилась, что могло увеличить неопределенность в измерении высоты ГК до 3 мм, а в измерении диаметра ГК до 0,06 мм.

ВЫБОР И РАСЧЕТ ФАКТОРОВ МОДЕЛЕЙ

При разработке моделей были рассмотрены и определены физические факторы, которые входят в математическую модель, как независимые переменные. При выборе этих факторов руководствовались следующими соображениями:

Факторы должны отражать физическую суть явления РФ графита в рамках существующих представлений.

Факторы должны быть статистически значимыми, что определяется методами регрессионного анализа.

Факторы должны быть доступными для практического применения в том смысле, что их измерение или расчет может быть выполнен персоналом АЭС.

Анализ факторов с указанных позиций и статистическая обработка экспериментальных данных предопределили наличие в моделях следующих факторов:

Средняя по высоте ГК энерговыработка в рассматриваемой ячейке, E_0 (МВт·сут). Этот фактор рассчитывается по стандартной для реакторов РБМК программе "Призма".

Средняя энерговыработка, E_1 и E_2 ближайших к рассматриваемой ячейке соседей в пределах первого и второго радиуса (рис.1).

Средняя по высоте ГК и по времени эксплуатации мощность энерговыделения в графите, Q (МВт), которая в значительной степени определяет температуру облучения ГК. Q рассчитывали в соответствии с работой [9] для полячейки 5 x 5.

Градиент энерговыработки в пределах первого радиуса, G_1 аналог градиента флюенса нейтронов (рис.1):

$$G_1 = \left| E_{11}-E_{13} \right| + \left| E_{12}-E_{14} \right|$$

E_{21}	E_{12}	E_{22}
E_{11}	E_0	E_{13}
E_{24}	E_{14}	E_{23}

Рис.1. Схема полячейки 3 x 3 реактора РБМК

МОДЕЛЬ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТЫ ГК (МОДЕЛЬ Н)

Модель разработана на основе экспериментальных данных (161 измерение), полученных на реакторе 3-го энергоблока:

$$H = b_0 + b_1 \cdot E_0 + b_2 \cdot E_1 + b_3 \cdot E_2 + b_4 [E_0(Q-Q_0)]^2 + b_5 \cdot G_1 \quad (1)$$

Здесь ($Q_0=0,057$ МВт; значение Q_0 подбиралось таким образом, чтобы минимизировать остаточную сумму квадратов регрессии).

Коэффициенты регрессии:

$$\begin{aligned} b_0 &= 8017 \text{ мм} & b_3 &= -0,0014 \\ b_1 &= -0,0058 & b_4 &= 0,000051 \\ b_2 &= -0,0042 & b_5 &= 0,00107 \end{aligned}$$

Качество описания экспериментальных данных регрессионной зависимостью (1) показано на рис.2 и характеризуется следующими параметрами. Стандартная ошибка, S (S^2 дает оценку дисперсии относительно регрессии [8]): $S=3,0$ мм, относительная ошибка: $\delta = S / \bar{H} = 0,04\%$.

Квадрат множественного коэффициента корреляции, R^2 , характеризует долю общего разброса относительно \bar{H} , объясняемую регрессией [8]: $R^2=0,92$.

F-критерий характеризует значимость регрессионного уравнения [8]: $F=389$.

Все коэффициенты регрессии статистически значимы (достигнутый уровень значимости меньше 0,0001).

Для сравнения приведем параметры регрессии для однофакторной модели (E_0):

$$b_0 = 7998 \text{ мм} \quad b_1 = -0,0065$$

$S=8$ мм; $\delta = S / \bar{H} = 0,10\%$; $R^2=0,51$.

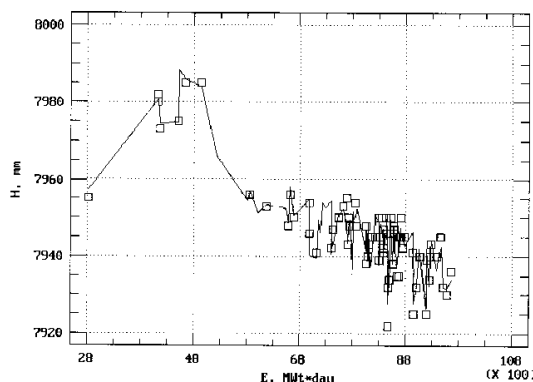


Рис.2. Аппроксимация экспериментальных данных (O) моделью Н (1)

МОДЕЛИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ДИАМЕТРА ГК.

Модель D1 описывает поведение среднего по высоте ГК диаметра на основе экспериментальных данных, полученных на реакторе 3-го энергоблока:

$$\bar{D} = a_0 + a_1 \cdot E_0 + a_2 \cdot E_1 + a_3 \cdot E_2 + a_4 [E_0(Q-Q_0)]^2 \quad (2)$$

Параметры модели приведены в табл. 1.

С точки зрения эксплуатации реактора наибольший интерес представляет поведение минимального диаметра ГК, так как D_{\min} в значительной степени определяет величину газового зазора между топливным каналом и ГК и соответственно ресурс работы реактора. В принципе, для расчета D_{\min} факторы, входящие в (2), необходимо пересчитать с учетом аксиального распределения нейтронов в каждой ячейке, усредненного за время эксплуатации. Однако в настоящее время это не может быть сделано, так как программа физического расчета реактора РБМК "Призма" не предусматривает контроль такого параметра. Поэтому для описания D_{\min} в модель (2) был введен коэффициент высотной неравномерности диаметра ГК, K_z , который рассчитывали по измеренному высотному профилю диаметра ГК. D_{\min} рассчитывали усреднением минимальных значений диаметров, измеренных в двух плоскостях. Анализ полученных значений K_z показал, что высотный профиль D не коррелирует со средним по времени распределением нейтронов по высоте, который определяли по высотному распределению внутреннего диаметра топливного канала. Скорее всего, это связано с тем обстоятельством, что профиль D зависит не только от высотного распределения нейтронов, но и от высотного распределения энерговыделения в графите, вклад в которое дают как гамма-излучение, так и замедление нейтронов. Поэтому введенный коэффициент K_z должен учитывать среднее по времени аксиальное распределение флюенса нейтронов и температуры ГК.

Модель D2

$$D_{\min} = a_0 + a_1 \cdot E_0 \cdot K_z + a_2 \cdot E_1 + a_3 \cdot E_2 + a_4 [E_0(Q-Q_0)]^2 \quad (3)$$

Параметры модели приведены в таблице 1. На рис.3 приведены экспериментальные и рассчитанные по (3) значения D_{\min} . Рис.3, как и рис.2, содер-

жит не все экспериментальные данные, чтобы не перегружать рисунки.

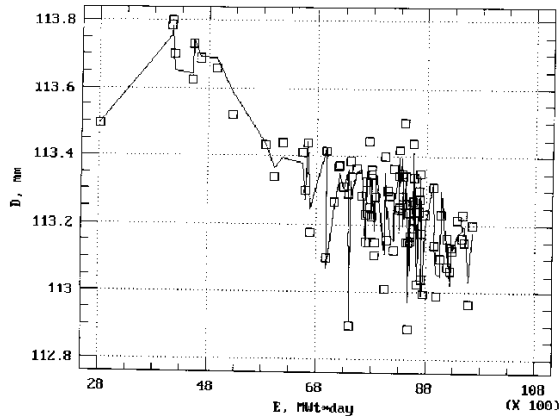


Рис.3. Аппроксимация экспериментальных данных (O) моделью 02 (3)

По причинам, указанным выше, модель D2 не может быть использована для прогнозирования поведения D_{min} . Поэтому для прогнозирования D_{min} использовали Модель D3, которая содержит те же факторы, что и модель D1. Это, конечно, привело к худшему описанию экспериментальных данных (см. табл.1). Аналогично была получена модель D4 для описания D_{min} графитовых колонн реактора 1-го энергоблока. Модель D4 отличается от модели D3 тем, что в ней вклад фактора $[E_0(Q-Q_0)]^2$ оказался статистически незначимым. Скорее всего, это обусловлено нестабильностью модели, как будет показано в следующем разделе. Результаты расчетов приведены в табл. 1

Таблица 1

РАССЧИТАННЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ

Параметры	МодельD1	МодельD2	МодельD3	МодельD4
Q_0	0,047	0,047	0,047	-
a_0	114,28	114,42	114,38	114,15
$a_1 \cdot 10^5$	-6,2	-6,5	-10,2	-5,5
$a_2 \cdot 10^5$	-3,2	-5,7	-6,1	-4,6
$a_3 \cdot 10^5$	-0,64	-1,1	-0,77	-1,6
$a_4 \cdot 10^7$	4,6	8,9	7,8	-
S	0,03	0,06	0,10	0,07
δ	0,03	0,05	0,09	0,06
R^2	0,83	0,88	0,65	0,83
F	222	333	84	66
N*	180	180	178	42

N* количество экспериментальных точек

Все коэффициенты регрессий статистически значимы (достигнутый уровень значимости меньше 0,0001, за исключением коэффициентов a_3 ; и a_4 в модели D3, у которых уровень значимости равен 0,036 и 0,001 соответственно).

Для однофакторной модели (Eo) получены следующие параметры:

$$a_0 = 114,01 \text{ мм} \quad a_1 = -0,000095$$

$$S = 0,13 \text{ мм}; \quad \delta = S / \bar{H} = 0,11 \%; \quad R^2 = 0,47.$$

УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛЕЙ

Представленные модели построены на основе экспериментальных результатов, полученных в

условиях "пассивного" (не планируемого) эксперимента, что имеет ряд отрицательных последствий. Во-первых, оценки коэффициентов регрессии могут быть сильно коррелированы вследствие корреляции факторов. Это не означает, что модель непригодна для описания, но могут возникнуть проблемы при прогнозировании поведением функции отклика, если изменять только один фактор и использовать соответствующий ему коэффициент. Это особенно важно, если прогнозирование осуществляется за пределы интервалов варьирования факторов, в рамках которых была построена модель [8]. В качестве критерия оценки степени корреляции факторов мы использовали инфляционные множители дисперсий, ИМД (диагональные элементы обратной корреляционной матрицы факторов), которые согласно [8] "должны быть больше 1, но, безусловно, меньше 10". В наших моделях ИМД всегда были больше 1 и меньше 5.

Вторая проблема заключается в потере устойчивости модели, которая проявляется в изменении коэффициентов регрессии при сокращении объема экспериментальной выборки, особенно при отбрасывании значений тех факторов, которые находятся на границах интервала варьирования. Мы проверяли устойчивость моделей путем последовательного отбрасывания частей экспериментальной выборки, определяемых по закону случайных чисел. При этом контролировалась устойчивость коэффициентов и параметров регрессии. Оставшиеся значения использовались для воспроизведения модели и расчета отброшенных значений. Расхождение с экспериментальными значениями отброшенной части выборки (погрешность прогноза) служит естественной мерой качества прогноза, а значит, и модели [8].

В модели N коэффициенты регрессии остаются стабильными, т.е. не выходят за пределы погрешности расчета (1σ), при сокращении объема выборки до (40 50) %. При этом погрешность прогноза изменялась в пределах (0,97...1,12)S. Для моделей D1-D3, описывающих поведение диаметра отверстия ГК, коэффициенты стабильны при сокращении объема выборки до (30...40)%, а погрешность прогноза изменяется в пределах (0,92...1,16)S. Модель D4 оказалась нестабильной, т.к. при сокращении объема выборки на (20...30)% коэффициенты значительно изменялись вплоть до перемены знака.

ПОГРЕШНОСТЬ РАСЧЕТОВ

Рассмотрим возможные источники погрешностей проделанных расчетов. К ним следует отнести:

1. Исходную дисперсность объектов контроля, которая обусловлена двумя причинами. Во-первых, это технологические допуски, принятые при их изготовлении. Для высоты ГК допуск составляет 7 мм, а для диаметра 0,23 мм. Во-вторых, дисперсия физических свойств графитовых блоков [10,11]. Эта составляющая дает вклад в случайную погрешность.

2. Погрешность методов измерений. Эта погрешность имеет как случайную, так и систематическую составляющие. Наличие систематической погрешности может привести к значительной корреляции из-

мерений, так как они, как правило, выполняются одной установкой (одним и тем же методом). При статистической обработке результатов измерений это не приводит к смещению оценок коэффициентов, но оценки дисперсий получаются заниженными [12]. Ранее на эту проблему не обращали внимания, и хотя вклад методической погрешности в нашем случае меньше погрешности, обусловленной дисперсностью, тем не менее, эта задача требует своего рассмотрения.

3. Погрешность, обусловленная неадекватностью модели. Проверку адекватности моделей выполняли в соответствии с [8], используя "параллельные" измерения (измерения, выполненные в разных ячейках реактора, но при одинаковых или близких значениях факторов). Модель Н и модели D1, D2 не противоречат проверяемой гипотезе с доверительной вероятностью 95%. Об этом же свидетельствуют высокие значения R^2 и близость полученных оценок S и экспериментальных погрешностей. Модель D3 не противоречит проверяемой гипотезе с доверительной вероятностью 70%. О причинах недостаточной адекватности модели D3 говорилось выше.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные результаты свидетельствуют о достаточно хорошем описании экспериментальных результатов в исследованном интервале факторов. Рассмотрим, как представленные модели описывают и прогнозируют поведение графита в соответствии с известными экспериментальными закономерностями, полученными на исследовательских реакторах.

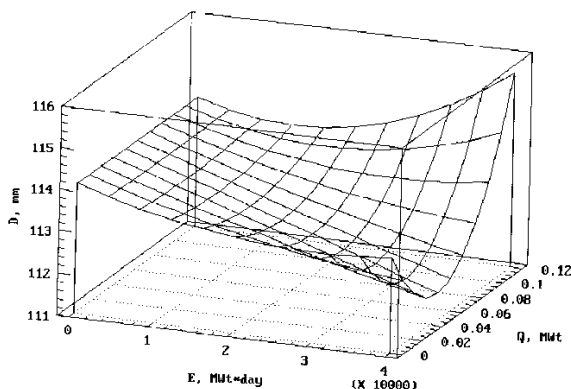


Рис.4. Качественная картина зависимости $O(2)$ от энерговыработки E и энерговыделения Q

На рис.4 приведена качественная 3-мерная зависимость (2), наглядно демонстрирующая поведение \bar{D} в координатах E и Q .

Как видно из рис.4, модель в соответствии с экспериментальными данными предсказывает наличие максимума усадки графита (глобальный минимум \bar{D}) при $Q=Q_0$. Для сравнения с экспериментальными значениями температур облучения необходимо по рассчитанной энерговыработке Q оценить среднюю температуру ГК. Такие оценки были выполнены в предположении, что условия теплосъема для всех ГК одинаковы. Тогда средняя температура ГК будет зависеть только от энерговыделения в графите, Q , если учесть зависимость коэффициента тепло-

проводности графита РБМК от флюенса нейтронов и температуры облучения [2]. Используя в качестве привязки измеренные значения температур ГК в температурных каналах реактора, получили следующее соотношение между Q и средней температурой ГК: $T=331+2055 \cdot Q$.

Некоторые результаты расчета приведены в табл.2.

Q, МВт	0,047	0,057	0,0923
T, °C	430	450	520

В пределах погрешности выполненных оценок ($\approx 8\%$) полученные значения температур, соответствующие $Q_0=0,047$ и $0,057$ МВт, примерно совпадают с экспериментальными данными [1,2,13]. Основное отличие заключается в отсутствии максимума усадки для $Q=Q_0$.

Далее, модель правильно предсказывает наличие максимума усадки графита при достижении энерговыработки E_{\max} (локальный минимум \bar{D}), после которой начнется стадия вторичного распухания, а также смещение максимума в зависимости от температуры облучения. Оценим значения энерговыработок, при которых наблюдается максимум усадки. Из (1) и (2) следует для модели Н:

$$E_{\max} = -b_1/2b_4(Q-0.057)^2 \approx 4.6 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{сут};$$

погрешность оценки $\approx 0,8 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{сут}$

Для модели D1:

$$E_{\max} = -a_1/2a_4(Q - 0.047)^2 \approx 3.3 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{сут};$$

погрешность оценки $\approx 0,6 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{сут}$

При расчете использовали среднее по реактору значение $Q = 0,0923$ МВт ($T=520$ °C). Если использовать привязку энерговыработки к флюенсу быстрых нейтронов [6] $1 \text{ МВт} \cdot \text{сут} \approx 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ($E_n > 0,18$ МэВ), то полученные значения флюенсов примерно в 2 – 3 раза превышают экспериментальные значения [1,2,14], соответствующие усадке графита в направлении, перпендикулярном оси формования. Однако в соответствии с выводами [4] экспериментальные значения флюенсов, полученных на исследовательских реакторах, должны быть увеличены в 1,5 – 2 раза для реактора РБМК, что улучшает согласие с нашими оценками.

Сравнение с предыдущими расчетными оценками РФ графита РБМК [6,7], которые использовали однофакторную модель (E_0), показывает, что учет влияния ближайших ячеек в пределах первых двух радиусов, энерговыделения в графите и градиента флюенса нейтронов позволяет существенно улучшить описание экспериментальных результатов. Выполненные оценки показали, что относительные вклады в деформацию Н и D, обусловленные E_1 и E_2 , составляют соответственно 50 и 15% от E_0 (получено усреднением по модели Н и модели D1). Эти значения близки к вкладам, полученным при расчете энерговыделения в графите РБМК в результате замедления нейтронов: 67 и 22% соответственно [9]. Можно предположить, что вклады соседних ячеек обусловлены воздействием быстрых нейтронов.

Другая особенность представленных моделей заключается в том, что модель Н отличается от моделей D наличием дополнительного фактора, который

описывает градиент флюенса нейтронов. Раньше, при облучении графита в исследовательских реакторах, этот эффект не мог быть выявлен из-за малых размеров облучаемых образцов. С физической точки зрения, градиент флюенса нейтронов в ГК должен приводить к появлению дополнительных внутренних напряжений, но конкретный механизм его воздействия не ясен, так как градиент рассчитан для радиального направления, а его влияние проявляется в уменьшении осевой усадки.

В заключение отметим, что модель D3 и модель H были использованы для прогнозирования величины газового зазора и величины зацепления верхних трактов каналов в узле их телескопического соединения при проведении замены 109 топливных каналов реактора 3-го энергоблока ЧАЭС в 1999г. Надежность прогноза (количество положительных результатов прогноза/общее количество испытаний) составила 83 и 94% для моделей D3 и H соответственно. При этом необходимо отметить, что экспериментальные выборки, по которым осуществляли прогнозирование имели объем 72 (D3) и 54 (H) измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены эмпирические модели, которые дают адекватное описание РФ графитовых колонн реактора 3-го энергоблока Чернобыльской АЭС. Выполнен анализ погрешностей расчета. Модели качественно правильно описывают и прогнозируют основные экспериментальные закономерности РФ графита РБМК, полученные на исследовательских реакторах. Впервые выявлено влияние градиента флюенса нейтронов на РФ высоты ГК. Модели были успешно использованы для прогнозирования поведения РФ графитовых колонн реактора 3-го энергоблока Чернобыльской АЭС и могут быть использованы для других реакторов РБМК.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В.Гончаров, Н.С. Бурлаков, Ю.С. Виргильев, В.И.Карпухин, П.А. Платонов. *Действие облучения на графит ядерных реакторов*. М.: "Атомиздат", 1978, с.272.
2. *Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей графита уран-графитовых канальных реакторов ИГР-01-90*. М., 1990.

3. В.И. Карпухин, В.Н. Маневский, П.А. Платонов, О.К. Чугунов. Расчет напряженно-деформированного состояния графитовых блоков реакторов типа РБМК на основе различных моделей сплошных сред// *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и реакторное материаловедение*". 1994, вып. К61.
4. В.А. Николаенко и др. Влияние состава излучения на радиационную повреждаемость графита// *Атомная энергия*, 1999, т.87, вып.1, с.24-28.
5. В.И. Карпухин, В.А. Николаенко, В.Н. Кузнецов Критический флюсно нейтронов как фактор, определяющий ресурс графита кладки РБМК.// *Атомная энергия*, 1997, т.83, вып.5, с.325-330.
6. Л.А. Белянин и др. *Безопасность АЭС с канальными реакторами (реконструкция активной зоны)*. М: "Энергоатомиздат", 1997.
7. J.H. Bikel, P. Butcher, J. Mackey, D.A. Reny Ignalina NPP Unit 1. 1998 Graphite – Pressure Tube Gap Measurement. АЕАТ, SCIENTECH, February, 1999, Rep.3.
8. Н. Дрейпер, Г. Смит. *Прикладной регрессионный анализ*. М: "Статистика", 1973.
9. *Радиационное энерговыделение в графитовой кладке канального реактора типа РБМК с учетом фактической загрузки активной зоны: Отчет 16.488 От., НИКИЭТ, 1984, с.24.*
10. В.А. Николаенко, В.Н. Кузнецов, П.А. Платонов, О.К. Чугунов Влияние неоднородности образцов графита на их формоизменение при облучении// *Атомная энергия*. 1999, т.87, вып.1, с.28-33.
11. Ю.С. Виргильев, В.Д. Балдин. Влияние вариации свойств на работоспособность реакторного графита ГР-280// *Атомная энергия*, 2000, т.88, вып.2, 0.119-125.
12. С.А. Вадиков, Н.С. Гай, Н.С. Работнов. Влияние корреляции экспериментальных данных на погрешности оцененных нейтронных сечений// *Атомная энергия*, 1999, т.86, вып.1, с.40-46.
13. Ю.С. Виргильев. Радиационная стойкость углеродных конструкционных материалов// *Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Физика радиационных повреждений и реакторное материаловедение"*. 1991, вып.1(55), с.15-26.
14. И.Г. Лебедев, Ю.С. Виргильев. Сравнительные испытания радиационной стойкости реакторного графита// *Атомная энергия*, 1998, т.85, вып.5, с.377-382 .