

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА И ОЦЕНКИ С ИХ ПОМОЩЬЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРСОНАЛА ЭНЕРГОБЛОКА АС ПРИ ДЕЙСТВИЯХ В ПЕРЕХОДНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

**Ю.В. Волков\*, Д.С. Самохин\*, А.В. Соболев\*, М.Ю. Канышев\*\*,  
С.Л. Лычаков\*\*, С.Н. Слынев\*\***

*\* – Обнинский государственный технический университет атомной энергетики*

*\*\* – Калининская АЭС*



Работа посвящена методам оценки показателей надежности персонала на энергоблоках АС по данным экспертного опроса. Выделены четыре типа ошибок персонала и рассмотрены возможности оценок интенсивностей ошибок заданного типа. Представлены результаты обработки мнений двух разных экспертных групп и проведен их анализ на согласованность. Приведены результаты сравнения данных экспертного опроса и результатов обработки данных об инцидентах на АЭС РФ. Даны рекомендации по использованию результатов работы в оценке эффективности мероприятий по техническому обеспечению безопасности АЭС.

Никогда не известно заранее, что конкретно повлияет на поведение оператора в процессе действий при переходных и аварийных режимах на реальном энергоблоке. Во время занятий на тренажерах при большом количестве тренируемых это влияние проявляется «в среднем», т.е., если одно и то же действие в одной и той же ситуации каждым индивидуумом производится с характерными для него особенностями, зависящими от его опытности, уровня образования, типа личности и т.п., то при массовом проведении действий (а на тренировках это так) эти особенности складываются в определенный тип поведения, характерный для уровня эксплуатируемой техники, всей системы подготовки персонала в стране, менталитета народа, уровня общей культуры и культуры безопасности. Поэтому, как и в работе [1], нами было принято решение разделить действия персонала на четыре типа, в которых укрупненно учитываются все возможные ситуации при управлении энергоблоком:

- считывание информации;
- диагностика состояния объекта управления;
- принятие решения;
- действия по реализации решения.

---

© Ю.В. Волков, Д.С. Самохин, А.В. Соболев, М.Ю. Канышев, С.Л. Лычаков, С.Н. Слынев, 2009

Детали поведения операторов в этом случае усредняются. Например, при считывании информации в одной ситуации оператору необходимо получить информацию со стрелочного прибора, в другой – с цифрового, в третьей – воспринять звуковой сигнал или речевое сообщение. На результат диагностики состояния объекта управления влияет внимательность оператора, уровень его подготовки, опыт работы на этом конкретном рабочем месте, количество выпавших сигналов. И так можно расписать детали остальных двух укрупненных типов действий. Внутри укрупненных типов действий, если статистика по ошибкам персонала достаточно велика, все эти особенности поведения усредняются.

В УТП Калининской АЭС каждая ошибка персонала, возникшая в процессе занятий, подвергается тщательному анализу, результаты которого используются в дальнейшем в учебном процессе. Однако статистика по ошибкам персонала в специальной базе данных не ведется, т.к. нет никаких требований на ее ведение. В такой ситуации для оценок показателей надежности персонала в переходных и аварийных режимах нами использована возможность проведения экспертных опросов инструкторов УТП (это, как правило, очень грамотные и опытные специалисты), а также оперативного персонала в процессе плановых занятий в УТП.

Аналогично работе [2], предложено реализовать метод экспертных оценок для определения частот появления наиболее вероятных ошибок персонала (операторов БЩУ) при действиях в аварийных ситуациях, который делится на следующие этапы.

**Первый этап.** На этом этапе организаторы опроса предоставляют экспертной группе, состоящей из  $m$  человек, анкету (табл. 1), в которой обозначены: наименование рассматриваемой аварийной ситуации, наименование действия персонала. Экспертам предлагается поэтапно описать действия персонала в заданной аварийной ситуации (колонка № 3 табл. 1), а также описать, в чем может состоять ошибка персонала на каждом этапе (колонка № 4 табл. 1). При необходимости эксперты могут дать свои комментарии в специально отведенном для этого месте (колонка № 5). Число анкет соответствует числу экспертов  $m$ .

**Второй этап.** Анкеты первого этапа организаторы опроса подвергают переработке и на основе данных, полученных на первом этапе, составляют анкеты (табл. 2) для второго раунда опроса.

В этих анкетах указаны наименование аварийной ситуации, действие персонала и перечислены все ошибки при выполнении действия, выявленные экспертами на первом этапе. Экспертам необходимо проставить степень своей уверенности (число из интервала  $[0, 1]$ ) в возникновении ошибки (колонка № 4 табл. 2) для всех ошибок из списка, т.е. они дают оценку и ошибкам, указанным другими экспертами. Экспертам также необходимо проставить минимальное (колонка № 5 табл. 2) и максимальное (колонка № 6 табл. 2) возможное количество ошибок данного типа на сто тренировок по данному инциденту.

Для облегчения работы эксперту предоставляются рекомендации по проставлению оценок. В качестве «рекомендательной» шкалы была выбрана шкала желательности Харрингтона [3], которая для целей анализа ошибок персонала имеет вид, приведенный в табл. 3.

**Третий этап.** Проводится анализ результатов второго этапа экспертного опроса  $m$  специалистов. На основе экспертной оценки (табл. 2) рассчитывается коллективная степень уверенности экспертов в возникновении ошибки персонала при действиях в рассматриваемых аварийных ситуациях:

$$\tilde{\mu}_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot k_j, \quad (1)$$

Таблица 1

**Определение этапов выполнения действия и ошибок персонала в аварийной ситуации**

Наименование аварийной ситуации	Наименование действия	Этапы выполнения	В чем может состоять ошибка на каждом этапе?	Комментарии
1	2	3	4	5
	Считывание информации			
	Диагностика состояния установки			
	Принятие решения			
	Действие, реализующее решение			

где  $m$  – число экспертов;  $i = \overline{1, n+h}$  – рассматриваемая ошибка персонала;  $k_j$  – коэффициент компетентности  $j$ -ого эксперта, алгоритм оценки которого дан в работе [2];  $x_{ij}$  – оценка  $j$ -ого эксперта возможности появления  $i$ -ой ошибки персонала из опросного листа.

Кроме коэффициентов компетентности согласованность группы экспертов количественно может быть оценена с помощью коэффициента конкордации [4]. Коэффициент конкордации при отсутствии связанных рангов находится по формуле

$$W = \frac{\sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=1}^p a_{ij} - \frac{1}{2} p(m+1) \right]^2}{\frac{1}{12} m p^2 (m^2 - 1)},$$

где  $W$  – согласованность действий экспертов (достоверность экспертных оценок);  $m$  – количество рассматриваемых ошибок персонала;  $p$  – количество экспертов;  $i$  – номер ошибки персонала;  $j$  – номер эксперта;  $a_{ij}$  – ранг важности события.

Ранжирование оценок экспертов (ранжирование осуществляется организаторами опроса самостоятельно): наибольшей оценке экспертов ставится в соответствие ранг 1, следующей за ней по убывающей величине ставится в соответствие ранг 2 и так далее (пример: оценка эксперта/ранг; 0.1/4; 0.2/3; 0.3/2; 0.4/1).

Таблица 2

**Определение степени уверенности эксперта в возникновении ошибки, а также частоты возникновения ошибки, ее верхней и нижней границ**

Наименование аварийной ситуации	Наименование действия	Наименование ошибки	Степень уверенности эксперта (числами из [0,1]) в возникновении ошибки	Минимальное количество ошибок на 100 чел.	Максимальное количество ошибок на 100 чел.
1	2	3	4	5	6
	Считывание информации				
	Диагностика состояния установки				
	Принятие решения				
	Действие, реализующее решение				

Если существует совпадение рангов, то формула для определения коэффициента конкордации принимает вид

$$W = \frac{\sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=1}^p a_{ij} - \frac{1}{2} p(m+1) \right]^2}{\frac{1}{12} m p^2 (m^2 - 1) - p \sum_{i=1}^p T_i},$$

Таблица 3

**Шкала желательности**

Желательность	Отметка на шкале желательности
Уверен, что эта ошибка доминирует среди других	1.00 – 0.80
Скорее всего, эта ошибка доминирует среди других	0.80 – 0.63
Возможно, эта ошибка доминирует среди других	0.63 – 0.37
Маловероятно, что эта ошибка доминирует среди других	0.37 – 0.20
Скорее всего, эта ошибка не доминирует среди других	0.20 – 0.00

где  $T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^k (t_j^3 - t_j)$  – число повторяющихся рангов;  $t_j$  – число повторений каждого ранга в  $j$ -ом ряду ( $j$ -го эксперта);  $k$  – число повторяющихся рангов в  $i$ -ом ряду.

Достоверность экспертных оценок лежит в диапазоне  $0 \leq W \leq 1$ , соответственно, при  $W = 0$  – согласованности нет, при  $W = 1$  – полная согласованность. Считается, что при  $W \geq 0.7$  группа экспертов является хорошо согласованной.

**На четвертом этапе** принимается к рассмотрению по одной ошибке для каждого из четырех действий персонала, обладающей наибольшим значением степени уверенности.

Далее, для каждой из этих ошибок определяются коэффициенты компетентности экспертов, степень согласованности экспертной группы, а также частота появления ошибки с коллективной степенью уверенности в возможности ее появления (формула (1)). В табл. 4 приведен пример результатов опроса инструкторов УТП Калининской АЭС по аварийной ситуации с несанкционированным закрытием БЗОК.

Таблица 4

**Заключительные данные по оценке инструкторами УТП частот появления ошибок**

Наименование ошибки персонала	Коэффициенты компетентности экспертов	Степень согласованности экспертной группы $W$	Степень уверенности экспертов в возникновении ошибки ( $\mu$ )	Частота появления ошибки ( $z^*$ )
Пропущен сигнал об уменьшении расхода питательной воды на ПГ	$k_1=0.26, k_2=0.25$ $k_3=0.26, k_4=0.23$	0.73	0.80	70/100
Не замечено уменьшение расхода питательной воды	$k_1=0.26, k_2=0.24$ $k_3=0.27, k_4=0.23$	0.77	0.71	60/100
Неверное решение об остановке ГЦН	$k_1=0.26, k_2=0.29$ $k_3=0.19, k_4=0.26$	0.79	0.82	33/100
Неполное выполнение обязательной последовательности действий	$k_1=0.26, k_2=0.25$ $k_3=0.25, k_4=0.24$	0.84	0.54	61/100

На рис. 1 представлен пример оценки частоты ошибки персонала при считывании информации инструкторами УТП (условно назовем их «инструкторы»).

На рис. 2 представлен пример оценки частоты такого типа ошибки персоналом одной из смен блока №3 Калининской АЭС при опросе во время одной из тренировок в УТП (условно назовем их «обучаемые»).

На обоих рисунках квадратами обозначены эмпирические значения нижнего ограничения, а крестиками – верхнего. Соответствующие теоретические кривые [2] подобраны методом наименьших квадратов. Координата точки пересечения двух теоретических кривых на каждом графике является наилучшей оценкой частоты появления соответствующей ошибки персонала (см. последний столбец в табл. 4).

В табл. 5 приведены данные по результатам проведенных двух опросов. Руководствуясь принципом невмешательства в работу экспертов, организаторы не

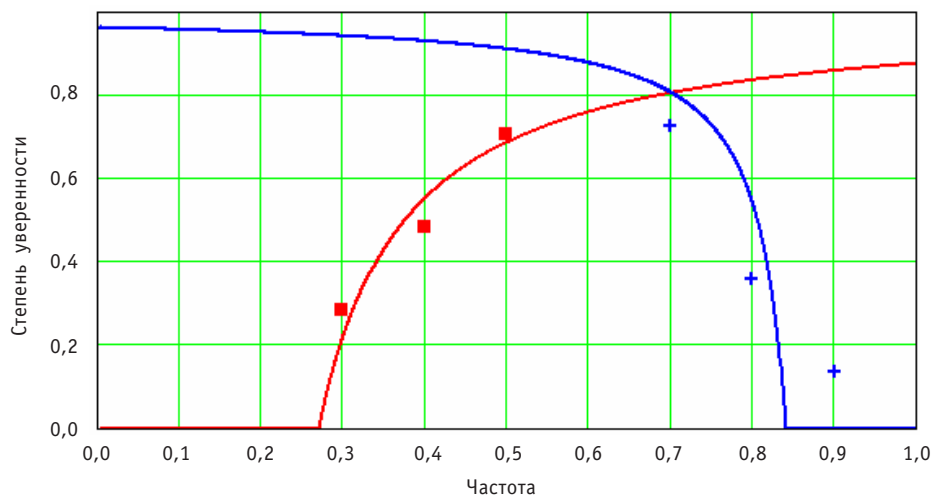


Рис. 1. Наименование ошибки: пропущен сигнал об уменьшении расхода питательной воды на ПГ

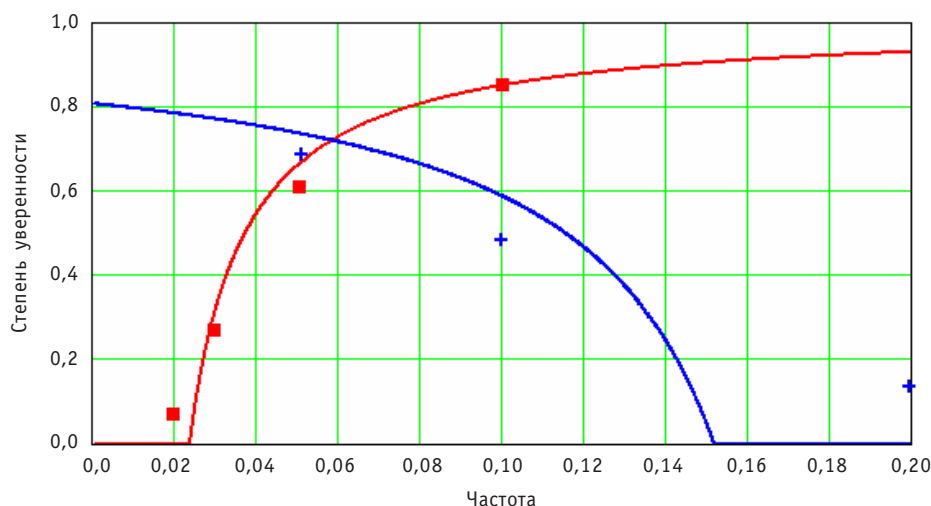


Рис. 2. Наименование ошибки: пропущен сигнал о закрытии БЗОР

выдвигали никаких требований по нормировке на какую-либо величину мнений экспертов в отношении частот ошибок, алгоритмы обработки данных также не предусматривают никаких нормировок. Поэтому суммы частот, имеющих наибольшие степени уверенности экспертов по всем четырем типам ошибок, в каждом из опросов не равны единице (строка ИТОГО в таблице).

В столбцах 4, 6 приведены данные по оценкам относительных частот по формуле

$$\omega_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^4 F_j},$$

где  $F_i$  – частота (относительное число ошибок  $i$ -го типа на 100 инцидентов) с максимальной степенью уверенности данной группы экспертов (столбцы 3 и 5).

Таблица 5

**Сводные данные по результатам опросов  
двух групп экспертов**

№ п/п	Тип действия	Инструкторы		Обучаемые	
		$F_i$	$\omega_i$	$F_i$	$\omega_i$
1	2	3	4	5	6
1.	Считывание информации	0.698	0.312	0.058	0.090
2.	Диагностика состояния	0.598	0.268	0.101	0.157
3.	Принятие решения	0.333	0.149	0.304	0.473
4.	Действия, реализующие решения	0.606	0.271	0.180	0.280
	Итого	2.235		0.643	

Из табл. 5 видно следующее.

1. В целом «обучаемые» дали абсолютные оценки частот ошибок меньшие, чем «инструкторы» (см. строку ИТОГО). Однако для ошибок при принятии решения обе группы выставили примерно одинаковые оценки частот. Эти факты, по-видимому, можно объяснить так:

- инструкторы УТП имеют производственный опыт эксплуатации энергоблоков первой очереди с меньшим уровнем автоматизации процесса и при выставлении оценок подсознательно учитывали это, а оперативный персонал с блока № 3 (в основном, молодые специалисты) ориентировался на новое поколение АСУТП и БПУ;
- оценки частот ошибок при принятии решения примерно одинаковы у обеих групп ввиду того, что частота такого типа ошибки, прежде всего, определяется уровнем подготовки, дисциплины и опытности персонала, а не техникой, с которой он работает.

2. «Инструкторы» дают наибольшую абсолютную и относительную долю ошибкам при считывании информации, а «обучаемые», наоборот, наименьшую. Это так же, как и уменьшение сумм абсолютных частот, свидетельствует о лучшем соответствии нового поколения АСУТП и БПУ фундаментальному техническому принципу обеспечения безопасности АЭС – «человеческий фактор».

3. У «обучаемых» существенно увеличился, по сравнению с «инструкторами», относительный вклад ошибок при принятии решений, т.е. по мнению этой группы экспертов, с новым АСУТП и БПУ безопасность при управлении энергоблоком стала больше зависеть от интеллекта человека и его культуры безопасности.

Мнения группы экспертов «обучаемые» менее согласованны, чем мнения группы «инструкторы». Организаторы опроса специально не следили за тем, чтобы эксперты не общались между собой при проставлении своих мнений. Поэтому, возможно, это связано с тем, что «инструкторы» как-то согласовывали свои ответы между собой, а «обучаемые» – нет. Другой возможной причиной может быть меньшая опытность и слаженность коллектива «обучаемых» (нет большого опыта совершения ошибок и коллективного их устранения).

Наконец, из разброса эмпирических точек на рис. 1, 2 видно, что все эксперты нижнее ограничение воспринимают более определенно и согласованно, чем верхнее. Для объяснения, почему это так, по-видимому, необходимо привлечь психологов.

Таким образом, разработан и практически реализован метод организации экспертных опросов персонала АЭС для анализа ошибок персонала при действиях в переходных и аварийных режимах. Получены количественные меры для оценки надежности персонала реакторов ВВЭР в конкретной аварийной ситуации – несанкционированное закрытие БЗБК.

Таблица 6

**Результаты сравнения данных экспертных опросов и обработки информации по инцидентам [1]**

№ п/п	Тип действия	Инструкторы	Обучаемые	Экспл. данные	Инструкторы	Обучаемые
		$\omega_i$	$\omega_i$	$\hat{\omega}_i$	$W_i$	$W_i$
1	2	3	4	5	6	7
1.	Считывание информации	0.312	0.090	0,372	0,010	0,21
2.	Диагностика состояния	0.268	0.157	0,164	0,066	0,0003
3.	Принятие решения	0.149	0.473	0,224	0,025	0,28
4.	Действия, реализующие решение	0.271	0.280	0,240	0,004	0,006
5.	$\sum W_i$				0,105	0,496

В табл. 6 приведены результаты сравнения данных экспертного опроса и результатов обработки данных об инцидентах на АЭС РФ [1]. В столбцах 3, 4 приведены значения весов ошибок персонала  $\omega_i$  из табл. 5. В столбце 5 приведены оценки весов ошибок персонала по формуле

$$\hat{\omega}_i = \frac{\rho_i}{\sum_{j=1}^4 \rho_j}, \quad (2)$$

где в числителе стоит оцененный в [1] параметр потока инцидентов с ошибкой заданного типа, а в знаменателе – сумма параметров потоков инцидентов по всем типам ошибок. Формула (2) получена из классической вероятностной схемы – вероятность события есть отношение числа исходов, благоприятствующих этому событию, к полному числу всех исходов. В столбцах 6, 7 приведены «меры близости» мнений экспертов к данным об инцидентах, вычисленные по формуле

$$W_i = \frac{(\omega_i - \hat{\omega}_i)^2}{\hat{\omega}_i}.$$

В столбцах 6, 7 последней строки приведены суммы всех «мер близости», которые являются некими аналогами критерия Пирсона [5] для сравнения двух распределений.

Из данных табл. 6 следует, что мнения «инструкторов», в целом, лучше совпадают с объективными данными, чем мнения «обучаемых». Из этого можно сделать следующие выводы:

- опытные инструкторы УТП лучше ориентированы в ретроспективе событий, чем более молодые «обучаемые»;
- появление нового поколения АСУТП и БПУ приведет к смещению проблем эксплуатации из области технического оснащения пультов и связанных с этим проблем, например, считывания информации, в область проблем отбора оперативного персонала по уровню подготовки и способности вовремя концентрироваться и принимать правильные решения;



- с появлением новых АСУТП и БПУ, по-видимому, следует ожидать снижения интенсивности ошибок персонала типа «ошибка считывания информации» примерно в 3–4 раза по сравнению с оцененной по предыдущей статистике инцидентов. Интенсивность ошибок остальных типов, скорее всего, мало изменится.

Одним из важных результатов этой работы является демонстрация возможности с помощью экспертных опросов количественно оценивать эффективность мероприятий по техническому обеспечению безопасности ядерных энергоблоков. Примером такой оценки является оценка некоторых преимуществ АСУТП и БПУ блока №3 Калининской АЭС по отношению к АСУТП и БПУ предыдущего поколения.

### **Литература**

1. Волков Ю.В., Самохин Д.С., Соболев А.В., Шкаровский А.Н. Разработка методов и оценка показателей надежности персонала по статистике инцидентов на АЭС РФ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 15–24.
2. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Нечетко вероятностные модели в оценках показателей надежности оборудования реакторных установок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 3.
3. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2002.
4. Ромашкина Г.Ф., Татарова Г.Г. Коэффициент конкордации в анализе социологических данных. [www.isras.ru/files/File/4M/20/Romashkina,Tatarova.pdf](http://www.isras.ru/files/File/4M/20/Romashkina,Tatarova.pdf) (9.10.2007)
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2001.

Поступила в редакцию 21.11.2008

Are developed methodical, algorithmic and the software of calculation of speed propagation of waves of pressure (SPWP) in the coolant of reactor core of boiling reactors. Results of calculation of SPWP in technological channels of reactor RBMK-1000 in various modes of operation are resulted.

#### УДК 621.039.58

*The results of the Development of the Experts Questioning Methods and based on them the Estimation of the NPP Staff Reliability Indices \Yu. V. Volkov, D. S. Samokhin, A. V. Sobolev, M. Y. Kanishev, S. L. Lichakov, S. N. Slinev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.*

The paper deals with the methods for estimation the NPP staff reliability indices based on the experts questioning data. Four types of staff errors have been chosen and possibility of the estimation of the given errors frequency has been considered. The results of the opinions two different experts groups are presented and the analysis on the coincidence of these results has been made. The results of the data comparison of the experts questioning and the results of the data processing for the NPP incidents have been made. The recommendations how to use the drawn conclusions to estimate the efficiency of NPP engineers safety activities are given.

#### УДК 621.039.58

*The problem of Level Optimization for Disorder Detection in Observed Random Process \A. V. Igitov, O. M. Gulina, N. L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.*

The equipment state diagnostics connects with detection of irregular situations in its operation. There is formulated optimization problem for level intersection number, suggested the calculation method for optimization problem solving. There is performed also the algorithm of model parameters asymptotical estimation and developed the applied soft. Calculations are performed and nomographs are pictured by means of Delphi and Mathcad technologies.

#### УДК 621.039.52.034.3: 532.546

*Geometrical and Hydrodynamic Features of the Radial Coolant Distribution HTGR \V. A. Klimova, V. M. Pahaluev, S. Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.*

The pebble bed reactor core with radial gas flow geometric parameters depending on the demanded energy and construction characteristics analysis results are given. The comparison with the reactor with axial gas flow is carried out. The experimental hydraulic resistance coefficients ratio received contains the dependency on the reactor core inner and outer radius, besides Reynolds number and pebble bed diameter, and can be recommended for the reactor pressure loss calculations for considerable pebble bed thickness. A significant difference of such flows from the cases of flat gas flows in pebble bed is the decrease of the flow pressure pulsations rate from the periphery to the centre.

#### УДК 621.039.547.5

*Features of Resonant Absorption of Neutrons in Thorium Containing Multiply Systems, Caused by Change in Ratio of Moderator Volume and Fuel Volume \I. V. Shamanin, A. V. Godovich, P. A. Seleznev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.*

The results of numerical experiments defining borders of area of values of ratio  $V_{mod}/V_f$  (volume of moderator/volume of fuel) in which anomaly during dependence of resonant absorption is observed are resulted. Its existence proves physical advantages  $Th^{232}$  in comparison with  $U^{238}$  in case of use as a reproducing material in structure of nuclear fuel at the certain values of ratio  $V_{mod}/V_f$ .