

## РАСЧЕТ ГЛАВНОГО РАЗЪЕМА ГЦНА-1391 В РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

**А.А. Мухлынин, В.И. Слободчук**

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



Представлены результаты расчета напряжений в шпильках главного разъема главного циркуляционного насоса ГЦНА-1391 как в стационарных, так и в переходных режимах. Оценены термические напряжения, возникающие в шпильках главного разъема в режимах разогрева-расхолаживания. Показано, что термические напряжения составляют незначительную долю общих напряжений, а суммарные напряжения в шпильках главного разъема не превышают допустимых пределов во всех рассмотренных режимах.

**Ключевые слова:** главный циркуляционный насос, численное моделирование, термические и механические напряжения.

**Key words:** main circulation pump, numerical simulation, thermal and mechanical stress.

### ВВЕДЕНИЕ

Главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА) входит в состав реакторной установки АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1000 и обеспечивает циркуляцию теплоносителя в первом контуре. ГЦНА является оборудованием систем, важных для безопасности, и от него в значительной мере зависит безопасность АЭС. Тип насоса – центробежный одноступенчатый вертикальный с механическим уплотнением вала. Основной режим работы насоса – длительная параллельная работа в контуре четырех ГЦНА при номинальных параметрах теплоносителя на входе в насос:  $T_{вх}=286-293^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{вх}=15,3\pm 0,3$  МПа. ГЦНА должен сохранять работоспособность в условиях воздействия нагрузок, соответствующих как условиям нормальной эксплуатации, так и режиму нарушения условий нормальной эксплуатации в сочетании с сейсмическими нагрузками вплоть до проектного землетрясения. При увеличении нагрузок до максимального расчетного землетрясения ГЦНА отключается, при этом сохраняется его прочность. Допускается разогрев и расхолаживание насоса в составе первого контура АЭС в интервале температур  $20-300^{\circ}\text{C}$  со скоростью до  $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  до трехсот циклов за срок службы. В аварийных режимах допускается ускоренное расхолаживание со скоростью до  $60^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  30 раз за срок службы. ГЦНА проходит гидроиспытания в составе трубопроводов первого контура давлением 24,5 МПа при температуре теплоносителя  $50-130^{\circ}\text{C}$  в соответствии с регламентом. Таким образом, в процессе эксплуатации насосный агрегат испытывает как статические, так и динамические (цикли-

© А.А. Мухлынин, В.И. Слободчук, 2009

ческие) нагрузки. В данной работе проводится расчет главного разъема ГЦНА-1391 с учетом всех основных нагрузок за исключением нагрузок от проектного землетрясения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На действующих энергоблоках в настоящее время используются насосные агрегаты типа ГЦН-195М. В ГЦН-195М в качестве корпуса гидравлической части используется «улитка» со спиральным отводом для организации гидравлического потока на выходе насоса. Технологически изготовление улитки возможно только литьевым методом. Учитывая, что корпус гидравлической части ГЦН относится к группе оборудования «А», отливка должна соответствовать требованиям отливок первого класса. Технология литья с учетом сложности конструкции и большого объема выплавляемого металла не позволяет выполнить требования по обеспечению качества к отливкам первого класса (в отливках присутствует заметное количество дефектов, исправление которых технически и экономически нецелесообразно).

В ГЦНА-1391 в качестве корпуса гидравлической части используется «сферический корпус» с радиальным патрубком отвода потока на выходе насоса. В такой конструкции корпуса предусмотрены установка на выходе рабочего колеса выправляющего аппарата для «раскручивания» потока (уменьшения гидравлических потерь), а также наличие буферной емкости в объеме корпуса для уменьшения скорости потока на входе в патрубок, что приводит к увеличению геометрических размеров «сферического корпуса» по отношению к «улитке». Корпус ГЦНА-1391 с основными геометрическими размерами показан на рис. 1.

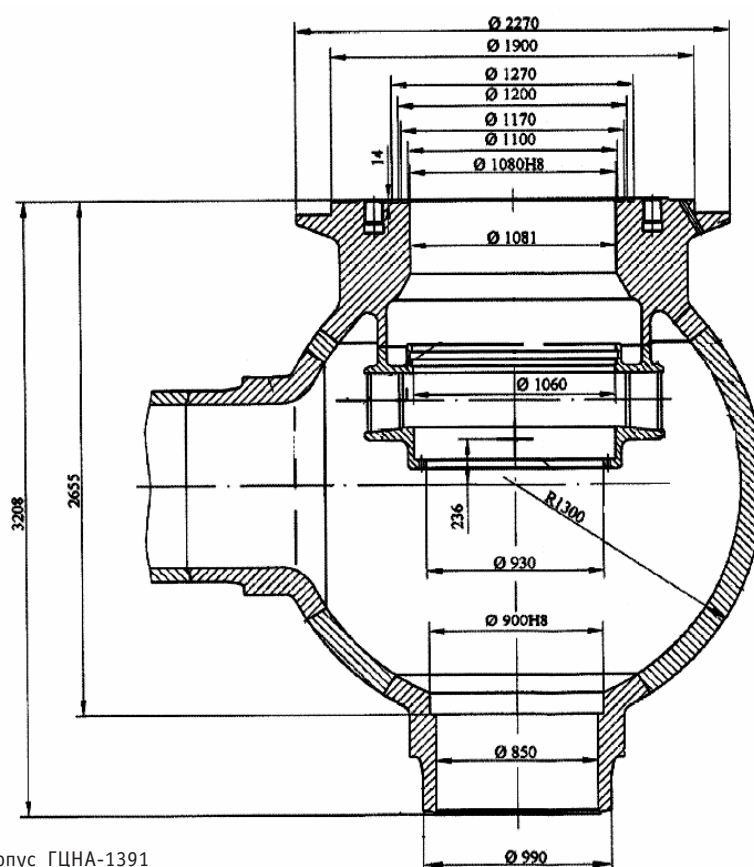


Рис. 1. Корпус ГЦНА-1391

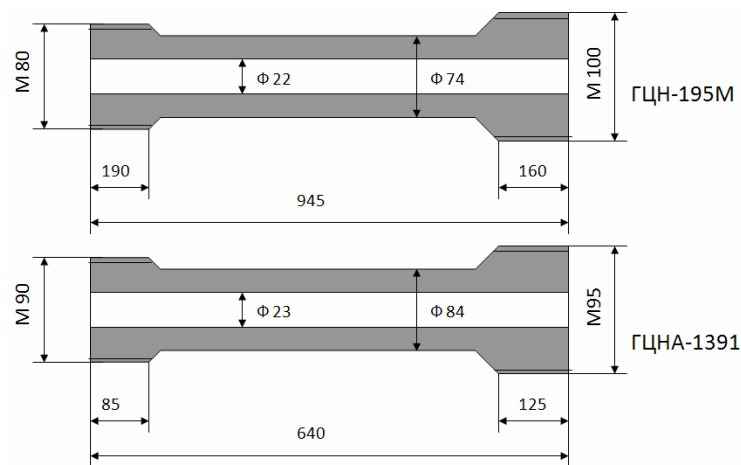


Рис. 2. Шпильки главного разъема

Шпильки главного разъема насосного агрегата также претерпели изменения (рис. 2).

Вышеуказанные отличия в конструкциях ГЦНА-1391 и ГЦН-195М и определили основную задачу данного исследования – проведение расчета главного разъема ГЦНА-1391 в разных режимах работы, в том числе расчета на прочность шпилек при статических нагрузках, т.е. расчета напряжений затяга шпилек, расчета резьбы на срез, расчета на изгиб. Не учитываются нагрузки от проектного землетрясения. В качестве отдельной задачи рассчитывается распределение температуры в основных элементах насоса для рабочих условий и переходных режимов с целью учета термических напряжений в элементах главного разъема.

Методика расчета выбрана на основе «Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» [1].

### ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Напряженное состояние узла главного разъема определялось от следующих нагружающих факторов:

- затяг шпилек;
- внутреннее давление;
- температурное поле.

Расчеты на прочность и деформацию элементов главного разъема выполнены для следующих режимов:

- гидроиспытание ( $P_h = 24,5$  МПа,  $T_h = 115^\circ\text{C}$ );
- расчетное давление (гидроиспытание на плотность),  $P = 19,6$  МПа ;
- плановый разогрев из холодного состояния со скоростью  $20^\circ\text{C}/\text{ч}$ ;
- стационарный режим ( $P = 16,3$  МПа,  $T = 290^\circ\text{C}$ );
- расхолаживание до холодного состояния со скоростью  $30$  и  $60^\circ\text{C}/\text{ч}$ .

По нормам расчета на прочность определялась податливость элементов разъема, рассчитывался коэффициент нагрузки. Далее находились напряжения в элементах крепежа для рассматриваемых режимов эксплуатации. Допускаемые напряжения определяются в соответствии с требованиями [1].

Для корпусных элементов величина номинального допускаемого напряжения  $[\sigma]$  принята меньшей из двух величин:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_{P0,2}^T}{1,5}; \frac{R_m^T}{2,6} \right\}, \quad (1)$$

где  $R_{p0,2}^T$  – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре;  $R_m^T$  – минимальное значение временного сопротивления при расчетной температуре.

Допускаемые напряжения по группам категорий напряжений:

$$[(\sigma)_1] = [\sigma]; \quad (2)$$

$$[(\sigma)_2] = 1,3[\sigma]; \quad (3)$$

$$[\sigma]_{RV} = \min \left\{ \left( 2,5 - \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \right) \cdot R_{p0,2}^T; 2R_{p0,2}^T \right\}; \quad (4)$$

$$[\tau_s] = 0,25 R_{p0,2}^T. \quad (5)$$

Допускаемые напряжения при гидроиспытании:

$$[(\sigma)_1]^{Th} = 1,35[\sigma]^{Th}; \quad (6)$$

$$[(\sigma)_2]^{Th} = 1,7[\sigma]^{Th}. \quad (7)$$

Для крепежных элементов величина номинального допускаемого напряжения  $[\sigma]_w$  принята

$$[\sigma]_w = \frac{R_{p0,2}^T}{2}. \quad (8)$$

Допускаемые напряжения по группам категорий напряжений в болтах и шпильках:

$$[(\sigma)_{1w}] = [\sigma]_w; \quad (9)$$

$$[(\sigma)_{3w}] = 1,3[\sigma]_w; \quad (10)$$

$$[(\sigma)_{4w}] = 1,7[\sigma]_w; \quad (11)$$

$$[\tau_w] = 0,25 R_{p0,2}^T. \quad (12)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$[(\sigma)_1]$  – группа приведенных напряжений, определяемая по составляющим общим мембранным напряжениям;

$[(\sigma)_2]$  – группа приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений;

$[(\sigma)_{1w}]$  – номинальное допускаемое напряжение в болтах или шпильках от давления и усилий затяга;

$[(\sigma)_{3w}]$  – группа приведенных напряжений, определяемая как сумма средних по сечению болта или шпильки напряжений растяжения, вызываемых механическими нагрузками, включая усилие затяга, и температурными воздействиями;

$[(\sigma)_{4w}]$  – группа приведенных напряжений от механических и температурных воздействий.

Допускаемые напряжения в болтах и шпильках при гидроиспытании

$$[(\sigma)_{1w}]^{Th} = 0,7[\sigma]_w^{Th}. \quad (13)$$

Геометрические размеры корпуса и шпилек, необходимые для расчета напряжений, взяты в соответствии с рис. 1 и 2. Величины допускаемых напряжений, а также теплофизические свойства материалов, используемых для изготовления элементов главного разъема насосного агрегата, взяты из [2].

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ГЛАВНОГО РАЗЪЕМА

Для расчета термических напряжений в элементах главного разъема в рабочем состоянии и при переходных режимах необходимо знать распределение темпе-

ратуры в этих элементах. Распределение температуры в основных узлах насосного агрегата получено на основе численного моделирования. В построенной модели учтены все основные элементы главного разъема, за исключением рабочего колеса насоса. Основные элементы расчетной модели представлены на рис. 3, 4.

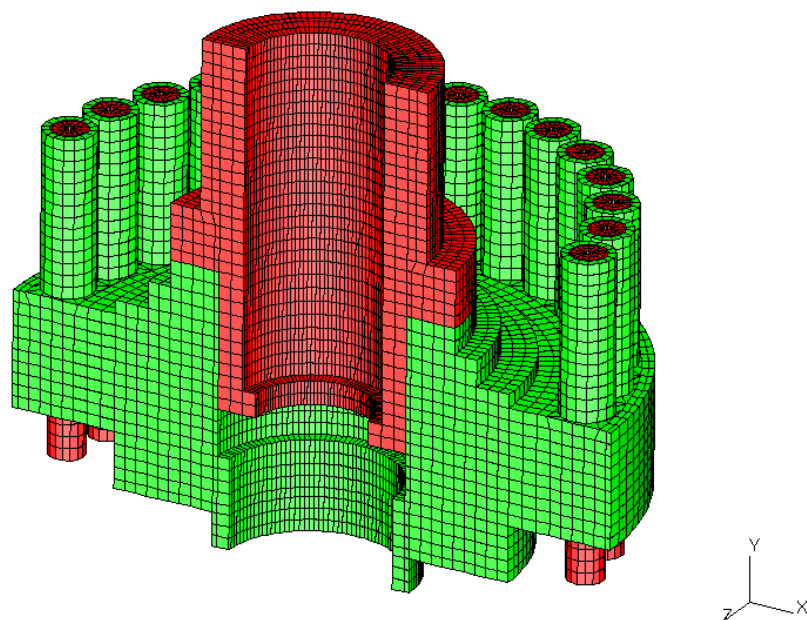


Рис. 3. Расчетная модель выемной части в сборе со шпильками

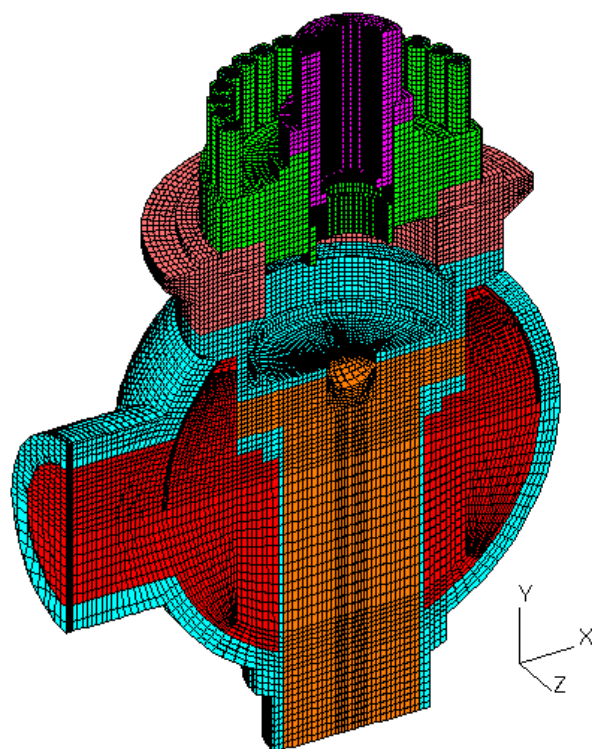


Рис. 4. Расчетная модель в сборе

Ввиду симметрии использована половина модели. Геометрические размеры модели соответствуют рис. 1, 2. Теплогидравлическое моделирование проводилось с использованием кода STAR-CD [3]. Для описания гидродинамики потока используются стандартные уравнения неразрывности, движения, а также уравнение энергии. Для твердого тела решается только уравнение энергии. Для описания турбулентных характеристик потока используется  $k$ - $\varepsilon$ -модель Чена, выбранная из следующих соображений. В стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -модели используется только один временной масштаб для диссипации турбулентной энергии в уравнении для  $\varepsilon$ . В модели Чена используется еще один временной масштаб – производства турбулентной энергии. Этот дополнительный член в уравнении для  $\varepsilon$  позволяет более аккуратно учитывать механизм переноса энергии в турбулентном потоке. Это обстоятельство весьма существенно, когда для потока решаются не только уравнения гидродинамики, но и уравнение теплообмена.

При расчете распределения температуры учитывается, что корпус насоса теплоизолирован, а выемная часть охлаждается за счет естественной конвекции воздуха. Поэтому для расчета температуры ГЦНА в горячем состоянии и в переходных режимах необходимо рассчитать коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции воздуха. Расчет теплоотдачи при свободной конвекции, вызванной различием плотности неодинаково нагретых частей среды, ведется по следующей зависимости [4]:

$$Nu_m = C \cdot Ra_m^n \pm 15\%, \quad (14)$$

где  $Ra_m = Gr_m Pr_m$  – число Релея, а определяющая температура для определения теплофизических свойств воздуха – это  $t_m = (t_w + t_f)/2$ ;  $t_w$  – температура стенки;  $t_f$  – температура потока вдали от стенки;  $Gr_m$  и  $Pr_m$  – числа Грасгофа и Прандтля соответственно. Значения  $C$  и  $n$  взяты из [4].

Для расчета числа Грасгофа известны все величины кроме  $\Delta t$  – разности температур стенки и потока. Значение  $\Delta t$  определялось путем последовательных приближений, т.е. сначала задавалось начальное приближение  $\Delta t$ , рассчитывалось число Грасгофа, затем коэффициент теплоотдачи, распределение температуры в элементах насоса, новое значение  $\Delta t$  и т.д. В результате было получено  $\Delta t \approx 115^\circ\text{C}$ . Таким образом, для рабочих условий получено

$$Gr_m \approx 1,9 \cdot 10^{10}, \text{ а } Ra_m \approx 1,34 \cdot 10^{10}.$$

Рассчитав число Нуссельта, находим коэффициент теплоотдачи  $\alpha \approx 6,7 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Это значение коэффициента теплоотдачи использовано для задания граничных условий теплообмена при естественной конвекции.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

С использованием построенной модели проведены расчеты распределения температуры в основных элементах насосного агрегата. На рис. 5 в качестве примера представлено распределение температуры в шпильках для рабочего состояния, т.е. при температуре теплоносителя, равной  $290^\circ\text{C}$ , а также для режимов расхолаживания со скоростью  $30$  и  $60^\circ\text{C/ч}$ . Наибольший интерес для расчета представляет распределение температуры в корпусе выемной части и шпильках. Высота корпуса выемной части в месте соединения корпуса с насосом составляет  $313 \text{ мм}$ . Из полученных распределений температуры в шпильках и корпусе выемной части определена средняя температура шпильки и корпуса. Это позволяет оценить термическое напряжение в шпильке, вызванное разностью термического расширения шпильки и корпуса выемной части.

Аналогично проводится расчет температурного поля и в переходных режимах. Расчет переходных режимов осуществляется путем задания на входе насоса зако-

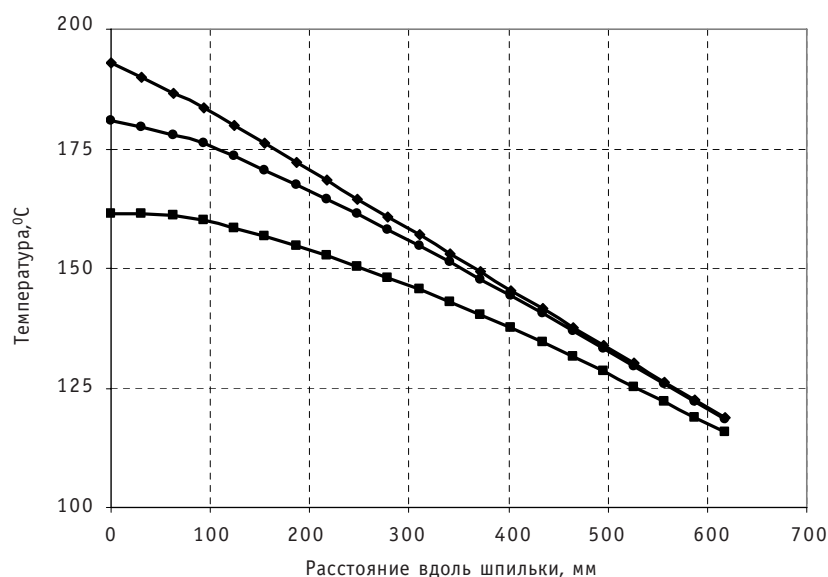


Рис. 5. Распределение температуры в шпильках:  $\blacklozenge$  — температура в шпильке в рабочем состоянии;  $\blacksquare$  — температура в шпильке в режиме расхолаживания со скоростью  $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ;  $\bullet$  — температура в шпильке в режиме расхолаживания со скоростью  $60^{\circ}\text{C}/\text{ч}$

на изменения температуры теплоносителя от времени (в зависимости от скорости разогрева и расхолаживания). Для начала были проведены тестовые расчеты с целью определения оптимального шага по времени, обеспечивающего устойчивость численного решения. В итоге шаг по времени принят равным  $\Delta t = 30$  с. При этом расчет заканчивается в момент достижения заданного значения температуры теплоносителя на входе насоса, а именно:

- $290^{\circ}\text{C}$  при разогреве со скоростью  $20^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ;
- $50^{\circ}\text{C}$  при расхолаживании со скоростью 30 или  $60^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ .

Для рассмотренных случаев получены распределения температуры в шпильках. В табл. 1 представлены средние значения температуры участка шпильки высотой 313 мм, соответствующей высоте корпуса выемной части в месте ее соединения с насосом. С использованием результатов численного моделирования получены термические напряжения в шпильках. Используя методику расчета напряженного состояния, описанную выше, а также термические напряжения, получили окончательные значения напряжений в шпильках главного разъема ГЦНА-1391. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Среднее значение температуры участка шпильки в расчетных режимах**

Состояние насоса	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Холодное	20
Рабочее	163
Разогрев со скоростью $20^{\circ}\text{C}/\text{ч}$	75
Расхолаживание со скоростью $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$	148.7
Расхолаживание со скоростью $60^{\circ}\text{C}/\text{ч}$	159.3



Таблица 2

**Основные результаты расчета напряжений в шпильках главного разъема ГЦНА-1391**

Состояние насоса		Холодное $t = 20^{\circ}\text{C}$	Горячее $t = 290^{\circ}\text{C}$	Разогрев со скоростью $20^{\circ}\text{C/ч}$	Расхола- живание со скоростью $30^{\circ}\text{C/ч}$	Расхола- живание со скоростью $60^{\circ}\text{C/ч}$	Допусти- мые напря- жения
Напряжения растяжения (МПа)	Верх	197,487	197,487	197,487	193,31	193,31	441
	низ	163,736	163,736	163,736	160,273	160,273	
Напряжения среза резьбы (МПа)	Верх	102,557	102,557	102,557	100,389	100,389	183
	низ	54,768	54,768	54,768	53,609	53,609	
Напряжения в шпильке по группе 3 (МПа)	Верх	197,487	197,127	208,454	204,183	204,19	573
	низ	163,736	163,437	172,828	169,287	169,293	
Напряжения изгиба (МПа)	Верх	58,95	56,345	24,59	24,59	24,59	
	низ	11,021	13,025	19,663	19,663	19,663	
Напряжения в шпильке по группе 4 (МПа)	Верх	256,437	253,472	233,043	228,772	228,779	624
	низ	174,245	176,463	192,491	188,95	188,956	

Видно, что во всех рассмотренных режимах напряжения в шпильках не превышают предельных значений. Полученные результаты также позволяют сделать вывод, что дополнительные термические напряжения составляют незначительную долю от суммарного напряжения в шпильках главного разъема для всех рассмотренных режимов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенный расчет напряжений, возникающих в шпильках главного разъема ГЦНА-1391 от основных нагрузок, показал, что максимальные нагрузки в шпильках не превышают предельных значений для всех рассмотренных режимов работы. Следовательно, безопасность ГЦНА, обусловливаемая прочностью шпилек, будет обеспечена. При этом установлено, что дополнительные термические напряжения составляют незначительную долю от суммарного напряжения. При расчетах не учитывались дополнительные динамические напряжения от сейсмических нагрузок, а также не проводился расчет на циклическую усталость. Расчет этих состояний можно рассматривать как возможное продолжение данной работы.

**Литература**

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2001.
3. STAR-CD. User Guide. CD adapco Group. 2005.
4. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступила в редакцию 26.12.2008



*(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 12 titles.*

The article is devoted to opportunity of application the methods of the Allium-test in radioecological monitoring. It is carried out biotestings of natural waters from territories of Obninsk regional radioactive repository. Ecological conditions is investigated and the estimation of potential danger to the natural environment is carried out. Results have shown, that negative biological effects are formed under influence of polluting substances in water of well located near to emergency capacity. For determination of the contribution radioactive components in formation of the biotests response are carried out additional modelling experiments. The estimation of radiosensitivity of an onions in a range of doses from 0,1 up to 2 Гр is given.

#### **УДК 621.039.5**

*Development of Calculation Model and Analysis of Some Transition Processes in KLT-40S Reactor with SERPENT Code \P.E. Kaplar, I.S. Lisitsin, P.V. Markov, N.A. Marchikhina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 10 illustrations. – References, 5 titles.*

Calculation model of KLT-40S reactor with concern of stationary and transition regimes of reactor by means of heat-hydraulic code SERPENT had developed. Results of calculation of stationary regime at the rated power level with code had compared with the reactors developers data, which indicates that calculation model was highly valid. Calculation analysis of transition regimes had performed. These transition regimes are: shutdown of 2 steam generators sections; shutdown of 2 circulation pumps of first circuit. The fact that position of control rods was invariable must be in parenthesis. Alterations of power, heat carrier temperature, fuels and dispersive fuel compositions coats had specified.

#### **УДК 621.039.512**

*Spatial Neutron Kinetic Module of ROSA Code \A.L. Cherezov, N.V. Shchukin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table. – References, 5 titles.*

A spatial neutron kinetic module was developed for the computer code ROSA. The paper describes the numerical scheme used in the module for resolving neutron kinetic equations. Two methodologies (analytical integration and Gears method) were compared each other on their efficiency and accuracy. Both methodologies were verified on the test problems. The paper presents the results obtained in the verification studies.

#### **УДК 621.039.59: 621.039.7**

*Control System of Extraction Column \A.G. Gorunov, Y.A. Chursin, K.V. Turetskov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 7 illustrations. – References, 14 titles.*

The universal multicomponent model of extraction in pulsating Column was presented. Check of adequacy of model was made and the system of automated control by concentration of uranium in pulsating Column is synthesised.

#### **УДК 621.183.371**

*Calculation of Main Joint of MCPA-1391 under Different Operation Conditions \A.A. Mukhlynin, V. I. Slobodchyk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.*

Results of stress calculation of studs of the main joint of the main circulation pump MCPA-1391 both under steady state, and under transient conditions are presented. The thermal stress arising in the studs of the main joint under the warming up and under shut-down conditions are estimated. It is shown, that the thermal stress is an insignificant part of the total stress, and the total stress of the studs of the main joint does not exceed the limit value under all considered conditions.