

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ И ПЕРЕКРЁСТНОЙ ПРОВЕРКИ РАСЧЁТНОГО КОДА РОК/Б НА ЗАДАЧЕ ПОТЕРИ ОХЛАЖДЕНИЯ В БАСЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ

Р.М. Следков*, М.М. Карнаухов*, О.Е. Степанов*, М.М. Бедретдинов*,
И.А. Чусов*, **

* АО ОКБ «Гидропресс»

142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1



Рассматриваются процедуры валидации и перекрестной проверки модернизированного расчётного кода РОК/Б. Основная задача, решаемая этой программой, – обоснование величины плотности теплоносителя в бассейне выдержки и температурного режима кассет при длительном отключении систем охлаждения. Предусмотрена возможность проведения расчётов для различных типов конструкций ТВС и ВВЭР, в частности, энергоблоков ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-440 с одно- и двухъярусной компоновкой ТВС.

Математическая модель для расчёта тепломассопереноса (в том числе модель кипящего теплоносителя), реализованная в РОК/Б, включает в себя уравнение движения; уравнения для расчёта энтальпии по высоте топливной части ТВС при естественной циркуляции теплоносителя в канале с ТВС и межканальном пространстве; уравнение баланса между изменением массы в каналах стеллажей с кассетами и в межкассетном пространстве и количеством выпаренной (вытекшей) воды; уравнение теплообмена между твэлом и паровой средой. Система уравнений дополнена замыкающими соотношениями для расчёта теплофизических свойств воды и пара, топлива и оболочки, пароводяной смеси в каналах, теплоты парациркуляционной реакции.

Валидация выполнялась по данным эксперимента ALADIN немецких специалистов и данным ОКБ «Гидропресс». Перекрестная проверка кода РОК/Б проводилась в сравнении с результатами расчётов по кодам КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1. По результатам валидации сделан вывод, что отклонение результатов РОК/Б от экспериментальных данных лежит в диапазоне от двух до 10% (10% – для мощности твэла 20 Вт). Перекрестная проверка показала что отклонение расчётов РОК/Б от СОКРАТ/В1 не превышает 0,5%, а от КОРСАР/ГП – меньше 10%.

Ключевые слова: бассейн выдержки, расчётный код РОК/Б, КОРСАР/ГП, СОКРАТ/В1, потеря охлаждения, ВВЭР, набухание, верификация, твэл, ТВС.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с тем, что отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) продолжают выделять остаточное тепло ещё на протяжении многих лет после извлечения из реактора, в составе систем хранения отработавшего топлива в проектах АЭС предусмотрены бассейны выдержки (БВ), в которых организуется выдержка и охлаждение топлива в течение нескольких лет перед его отправкой на захоронение или переработку. Основная задача, решаемая БВ, – снижение активности ТВС и отвод остаточного тепловыделения. Отметим, что конструкция БВ включает в себя систему охлаждения ОТВС [1 – 3].

При запроектных авариях возможен отказ на недопустимо долгий период всех активных каналов систем нормальной эксплуатации и систем безопасности, что в случае невозможности своевременного обеспечения подпитки бассейна выдержки альтернативными проектными способами (мобильная техника) может привести к развитию аварии по тяжелому сценарию [4]. Например, в 2011 г. в Японии в результате удара океанской волны высотой, не предусмотренной проектом, на площадке АЭС «Фукусима-1» была потеряна или существенно повреждена большая часть критически важного для безопасности оборудования [5].

Объём экспериментальных исследований, используемых в целях верификации отечественных и зарубежных теплогидравлических кодов при параметрах теплоносителя, характерных для аварийных режимов в БВ, включает в себя опыты на стенде повторно-го залива ОКБ «Гидропресс» в 1960-х и 1990-х гг. [6, 7] и более современные эксперименты на установке ALADIN [8]. Эти данные в настоящее время являются опорной базой для верификации системных программ СОКРАТ/В1, КОРСАР/ГП, ЛОГОС [8 – 10] и т.д.

Основная задача, решаемая модернизированным кодом РОК/Б, – расчётное обоснование величины плотности теплоносителя в БВ и температурного режима кассет при длительном прекращении работы систем охлаждения (прекращение подачи охлаждающей воды). Кроме того, с помощью РОК/Б возможно проведение расчёта для аварии с истечением теплоносителя из БВ с одновременным длительным прекращением работы систем охлаждения.

В работе валидация РОК/Б выполнялась с использованием упомянутых выше результатов экспериментов. Отметим, что применение специализированных программ широко практикуется в проектных организациях и диктуется необходимостью

- кратного уменьшения времени счёта программы по сравнению с системными кодами;
- повышенной устойчивости (нет аварийных остановов программы, если исходные данные заданы не совсем корректно) по сравнению с системными кодами;
- жёстких расчётных схем, заложенных в специализированных программах, аттестуемых лишь единожды;
- рассмотрения тех же явлений в БВ, что и в системных кодах при гораздо меньшей ресурсоемкости;
- получения той же «номенклатуры» результатов, что и в системных кодах при гораздо меньшей ресурсоемкости;
- быстрого и надёжного исследования отдельных эффектов и явлений (например, набухания теплоносителя) с помощью относительно простых методик, заложенных в специализированной программе;
- простоты работы с программой – подготовка инженеров-проектантов для использования специализированных программ занимает гораздо меньше времени, чем для системных кодов.

Примерами специализированных программ являются СТАР-1, ТИГРСК, ТИГРСП и представляемая авторами программа РОК/Б (разработана в 1990 г., модернизация

велась с 1995 г. и продолжается в настоящее время).

Задачами, которые решались в данной работе, являлись

- валидация программы РОК/Б на основании экспериментальных данных;
- перекрёстная проверка РОК/Б в сравнении с программами КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1.

ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ КОДА РОК/Б

Рассмотрим кратко описание физической и математической моделей, реализованных в коде РОК/Б. Геометрия исследуемой области показана на рис. 1, где взят случай одноярусного расположения ОТВС.

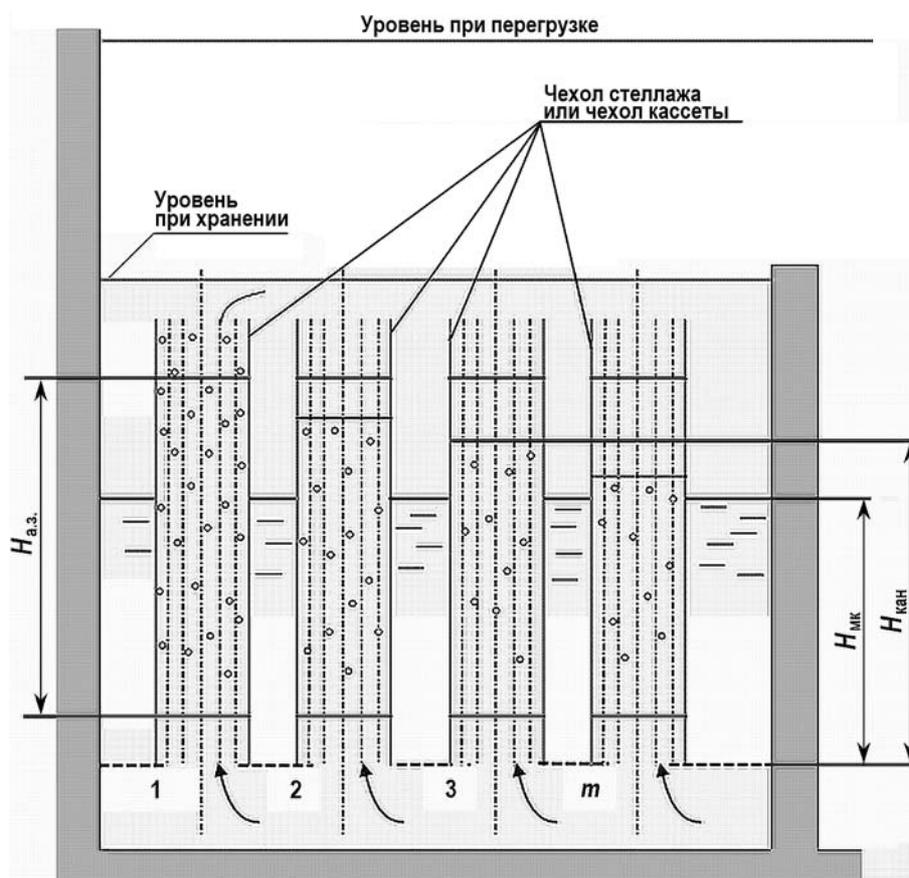


Рис. 1. Общий вид расчётной области при одноярусном расположении ОТВС; 1, 2, 3, ..., m – номера групп каналов с кассетами

Предполагается, что в момент $\tau = 0$ прекращает работу система принудительного охлаждения БВ и расхолаживание осуществляется только за счёт естественной конвекции. Движущий перепад давления целиком определяется разностью температур в нижней и верхней частях ОТВС. При достижении теплоносителем температуры насыщения происходит его локальное вскипание, что приводит к необходимости расчёта параметров пароводяной смеси. Отметим ещё одно важное обстоятельство, налагаемое конструкцией БВ, – при двухъярусном расположении ОТВС начальными условиями для расчёта второго яруса являются расходы теплоносителя и пара, полученные в расчётах первого яруса.

Математическая модель для расчёта теплообмена, в том числе модель ки-

пения теплоносителя, реализованная в РОК/Б, включает в себя
– уравнение движения

$$\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_y + \int_0^{H_{\text{кан}}} \rho_{\text{см}}(z) g dz = H_{\text{МК}} \rho' g; \quad (1)$$

– соотношение для расчёта энтальпии в точке z по высоте топливной части ТВС при естественной циркуляции теплоносителя в канале с ТВС (подъемный участок) и межканальном пространстве (опускной участок)

$$i(z) = i_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{ТВС}}}{H_{\text{ТВС}} G_{\text{ц}}} \int_0^z q(z) dz; \quad (2)$$

– уравнение баланса между изменением массы в каналах стеллажей с кассетами и в межкассетном пространстве и количеством выпаренной (и вытекшей) воды за интервал времени $\Delta \tau = \tau_j - \tau_{j-1}$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^m \left[\int_0^{H_{\text{кан}}} \rho_{\text{см}}(z)_{i-1} dz - \int_0^{H_{\text{кан}}} \rho_{\text{см}}(z)_i dz \right] S_{\text{кан}} n_{\text{кан}} + (H_{\text{МК}i} - H_{\text{МК}i-1}) \rho' S_{\text{МК}} = \\ & = \left[\sum_{k=1}^m \frac{N_{\text{кан}}(k) \cdot n_{\text{кан}}(k)}{r} + \sum_{k=1}^m G_{\text{п.вх}}^{\text{кан}}(k) \cdot n_{\text{кан}}(k) \right] \Delta \tau + G_{\text{T}}; \end{aligned} \quad (3)$$

– уравнение теплового баланса для твэла в паровой среде (в случае его оголения)

$$\frac{N_{\text{ТВ}}}{H_{\text{ТВ}}} q(z) dz + \Delta Q_{\text{пп}}(z) = \alpha_z \left(\frac{F_{\text{ТВ}}}{H_{\text{ТВ}}} \right) (t_{\text{ТВ}}(z) - t_{\text{п}}(z)) + \left[\frac{(mC_p)_{\text{ТВ}}}{H_{\text{ТВ}}} \right] \frac{dt_{\text{ТВ}}(z)}{d\tau}; \quad (4)$$

– уравнение теплообмена между твэлом и паровой средой

$$\alpha_z (F_{\text{ТВ}}/H_{\text{ТВ}}) \cdot (t_{\text{ТВ}}(z) - t_{\text{п}}(z)) dz = G_{\text{п}} (C_p)_{\text{п}} dt_{\text{п}}(z). \quad (5)$$

Система уравнений дополняется замыкающими соотношениями для расчёта теплофизических свойств воды и водяного пара, материалов топлива и оболочки, коэффициентов теплоотдачи от стенки к пару, гидравлических сопротивлений и плотности пароводяной смеси в каналах, теплоты пароциркулиевой реакции. Кроме того, они включают в себя формулы для расчёта величин ΔP_c и ΔP_y , представляющие собой гидравлические потери на местные сопротивления, трение и на ускорение потока на участке 1 – 2 соответственно [11]:

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= (\xi_m + \xi_{\text{тр}} dz/D_r) \cdot (\rho' w_{\text{ц}}^2/2) \cdot \Psi \{1 + x[(\rho'/\rho'') - 1]\}, \\ \Delta P_y &= \rho_1 w_1^2 - \rho_2 w_2^2. \end{aligned}$$

Плотность пароводяной смеси в канале определяется соотношением

$$\rho_{\text{см}}(z) = \rho'(1 - \varphi(z)) + \rho''(z).$$

Более подробно сведения о математической модели кода, в том числе и обоснование выбора соотношения для расчёта коэффициента теплоотдачи от поверхности твэла к однофазной среде (воды) и от поверхности твэла к двухфазной среде (пароводяная смесь), приведены в работе [12].

В уравнениях (1) – (5), на рис. 1 и в дополнительных соотношениях используются обозначения, смысл и размерность которых указаны в табл. 1.

В качестве начального условия для расчета теплообмена в верхнем стеллаже используется распределение расхода пара, полученное на выходе из нижнего стеллажа. Этот расход пара определяется по мощности ОТВС нижнего стеллажа.

Расчётный код РОК/Б предусматривает возможность рассчитывать различные типы конструкций кассет и БВ, в частности, энергоблоков ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и

ВВЭР-440 с одноярусным и двухъярусным расположением кассет, с чехловыми трубами в стеллажах (при уплотненном хранении кассет), с чехловыми и бесчехловыми кассетами, одноотсечную и многоотсечную компоновки БВ (для ВВЭР-1000).

Таблица 1

Обозначения, принятые для математической модели кода РОК/Б

Величина	Смысл	Размерность
1	2	3
$H_{в.з}$	Высота греющей части твэла	м
$H_{мк}$	Высота уровня воды в межканальном пространстве	м
$H_{кан}$	Высота физического уровня канала	м
$\rho_{см}$	Плотность пароводяной смеси	кг/м ³
z	Координата точки по высоте топливной части ТВС	м
g	Ускорение свободного падения	м/с ²
$\Delta P_{тр}$	Гидравлические потери на трение	Па
ΔP_y	Гидравлические потери на ускорение потока	Па
ρ'	Плотность воды	кг/м ³
$i_{вх}$	Энтальпия на входе в канал с ОТВС	кДж/кг
$Q_{ТВС}$	Мощность ОТВС	кВт
$H_{ТВС}$	Высота ОТВС	м
$q(z)$	Величина энерговыделения в точке z по высоте	Дж/м
m	Количество групп каналов с кассетами	
$S_{кан}$	Проходное сечение канала	м ²
$n_{кан}$	Число каналов	–
$S_{мк}$	Проходное сечение межкассетного пространства	м ²
$N_{кан}$	Мощность канала	Вт
r	Удельная теплота парообразования	Дж/кг
$G_{п вх}^{кан}$	Расход пара на входе в канал верхнего стеллажа	кг/с
$\Delta \tau$	Временной промежуток	с
$G_{т}$	Расход теплоносителя при утечке из БВ	кг/с
$N_{тв}$	Мощность твэла	Вт
$H_{тв}$	Высота греющей части твэла	м
$\Delta Q_{п пр}$	Теплота пароциркониевой реакции	Вт
α_z	Коэффициент теплоотдачи от твэла к пару	Вт/(м ² ·К)
$F_{тв}$	Поверхность теплообмена твэлов	м ²
$t_{тв}$	Температура твэла	°С
$t_{п}$	Температура пара	°С
c_p	Удельная теплоёмкость воды	Дж/(кг·К)
ΔP_c	Гидравлические потери на сопротивление	Па
ξ_m	Коэффициент местного сопротивления	–
$\xi_{тр}$	Коэффициент сопротивления трения	–
D_f	Гидравлический диаметр	М

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3
$w_{ц}$	Скорость циркуляции теплоносителя	м/с
Ψ	Поправочный коэффициент на неомогенность двухфазного потока	–
x	Массовое расходное паросодержание	–
ρ''	Плотность пара	кг/м ³
$\varphi(z)$	Истинное объёмное паросодержание в канале	–
$G_{ц}$	Расход естественной циркуляции теплоносителя	кг/с

РАСЧЁТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ КОДОВ КОРСАР/ГП, СОКРАТ/В1 И РОК/Б

Расчётная схема для кодов КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1 (без детализации топливной части) строится следующим образом. Группа ТВС моделируется группой параллельных каналов. Каждый канал разделен по высоте на 12 участков. Десять внутренних участков по высоте канала моделируют основную (обогреваемую) часть ТВС, верхний участок моделирует верхнюю необогреваемую часть ТВС, нижний участок – нижнюю необогреваемую часть.

Расчётная схема для кода РОК/Б аналогична схеме для кода КОРСАР/ГП с той лишь разницей, что каналы объединяются в группы в зависимости от мощности ТВС, а каждый канал разделён по высоте на 50 – 100 участков.

Одним из наиболее сложных вопросов в расчёте теплообмена двухфазных потоков является расчёт истинного объёмного паросодержания j . Сравнительный анализ, выполненный в работе [12], показал, что наиболее подходящей корреляцией оказалась корреляция ОКБ «Гидропресс», полученная в 1962 г. на водовоздушном стенде с натурным необогреваемым макетом ТВС ВВЭР-1000 с подачей на вход сборки воздуха вместо пара [6]. Корреляция ОКБ «Гидропресс» представлена соотношением

$$\Delta w = 0,13 \cdot \exp(4,9 \cdot \varphi),$$

где $\Delta w = w'' - w'$ – относительная скорость пара, м/с; $w'' = w_p / \varphi$ – истинная скорость пара, м/с; $w' = w_v / (1 - \varphi)$ – истинная скорость воды, м/с; $w_p = Q_{\text{ТВС}} / (\rho'' \cdot r \cdot S_{\text{кан}})$ – приведенная (к сечению $S_{\text{кан}}$) скорость пара, м/с; $w_v = G_{ц} / (\rho_v \cdot S_{\text{кан}})$ – приведенная скорость воды, м/с. В настоящее время для определения истинного объёмного паросодержания в расчётном коде РОК/Б используется корреляция ОКБ «Гидропресс».

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАЛИДАЦИИ И ПЕРЕКРЁСТНОЙ ПРОВЕРКИ ПРОГРАММЫ РОК/Б

Эксперимент ALADIN [7] проводился немецкими специалистами на имитаторе ТВС с моделированием соседних ТВС рядами периферийных твэлов. Исходный уровень воды был относительно невысок, давление соответствовало барометрическому. Определялись значения температур стержней имитатора ТВС по всей его высоте и уровень теплоносителя в кассете. Так можно было определить время до начала оголения греющей части стержня. В процессе эксперимента измерялся массовый уровень в канале с ТВС. Момент начала оголения греющей части твэла определялся по повышению температуры верхнего участка твэла. Считается, что в этот момент времени физический уровень в канале с ТВС достигает вершины греющей части твэла. В это время измерялся массовый уровень в канале с ТВС и межкассетном пространстве, который находился ниже физического уровня. Подобным образом определялась разность физического и массового уровней в канале с ТВС. Отметим, что указанная разность определялась и в экспериментальном исследовании [14].

Важность измерения этого параметра очевидна – разность уровней является исходным параметром для анализа ядерной безопасности. Эксперимент проводился для значений мощности твэла 20 Вт (мощность сборки $96 \times 20 = 2,88$ кВт), 50 Вт (мощность сборки 7,20 кВт), 70 Вт (мощность сборки 10,08 кВт), 100 Вт (мощность сборки 14,40 кВт). Эти мощности сопоставимы с мощностью остаточных тепловыделений ТВС месячной (и более) выдержки на БВ РУ с ВВЭР. По нашему мнению, именно в этом и кроется основной недостаток эксперимента применительно к бассейнам РУ с ВВЭР [7], где не рассматриваются мощности твэлов свежетыгруженных из реактора ТВС (~ 320 Вт).

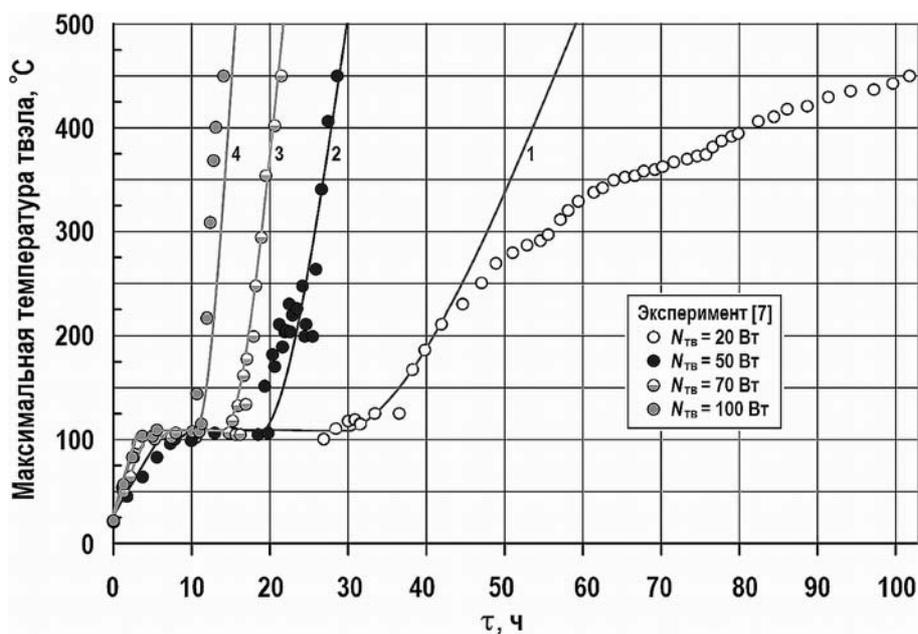


Рис. 2. Сравнение экспериментальных зависимостей изменения максимальной температуры твэлов от времени с расчетами ПОК/Б для разных мощностей твэлов: 1 – $N_{ТВ} = 20$ Вт; 2 – $N_{ТВ} = 50$ Вт; 3 – $N_{ТВ} = 70$ Вт; 4 – $N_{ТВ} = 100$ Вт

На рисунке 2 приведены результаты валидации кода ПОК/Б с данными ALADIN. Из рисунка хорошо видно, что ПОК/Б дает хорошее согласие с данными эксперимента, кроме твэлов с малой мощностью 20 Вт (соответствует мощности твэла ОТВС длительной выдержки в БВ), что объясняется тем, что мощность экспериментальной ТВС становится сопоставимой с величиной тепловых потерь экспериментальной установки (в этом случае скорость разогрева твэла отличается от расчетной).

На рисунке 3 приведены изменения физического $H_{физ}$ (swell level) и массового уровней $H_{мас}$ (collapsed level) теплоносителя в БВ, полученные по программе ПОК/Б, и экспериментальные точки из работ [7, 14]. Видно, что уровень теплоносителя, полученный по ПОК/Б, хорошо соответствует эксперименту. Время достижения физического уровня, полученного по программе ПОК/Б для греющей части твэлов, соответствует моменту оголения обогреваемой части твэлов в эксперименте ALADIN. Это также косвенно подтверждает корректность выбранной корреляции ОКБ «Гидропресс» для расчёта истинного объёмного паросодержания.

Масса пароводяной смеси равна

$$\rho_{см} \cdot F \cdot H_{физ} = \rho' \cdot F \cdot H_{мас}$$

Массовый уровень $H_{мас}$ – это уровень теплоносителя, который он имел бы при параметрах на линии насыщения, м; F – площадь, м². Массовый уровень иногда называют весовым уровнем. Поскольку $\rho_{см}$ – величина неизвестная, то и нельзя оп-

ределить реальный (физический) уровень. Измеренный с помощью прибора перепад давления пересчитывается в массовый уровень следующим образом:

$$H_{\text{мас}} = P/(\rho' \cdot F).$$

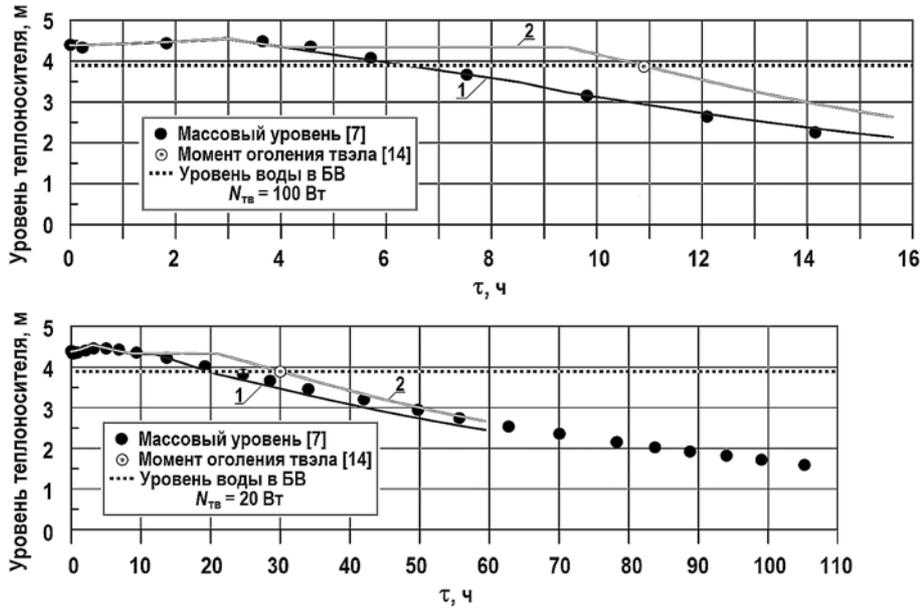


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчётных данных зависимости уровня теплоносителя от времени для разных мощностей твэлов: 1 – массовый уровень (РОК/Б); 2 – физический уровень (РОК/Б)

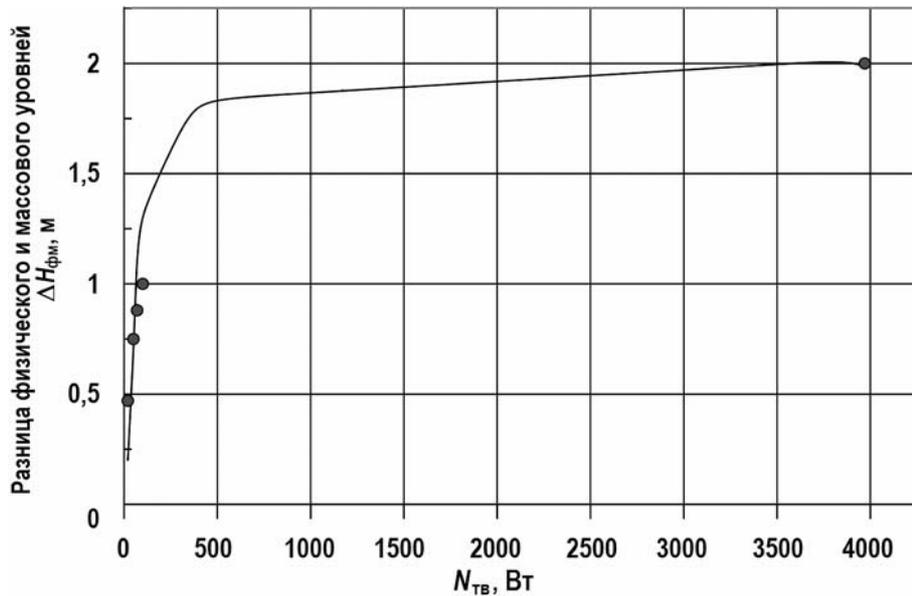


Рис. 4. Сравнение результатов расчёта и эксперимента для $\Delta H_{\text{ФМ}}$ при разных мощностях твэлов

На рисунке 4 приведена разница физического и массового уровней для ТВС $\Delta H_{\text{ФМ}}$, полученная по экспериментам [7, 14] (круглые маркеры) и по программе РОК/Б (кривая). Рисунок свидетельствует, что по параметру разницы уровня РОК/Б очень хорошо описывает эксперименты.

Эксперимент [14] проводился для 126-стержневой ТВС мощностью 500 кВт (мощ-

ность твэла 4000 Вт) и при давлении 0,35 МПа. Эксперимент [7] проводился для 144-стержневой ТВС мощностью до 14,4 кВт (мощность твэла 100 Вт). Из рисунка следует, что чем больше мощность ТВС (твэла), тем больше разница физического и массового уровней (тем ниже массовый уровень).

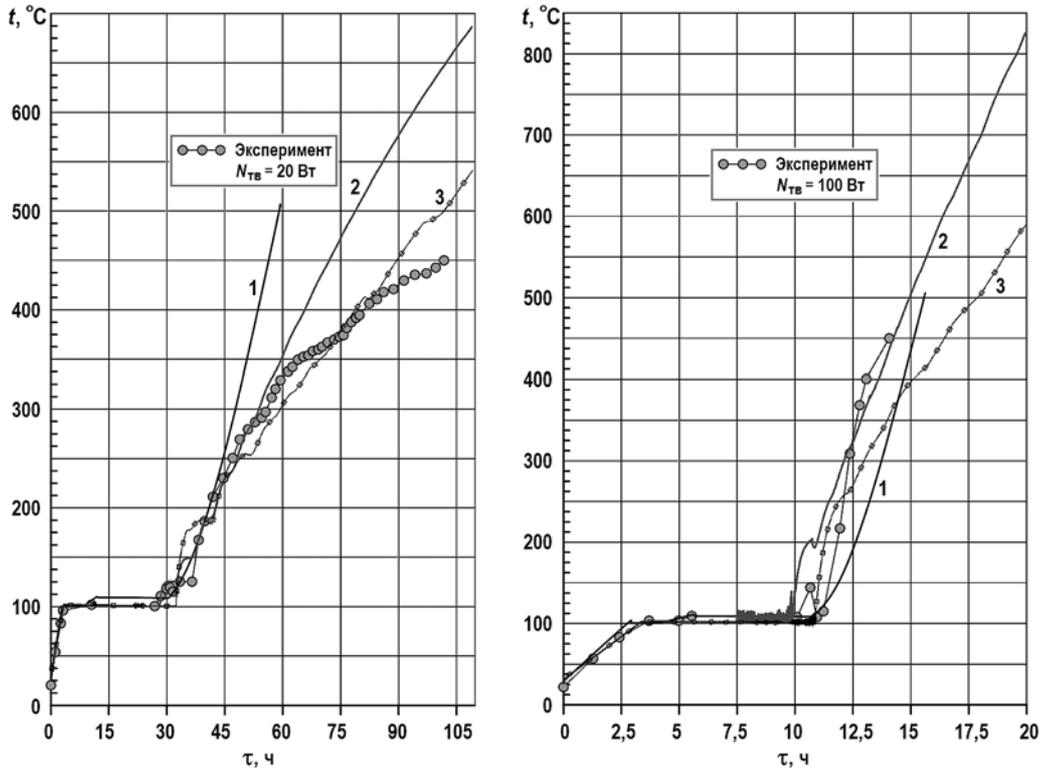


Рис. 5. Результаты перекрёстной проверки: 1 – РОК/Б; 2 – КОРСАР/ГП; 3 – СОКРАТ/В1

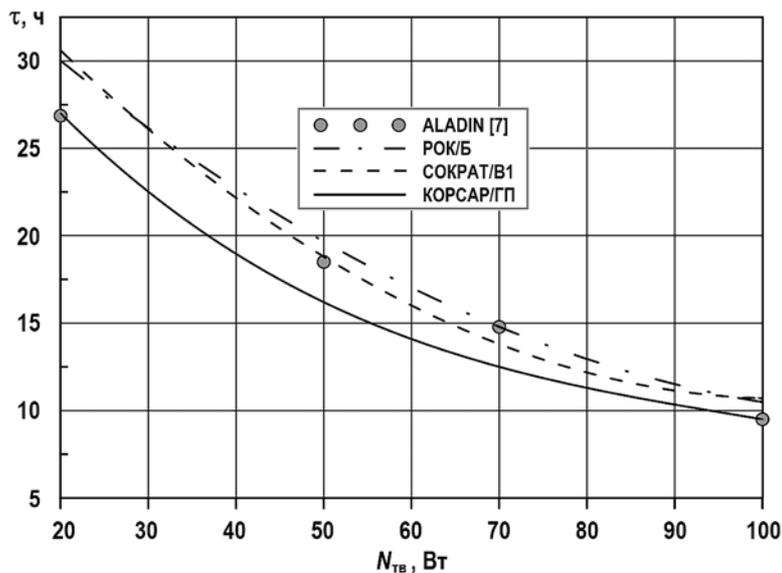


Рис. 6. Результаты расчёта времени начала оголения поверхности твэлов

Результаты перекрёстной проверки представлены на рис. 5 в виде сравнитель-

ных зависимостей динамики температуры твэлов, полученных с помощью программ РОК/Б, КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1, по отношению к экспериментам ALADIN [7] для разных уровней мощности. Видно, что расчётные коды, в том числе и РОК/Б, дают хорошее совпадение с экспериментом для температур до 250°C.

На рисунке 6 приведена зависимость времени до начала оголения поверхности твэлов от их мощности, найденная с помощью различных расчётных кодов. Видно, что время до начала оголения твэлов, полученное по КОРСАР/ГП, несколько ниже, чем в эксперименте.

Время до начала оголения топлива, полученное по РОК/Б, хорошо согласуется с экспериментальными данными при мощности твэлов больше 50 Вт. Наилучшим образом описывает эксперимент код СОКРАТ/В1. Но стоит заметить, что в эксперименте не рассматривалась мощность твэлов, характерная для ТВС трехсуточной выдержки (~300 Вт).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена валидация программы РОК/Б по основным параметрам (плотность теплоносителя, время до начала оголения топлива, массовый и физический уровни, температура твэлов). Сделан вывод, что отклонение результатов расчёта по РОК/Б от экспериментальных данных составляет не более 0,5% для вариантов с мощностью твэлов более 20 – 50 Вт, что соответствует остаточной мощности ТВС ВВЭР-1000 от 6200 до 15600 Вт (т.е. ТВС с выдержкой более одного года).

Перекрыстная проверка проводилась путем сравнения результатов расчёта программы РОК/Б с имеющимися экспериментальными данными и с результатами расчётов по системным кодам КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1. Сделан вывод, что отклонение результатов расчёта по РОК/Б от результатов расчёта по коду СОКРАТ/В1 составляет не более 0,5%, а от результатов по коду КОРСАР/ГП не более 10 – 15%.

Результаты валидации и перекрыстной проверки позволяют сделать вывод о возможности использования программы РОК/Б в теплогидравлических расчётах охлаждения топлива в БВ в режимах с прекращением охлаждения и режимах образования течей. Полная валидация возможна после проведения экспериментов на стендах, представляющих собой модели БВ с несколькими ТВС. В настоящее время такой эксперимент готовят французские специалисты (стенд DENOPI) [15].

Литература

1. Крицкий В.Г., Березина И.Г., Калинин В.И., Тихонов Н.С., Козлов Ю.В., Размашкин Н.В., Шафрова Н.П. «Атомный ренессанс» и перспективы обращения с ОЯТ. // Безопасность окружающей среды. – 2008. – № 1. – С. 68-71.
2. Гагаринский А.Ю. Обращение с РАО в ядерно-энергетической стратегии России. // Энергия: экономика, техника, экология. – 2014. – № 7. – С. 2-9.
3. Сафутин В.Д., Симановский В.М., Тихонов Н.С. Транспортирование и хранение отработавших ТВС. / Энциклопедия «Машиностроение», т. IV «Машиностроение ядерной техники», книга 2. – М.: Машиностроение, 2005. – С. 280-300.
4. Phenomena Identification and Ranking Table. Priorities for Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accidents in Spent Nuclear Fuel Pools. Nuclear Safety and Regulation. OECD 2018 NEA No. 7443. Электронный ресурс: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7443-pheno_id_rank_table.pdf (дата доступа 10.06.2021).
5. Wang D. et al. Study of Fukushima Daichi Nuclear Power Station Unit 4 Spent Fuel Pool. // Nuclear Technology. – 2012. – Vol. 180. – PP. 205-215. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT12-A14634>.
6. Гидродинамические характеристики движения воздуховодяной смеси атмосферного давления в вертикальном пучке при высоких весовых скоростях потока и повышенной температуре. Отчет 76-0-011, ОКБ «Гидропресс». – Подольск: ОКБ «Гидропресс»,

1962. – 72 с.

7. *Partmann Christine, Schuster Christoph, Hurtado Antonio*. Experimental investigation of the thermal hydraulics of a spent fuel pool under loss of active heat removal conditions. // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Vol. 330. – PP. 480-487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.02.023>.

8. *Петкевич И.И., Увакин М.А.* Применение программы LINQUAD для анализа неопределенностей расчетов режима с разрывом паропровода на установке АЭС-2006 по коду КОРСАР/ГП. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2013. – Вып. 2. – С. 51-60.

9. *Пантюшин С.И., Сорокин Ю.С.* Сравнение кодов СОКРАТ/В1, КОРСАР/ГП и ТЕЧЬ-М-97 при анализе начальной стадии тяжелой аварии на РУ ВВЭР-1200. / Сб. трудов VI Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 26-29 мая 2009. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2009. – С. 71-79.

10. *Александрова О.Л., Барабанов Р.А., Дьянов Д.Ю., Косарим С.С., Наумов А.О., Спиридонов В.Ф., Филлимонкин Е.А., Циберев К.В.* Пакет программ ЛОГОС. Конечно-элементная методика расчёта задач статической прочности конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейности. // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2014. – Вып. 3. – С. 3-17.

11. *Клемин А.И., Полянин Л.Н., Стригулин М.М.* Теплогидравлический расчёт и теплотехническая надежность ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1980. – 327 с.

12. *Следков Р.М., Степанов О.Е.* Кроссверификация программы РОК2 на задаче с потерей охлаждения бассейна выдержки РУ ВВЭР-1000. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 1. – С. 32-36.

13. *Следков Р.М., Степанов О.Е., Галкин И.Ю., Стребнев Н.А.* Анализ корреляций истинного объёмного паросодержания для задач с потерей охлаждения бассейна выдержки. // Теплоэнергетика. – 2017. – № 1. – С. 20-24. DOI: <https://doi.org/10.1134/S004036361610009X>.

14. Усовершенствование серийной реакторной установки с ВВЭР-1000 в обеспечение безопасности и надежности эксплуатации. Исследование температурного режима кассеты из имитаторов твэлов на стадии повторного залива. Отчет о НИР (заключительный 341-0-044), ОКБ «Гидропресс». – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 1985. – 112 с.

15. Research Program. DENOPI Project. Spent Fuel Pool Loss-of-Cooling and Loss-of-Cooling Accident. 2021. Электронный ресурс: <https://www.irsn.fr> (дата доступа 10.06.2021).

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.

Авторы

Следков Руслан Мансурович, инженер-конструктор
E-mail: sledkov@gpress.podolsk.ru

Карнаухов Валерий Евгеньевич, инженер-конструктор, канд. техн. наук
E-mail: karnaukhov_ve@gpress.podolsk.ru

Степанов Олег Евгеньевич, начальник группы, канд. техн. наук
E-mail: stepanov_oe@gpress.podolsk.ru

Бедретдинов Марк Маратович, инженер-конструктор
E-mail: bedretdinov2013@yandex.ru

Чусов Игорь Александрович, ведущий эксперт, профессор, д-р техн. наук
E-mail: igrch@mail.ru

RESULTS OF VALIDATION AND CROSS-VERIFICATION OF THE ROK/B DESIGN CODE ON THE PROBLEM OF LOSS OF COOLING IN THE SPENT FUEL POOL

Sledkov R.M.* , Karnaukhov V.E.* , Stepanov O.E.* , Bedretdinov M.M.* ,
Chusov I.A.* ,**

* OKB Hidropress JSC

21 Osdzhonikidze Str, 142103 Podolsk, Moscow Reg., Russia

** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, MEFhI

1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The procedures of validation and cross-verification of the newly developed computational code ROK/B are described. The main problem solved using the ROK/B code is the substantiation by calculation of the coolant density in the spent fuel pool (SFP) (untight reactor) and the temperature regime of the fuel assemblies during a protracted shutdown of the cooling systems (break in the supply of cooling water). In addition to the above, it is possible using the computational code ROK/B to carry out calculation of an accident with the discharge of the coolant from the SFP with simultaneous long-duration shutdown of the cooling systems.

The ROK/B computational code allows carrying out calculations for various types of designs of the fuel assemblies and VVER reactors, in particular, VVER-1000, VVER-1200 and VVER-440 power units with single- and two-tiered fuel assemblies arrangement, with clad pipes in racks (for compacted assemblies storage) and pipes without cladding, with cased assemblies and caseless ones.

During fuel reloading, a high level of the coolant is maintained, which makes it possible to do "wet" transportation of the assemblies from the reactor to the SFP. The mathematical model for heat and mass transfer calculation, including the boiling coolant model, implemented in the ROK/B code, includes: the motion equation, equations for calculating the enthalpy along the height of the fuel section of a fuel assembly with natural circulation of coolant within the channel containing the fuel assembly (lifting section) and in the inter-channel space (lowering section), the equation of mass balance between the channels of the racks with assemblies and in the inter-assembly space and the amount of evaporated (and outflowed) water, the heat balance equation for a fuel rod in a steam environment. The system of equations is supplemented by closing relations for calculating the thermal physics properties of water and steam, fuel and cladding materials, as well as the coefficients of heat transfer from the wall to the steam, hydraulic resistance and density of the steam-water mixture in the channels, and the heat released in the reaction of steam with zirconium.

Validation of the computational code was carried out on the basis of the data of the ALADIN experiment performed by German specialists and the data of OKB Hidropress JSC. Cross-verification of the ROK/B computational code was carried out in comparison with the results of calculation using the KORSAR/GP and SOCRAT/B1 codes. Based on the results of the validation, it was concluded that the deviation of the ROK/B results from the experimental data is not more than 2 – 10% (10% for the option with a fuel rod power of 20 W). Based on the results of cross-verification, it was concluded that the discrepancy between the ROK/B results and the calculation results for the KORSAR/GP and SOCRAT codes is not more than 0.5% (for SOCRAT/V1)

and less than 10% (for KORSAR/GP).

Key words: spent fuel pond, calculation code ROK/B, KORSAR/GP, SOCRAT/V1, loss of cooling, VVER, swelling, validation, fuel rod, fuel assembly.

REFERENCES

1. Kritsky V.G., Berezina I.G., Kalinkin V.I., Tikhonov N.S., Kozlov Yu.V., Razmashkin N.V., Shafrova N.P. «Atomic Renaissance» and Prospects of SNF Treatment. *Bezopasnost' Okruzhayushey Sredy*. 2008, no. 1, pp. 68-71 (in Russian).
2. Gagarinskiy A.Yu. RW Management in the Nuclear Energy Strategy of Russia. *Energiya: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*. 2014, no. 7, pp. 2-9 (in Russian).
3. Safutin V.D., Simanovsky V.M., Tikhonov N.S. Transportation and Storage of Spent Fuel assemblies. In *Encyclopedia «Machine Building», Vol. IV «Machine-Building of Nuclear Engineering», Book 2*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2005, pp. 280-300 (in Russian).
4. Phenomena Identification and Ranking Table. Priorities for Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accidents in Spent Nuclear Fuel Pools. Nuclear Safety and Regulation. OECD 2018 NEA No. 7443. Available at: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7443-pheno_id_rank_table.pdf (accessed Jun. 10, 2012).
5. Wang D. et al. Study of Fukushima Daichi Nuclear Power Station Unit 4 Spent Fuel Pool. *Nuclear Technology*. 2012, v. 180, pp. 205 - 215; DOI: <https://doi.org/10.13182/NT12-A14634>.
6. *Hydrodynamic Characteristics of Atmospheric Pressure Air Mixture in a Vertical Beam at High Weighted Flow Rates and Elevated Temperature*. Report 76-0-011, OKB «Gidropress». Podolsk. OKB «Gidropress» Publ., 1962, – 72 p. (in Russian).
7. Partmann Christine, Schuster Christoph, Hurtado Antonio. Experimental investigation of the thermal hydraulics of a spent fuel pool under loss of active heat removal conditions. *Nuclear Engineering and Design*. 2018, v. 330, pp.480-487; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.02.023>.
8. Petkevich I.I., Uvakin M.A. Application of the LINQUAD Program for Analysis of Uncertainties in Calculations of Regime with a Rupture of Steam Line at the AES-2006 Unit According to the KORSAR/GP code. *VANT. Ser: Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2013, iss. 2, pp. 51-60 (in Russian).
9. Pantyushin S.I., Sorokin Yu.S. Comparison of the Codes SOCRAT/V1, KORSAR/GP and TECH-M-97 in the Analysis of the Initial Stage of a Severe Accident at the VVER-1200 RP. *Proc. of the VI-th International Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of NPP with VVER»*. Podolsk, May 26-29, 2009. Podolsk. OKB «Gidropress» Publ., 2009, pp. 71-79 (in Russian).
10. Alexandrova O.L., Barabanov R.A., Dyanov D.Yu., Kosarim S.S., Naumov A.O., Spiridonov V.F., Filimonkin E.A., Tsiberev K.V. LOGOS software package. A Finite Element Method for Calculating Problems of Static Strength of Structures Taking Account of Effects of Physical and Geometrical Nonlinearity. *VANT. Ser: Matematicheskoe Modelirovanie Fizicheskikh Processov*. 2014, iss. 3, pp. 3-17 (in Russian).
11. Klemm A.I., Polyanin L.N., Strigulin M.M. *Thermal-Hydraulic Calculation and Thermal Reliability of Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1980, 327 p. (in Russian).
12. Sledkov R.M., Stepanov O.E. Cross-Verification of the ROK2 Program for the Problem with Loss of Cooling of the VVER-1000 Main Circuit. *VANT. Ser: Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2017, iss. 1, pp. 32-36 (in Russian).
13. Sledkov R.M., Stepanov O.E., Galkin I.Yu., Strebnev N.A. Correlation analysis of the true volumetric steam content for problems with loss of cooling of the spent fuel pool. *Teploenergetika*. 2017, no. 1, pp. 20-24; DOI: <https://doi.org/10.1134/S004036361610009X>. (in Russian).
14. *Improvement of Serial Reactor Unit with VVER-1000 to Ensure Operational Safety and Reliability. Study of the Temperature Regime of the Cassette from the Simulated Fuel Elements at the Stage of Re-Fueling*. Report on Research Work (Final 341-0-044), GKAE

ОКБ «Gidropress». Podolsk. GKAE ОКБ «Gidropress» Publ., 1985, 112 p. (in Russian).

15. Research Program. DENOPI Project. Spent Fuel Pool Loss-of-Cooling and Loss-of-Cooling Accident. 2021. Available at: <https://www.irsn.fr> (accessed Jun. 10, 2021).

Authors

Sledkov Ruslan Mansurovich, Design Engineer

E-mail: sledkov@gpress.podolsk.ru

Karnaukhov Valery Evgenievich, Design Engineer, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: karnaukhov_ve@gpress.podolsk.ru

Stepanov Oleg Evgenievich, Head of Group, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: stepanov_oe@gpress.podolsk.ru

Bedretdinov Mark Matatovich, Design Engineer

E-mail: bedretdinov2013@yandex.ru

Chusov Igor Aleksandrovich, Lead Expert, Head of Resource Center, Professor, Dr. Sci.

(Engineering)

E-mail: igrch@mail.ru