

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ВАКУУМНОМ ОСУШЕНИИ КОНТЕЙНЕРОВ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

М.Б. Иванов, Я.К. Лоханский



ИВАНОВ
Михаил Борисович

Выпускник кафедры гидроаэродинамики Санкт-Петербургского политехнического университета, инженер ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» (г. Санкт-Петербург). Сфера научных интересов: математическое моделирование процессов тепломассообмена – теплогидравлика ядерных реакторов, расчеты турбулентных течений в многомерной постановке, сопряженный теплообмен при анализе технологических процессов. Автор 15 научных трудов.

Введение

В России около 16 % всей потребляемой электрической энергии вырабатывается на атомных электрических станциях (АЭС), причем в отдельных промышленно развитых регионах

эта доля достигает 30–40 %. Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) в течение достаточно длительного времени, определяемого периодом полураспада, обладает остаточной радиоактивностью, а следовательно, представляет опасность для окружающей среды.

После первоначального этапа так называемого «мокрого» хранения, который служит для



ЛОХАНСКИЙ
Ян Константинович

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника, теплотехника, гидравлика и энергетические машины» Московского государственного индустриального университета. Специалист в области экспериментальной и теоретической гидрогазодинамики, численного моделирования, компьютерных технологий инженерного анализа. Автор более 30 научных работ.

сброса сравнительно высокого уровня остаточного энерговыделения и радиоактивности, ОЯТ переводится на длительное сухое хранение, иначе называемое промежуточным. Предполагаемый срок сухого хранения составляет около 50 лет. Такой технологический цикл, обеспечивающий экологическую безопасность хранения, завершается окончательным захоронением ОЯТ в специальных «могильниках».

Одним из условий, обеспечивающих безопасность хранения ОЯТ в течение столь длительного периода, является минимальное содержание влаги в газовой среде, контактирующей с топливом. Соответствующими исследованиями установлено, что при влагосодержании менее 20 г/м^3 коррозионные процессы, приводящие к уменьшению толщины оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и далее – к их окончательному разрушению, будут идти крайне медленно, что обеспечивает сохранение их целостности на протяжении всего указанного срока.

Технология перевода ОЯТ на сухое контейнерное хранение предусматривает ряд этапов: его доставка из бассейнов выдержки в специальное помещение, разделка отработавших сборок на пучки ТВЭЛов, их загрузка в металлобетонный контейнер (МБК) и герметизация последнего. Поскольку при этих операциях не предусмотрено никаких специальных мер, препятствующих попаданию влаги в МБК с ОЯТ, одним из важнейших этапов его подготовки к длительному сухому хранению служит вакуумное осушение. Вакуумное осушение контейнера осуществляется за счет откачки парогазовой среды из внутренней полости МБК. Давление в контейнере при этом падает, находящаяся там вода вскипает вследствие понижения температуры насыщения и удаляется в виде пара.

Основными параметрами, определяющими процесс вакуумного осушения, являются степень разрежения во внутреннем объеме контейнера и время, в течение которого при существующем уровне остаточного тепловыделения ОЯТ и заданной температуре окружающе-

го воздуха влагосодержание в контейнере достигнет допустимого значения. В случае если мощности тепловыделения ОЯТ при существующей температуре окружающего воздуха окажется недостаточно для осуществления операции осушки, при заданном уровне разрежения, в приемлемые сроки необходимо также определить потребную мощность для внешнего обогрева контейнера.

Наиболее целесообразным и экономически приемлемым путем определения на первоначальном этапе проектирования оптимальных рабочих характеристик процессов, протекающих в контейнерах, и, как следствие, соответствующих требований, предъявляемых к специфическому оборудованию, представляется проведение расчетно-теоретических исследований в широком диапазоне параметров.

Теплофизические процессы, которые протекают при вакуумном осушении, весьма многообразны и характеризуются различной степенью динамики изменения параметров, иначе говоря, существенной разномасштабностью по времени. Это – конвективный, кондуктивный и лучистый теплообмен между элементами конструкции и средой, заполняющей контейнер; фазовые переходы (испарение/конденсация) воды, находящейся в полостях контейнера; перетекание парогазовой смеси между полостями и удаление ее из МБК.

В этих условиях использование для расчетов коммерческих сертифицированных пакетов (таких, как STAR-CD, FLUENT, CFX и др.) потребует колоссальных вычислительных ресурсов. Это обусловлено тем, что при моделировании рассматриваемых процессов с помощью указанных программных комплексов потребуется во всей расчетной области использовать крайне малые шаги по времени, диктуемые высокой степенью динамики межфазных процессов и малой инертностью сжимаемой среды в условиях низких давлений. В то же время процессы кондуктивного и лучистого теплопереноса отличаются значительной инерционностью. Это обстоятельство существенно затрудняет проведение серийных рас-

четных исследований, учитывая, что длительность моделируемого периода может составлять несколько суток.

В данной работе приводится описание комплексной математической модели, учитывающей разномасштабность задачи и базирующей на некоторых упрощающих допущениях, позволяющих без существенной потери точности минимизировать вычислительные затраты. С помощью программных средств, реализующих такую модель, были проведены серийные расчетные исследования, позволившие сделать выводы, практически значимые для проектирования, и обоснования условий обращения с ОЯТ при переходных режимах. Некоторые из полученных результатов представлены в настоящей работе.

Математическая модель процессов, протекающих в контейнерах с ОЯТ

МБК представляет собой цилиндрический корпус из особо прочного армированного сверхтяжелого бетона, заключенного между двумя стальными обечайками, внутри которого в специальной дистанционирующей решетке в пяти или шести гексагональных рядах располагаются цилиндрические ампулы, содержащие пучки ТВЭЛов. Каждый пучок состоит из 18 ТВЭЛов, размещенных в двух коаксиальных рядах на центральном несущем стержне. На рис. 1 приведена конструктивная схема такого контейнера, разработанная Конструкторским бюро специального машиностроения – КБСМ (г. Санкт-Петербург) [1].

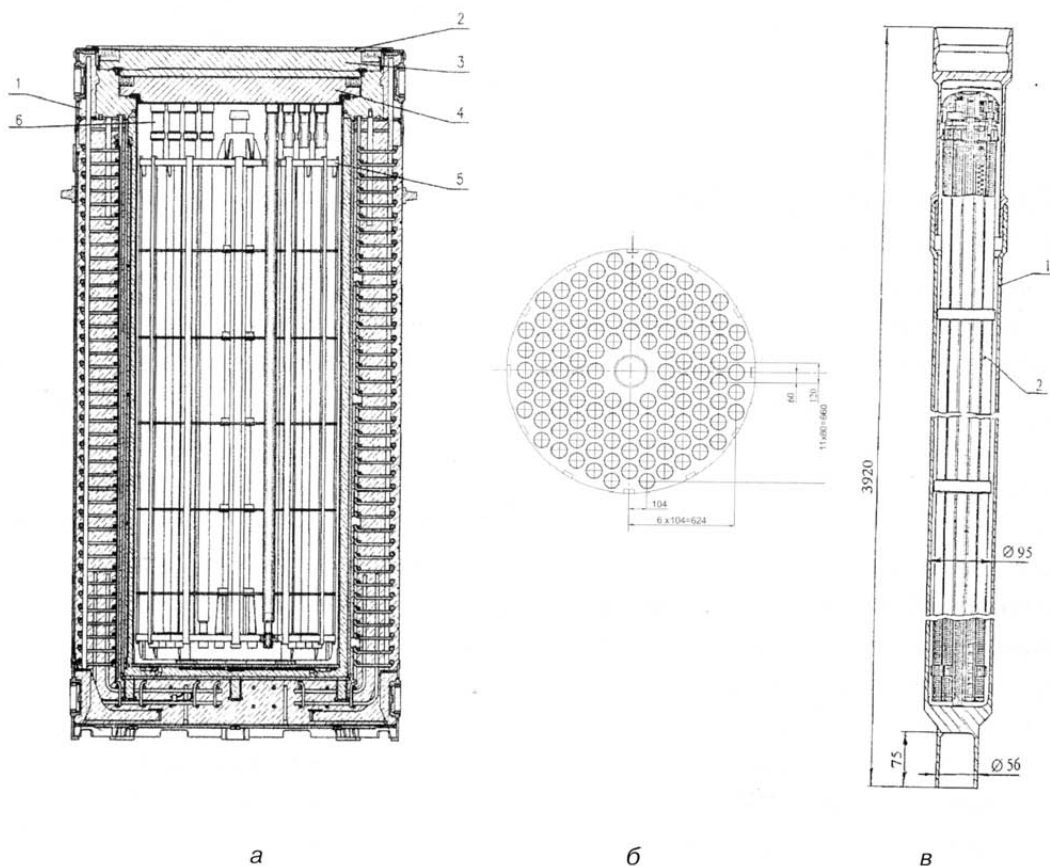


Рис. 1. Конструкция упаковочного комплекта на базе МБК:

а – контейнер; б – поперечное сечение чехла; в – ампула с пучком ТВЭЛов;

1 – МБК; 2 – герметизирующий лист; 3 – наружная крышка; 4 – внутренняя крышка; 5 – чехол (дистанционирующая решетка) УКХ-104; 6 – ампула с ОЯТ; 7 – корпус ампулы; 8 – пучок ТВЭЛов

Теплофизические условия процесса удаления остаточной влаги из внутреннего объема МБК и ампул определяются мощностью остаточного тепловыделения ТВЭЛов, степенью разрежения, создаваемого в контейнере, температурой окружающего воздуха и интенсивностью откачки парогазовой среды.

При разработке математической модели интенсивность объемного тепловыделения всех ТВЭЛов принималась одинаковой. При этом учитывалось, что в силу различного «выгорания» ТВЭЛов в период пребывания в активной зоне реактора и в топливном бассейне вследствие неоднородного пространственного распределения потока нейтронов локальная интенсивность остаточного тепловыделения q_v имеет аксиальную неравномерность, которая в рамках данной задачи моделировалась следующей зависимостью:

$$q_v(z) = q_{v0} k_z(z); \quad (1)$$

$$q_{v0} = \frac{\int_0^H q_v(z) dz}{H},$$

где q_{v0} – среднеинтегральное значение интенсивности объемного тепловыделения ТВЭЛа; z – координата вдоль оси ТВЭЛа; H – высота ТВЭЛа; k_z – коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте ТВЭЛа (задается на основе результатов анализа нейтронно-физических процессов в отработавшем топливе и вводится в качестве исходных данных для программы).

В рамках данной модели были приняты следующие допущения:

температуры ТВЭЛов в каждом из двух концентрических рядов внутри ампулы и поля температур в ампулах, расположенных в одном гексагональном ряду, одинаковые (определялись путем осреднения для всех ампул, составляющих сторону шестигранника), вследствие чего параметры среды во внутренних объемах ампул одного ряда также будут одинаковыми; ввиду относительно невысоких тепловыделений ОЯТ, а также малых диаметров ТВЭЛов и ампул можно пренебречь окружающей неравномерностью температуры в них;

поля температур во всех рассматриваемых телах определяются в рамках осесимметричной постановки.

Контейнер, заполненный ампулами с ОЯТ, рассматривается как следующая система тел: корпус контейнера с системой крышек; чехол МБК; корпуса ампул с ТВЭЛами (см. рис. 1).

Уравнение нестационарной теплопроводности во всех рассматриваемых телах

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{grad } T) + q_v \quad (2)$$

записывается в цилиндрической системе координат с граничными условиями

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} q_w, S_1 \in S \\ \alpha (T - T_\infty), S_2 \in S \end{cases}$$

$$S_1 \cup S_2 \neq \emptyset \quad T|_{t=0} = T_0(r, z), \quad (3)$$

где ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; T – абсолютная температура; λ – коэффициент теплопроводности; q_w – плотность теплового потока на стенке; α – коэффициент теплоотдачи; S – граница расчетной области.

Лучистый теплообмен во внутреннем объеме контейнера моделируется с помощью зонального метода [3, 4], основная идея которого состоит в замене непрерывного распределения температур и оптических характеристик поверхностей дискретным. Как показали расчетные оценки, для данной задачи можно считать, что газовая среда прозрачна для теплового излучения. Для упрощения задачи не учитывалось взаимное облучение боковых и торцевых поверхностей и предполагалось, что радиационные тепловые потоки с боковых поверхностей распространяются только в направлении нормали. Плотности результирующих тепловых потоков излучения $q_{\text{рез}}$ для каждого дискретного участка поверхности являются граничными условиями (3) для уравнения теплопроводности (2). В рамках данной модели весь рассматриваемый объект (контейнер с содержащимися в нем ампулами, ТВЭЛами и др.) разбивался по горизонтали на слои таким образом, что температуру поверхности в пределах каждого слоя можно было считать постоянной.

Боковые поверхности для такого слоя в рамках зонального метода можно рассматривать как плоскую замкнутую систему из n излучающих серых тел. Плотность потока результирующего излучения для i -го тела находится из решения системы n линейных уравнений:

$$q_{i\text{рез}} = \varepsilon_i \cdot \sigma_0 \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \cdot (T_k^4 - T_i^4) \cdot \Phi_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где ε – степень черноты (излучательная способность) поверхности тела с номером i или k ; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; k – номер одного из n тел, входящих в систему (в том числе $k = i$); Φ_{ik} – разрешающие угловые коэффициенты между телами i и k , учитывающие многократное отражение потоков излучения от всех поверхностей системы.

Величины разрешающих угловых коэффициентов Φ_{ik} определялись из решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\Phi_{ik} = \Phi_{ik} + \sum_{j=1}^n (1 - \varepsilon_j) \cdot \Phi_{ij} \cdot \Phi_{jk},$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где Φ_{ij} – угловые коэффициенты излучения между телами i и j (или k) в данной системе тел, определяемые только их взаимным расположением и геометрическими характеристиками (в предположении, что все тела абсолютно черные).

Значения угловых коэффициентов Φ_{ij} для всех боковых поверхностей во внутренних объемах контейнера и ампул получены аналитически с помощью метода натянутых нитей [3].

Для торцевых поверхностей результирующие тепловые потоки рассчитывались для пары тел, произвольно ориентированных в пространстве [3], с учетом взаимного переоблучения через приведенную степень черноты $\varepsilon_{пр}$:

$$q_{1,2\text{рез}} = \sigma_0 \varepsilon_{пр} (T_2^4 - T_1^4) \Phi_{1,2}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{1 + \Phi_{1,2} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \Phi_{2,1} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где ε_1 и ε_2 – степени черноты 1-й и 2-й поверхностей.

Для определения угловых коэффициентов $\Phi_{1,2}$ и $\Phi_{2,1}$ использовались справочные соотношения [3].

Строго говоря, такие пары торцевых поверхностей не являются замкнутыми системами, однако для них угловые коэффициенты $\Phi_{1,2}$ в условиях данной задачи были близки к 1 (например, между торцом ТВЭЛа и дном ампулы) и поэтому такая методика расчета вполне оправдана.

Задача тепломассопереноса в полости контейнера решалась в сосредоточенных параметрах. Схема расчета динамики изменения параметров парогазовой и жидкой среды в контейнере и ампулах представлена на рис. 2. Эта математическая модель разработана на основе известной идеологии [5] применительно к условиям данной задачи.

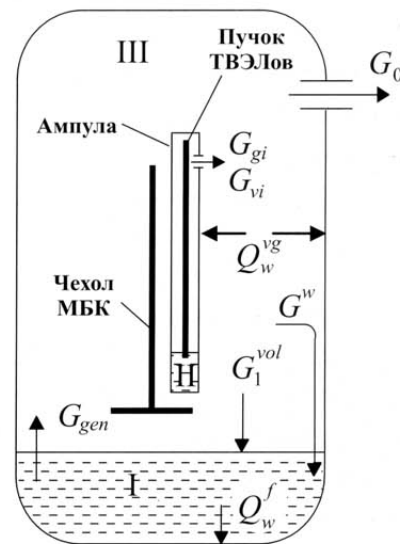


Рис. 2. Расчетная схема параметров среды во внутреннем объеме контейнера:

I, II – водяные объемы контейнера и ампулы соответственно; III – парогазовый объем контейнера; Q_w^{vg} , Q_w^f – суммарные тепловые потоки к стенке от парогазовой и жидкой сред соответственно; G_0 – объемный расход парогазовой среды на выходе из контейнера, задаваемый в качестве граничного условия или рассчитываемый по перепаду давлений внутри и вне контейнера; G_{vi} , G_{gi} – расходы пара и газа соответственно, поступающие из i -й ампулы в контейнер; G_{gen} – интенсивность генерации пара в водяном объеме; G^w – интенсивность конденсации пара из парогазового объема на стенке контейнера; G_1^{vol} – интенсивность конденсации пара

При описании процессов тепломассопереноса в многокомпонентной среде при наличии неконденсируемой компоненты использовались следующие допущения:

- пар в парогазовом объеме может быть перегретым и насыщенным;
- вода в водяном объеме может быть недогретой и насыщенной;
- не учитывалась капельная составляющая жидкой фазы в среде контейнера;
- учитывались объемная и поверхностная конденсация на стенках корпуса и элементах конструкции контейнера.

Парциальные давления пара p_v и газа p_g в объеме III подчиняются закону Дальтона:

$$p = p_v + p_g, \quad (8)$$

где p – полное давление.

Параметры воды, пара и газа определяют уравнениями состояния:

$$\rho_f = f(i_f, p); \rho_v = f(T_{vg}, p_v); \rho_g = f(T_{vg}, p_g), \quad (9)$$

где ρ_f, ρ_v, ρ_g – плотности воды, пара и газа соответственно; i_f – массовая энтальпия воды; T_{vg} – температура парогазовой смеси в МБК.

Неконденсируемый газ (в данном случае воздух) предполагается идеальным, а для определения термодинамических параметров и свойств воды и водяного пара используются табличные значения [6].

На основе законов сохранения массы и энергии для водяного I и парогазового III объемов, а также уравнений состояния (9), дифференцированных по времени, была получена следующая система дифференциальных уравнений для расчета параметров среды:

– для водяного объема контейнера

$$\frac{dm_f}{dt} = -G_{gen} + G^w + G^{vol}, \quad (10)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{m_f} [G_{gen} (i'' - i_f) + G^w (i_1' - i_f) + G^{vol} (i_2' - i_f) - Q_w], \quad (11)$$

где m_f – суммарная масса воды в контейнере; $i'' = i''(p)$ – энтальпия насыщения при полном давлении p в контейнере; $i_1' = i'(p_v)$ – энтальпия насыщения воды при парциальном давлении пара; $i_2' = i'(T_{vg})$ – энтальпия насыщения воды при температуре T_{vg} ;

– для парогазовой смеси

$$\frac{dm_v}{dt} = A = \sum_{i=1}^n G_{vi}^a + G_{gen} - G^w - G^{vol} - G_v^0; \quad (12)$$

$$\frac{dm_g}{dt} = B = \sum_{i=1}^n G_{gi}^a - G_g^0; \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} (m_v \cdot i_v + m_g \cdot i_g) - V_3 \frac{dp}{dt} = C = \sum_{i=1}^n G_{vi}^a \cdot i_{vi}^a + \sum_{i=1}^n G_{gi}^a \cdot i_{gi}^a - G^w \cdot i_1' - Q_w^{vg} + G_{gen} \cdot i'' - G^{vol} \cdot i_2' - G_v^0 \cdot i_v - G_g^0 \cdot i_g; \quad (14)$$

$$\frac{dT_{vg}}{dt} = \frac{C + \left(A \frac{\partial p_v}{\partial p_v} \right) + \left(B \frac{\partial p_g}{\partial p_g} \right) - \frac{-A \cdot i_v - B \cdot i_g}{m_v \cdot c_{pv} + m_g \cdot c_{pg} + V_3 \left(\left(\frac{\partial p_v}{\partial T_{vg}} \right) / \left(\frac{\partial p_v}{\partial p_v} \right) + \left(\frac{\partial p_g}{\partial T_{vg}} \right) / \left(\frac{\partial p_g}{\partial p_g} \right) \right)}}{m_v \cdot c_{pv} + m_g \cdot c_{pg} + V_3 \left(\left(\frac{\partial p_v}{\partial T_{vg}} \right) / \left(\frac{\partial p_v}{\partial p_v} \right) + \left(\frac{\partial p_g}{\partial T_{vg}} \right) / \left(\frac{\partial p_g}{\partial p_g} \right) \right)}; \quad (15)$$

$$\frac{dp_v}{dt} = \left(\frac{1}{V_3} A - \frac{\partial p_v}{\partial T_{vg}} \cdot \frac{dT_{vg}}{dt} \right) / \frac{\partial p_v}{\partial p_v}; \quad (16)$$

$$\frac{dp_g}{dt} = \left(\frac{1}{V_3} B - \frac{\partial p_g}{\partial T_{vg}} \cdot \frac{dT_{vg}}{dt} \right) / \frac{\partial p_g}{\partial p_g}; \quad (17)$$

$$G_v^0 = G_{0p_v}(T_{vg}, p_v); G_g^0 = G_{0p_g}(T_{vg}, p_g),$$

где m_v, m_g – суммарные массы газа и пара в объеме контейнера соответственно; i_v, i_g – энтальпии пара и газа соответственно; G_v^0, G_g^0 – массовые расходы пара и газа на выходе из контейнера соответственно, определяемые с помощью уравнений состояния по граничному условию G_0 ; V_3 – объем парогазовой смеси; C – суммарное (для всей массы в объеме) изменение энтальпии пара и газа; i_{vi}^a, i_{gi}^a – энтальпии пара и газа соответственно, поступающего из i -й ампулы во внутреннее пространство контейнера; c_{pv}, c_{pg} – удельные теплоемкости пара и газа соответственно; t – время.

Аналогичным образом была получена система уравнений баланса массы и энергии для парогазовой и жидкой сред в каждой ампуле, которые в данной модели могут быть реализованы в двух вариантах: либо в упрощенном – в предположении, что давление парогазовой среды во всех ампулах равно давлению в контейнере; либо в полном, где система уравнений идентична соотношениям, полученным для контейнера. При необходимости могут быть учте-

ны гидравлические сопротивления выходных участков контейнера и ампулы для расчета массовых расходов истечения среды (G_v^0 , G_g^0 , G_{vi}^a через G_0) из их внутренних объемов и потерь давления на этих элементах.

Для получения замкнутой системы уравнений и описания конвективного теплообмена с внутренней средой контейнера и окружающей средой использовались эмпирические зависимости для естественно-конвективных течений на вертикальных и горизонтальных поверхностях [7–10]. Для расчета межфазного тепломассообмена применялись известные корреляции по пузырьковому кипению [11, 12] и поверхностной конденсации [13].

При определении расхода парогазовой среды на выходе из контейнера или ампулы гидравлическое сопротивление H_r некоторого участка канала определялось на основе принципа суперпозиции

$$H_r = \sum_{i=1}^m \xi_{mi} \cdot \frac{\rho W_i^2}{2} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \frac{l_j}{D_{rj}} \cdot \frac{\rho W_j^2}{2}, \quad (18)$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n,$

где ξ_{mi} и W_i – коэффициент местных гидравлических потерь и средняя скорость среды в i -м элементе рассматриваемого канала соответственно; λ_j и W_j – коэффициент гидравлического трения и средняя скорость в j -м участке канала соответственно; l_j и D_{rj} – длина и гидравлический диаметр j -го участка канала соответственно; m – число участков местного сопротивления; n – число участков сопротивления трения в каналах.

Вычислительный алгоритм и структура программного комплекса

Для решения задачи нестационарной теплопроводности в элементах конструкции и топливе используется метод конечных элементов (МКЭ) [14], характеризующийся удобством его применения для областей, имеющих сложную форму и неоднородные физические свойства. В данной модификации используются Лагранжевы биквадратичные четырехугольные эле-

менты, обеспечивающие пространственную точность не ниже 3-го порядка во всей расчетной области.

Вычислительный алгоритм, реализующий представленную математическую модель, организован таким образом, что анализ рассматриваемых процессов разбит на отдельные составляющие в соответствии с механизмами переноса тепла и массы. Основная особенность данного алгоритма состоит в использовании различных временных шагов для анализа малоинерционных (изменение параметров среды) и относительно вялотекущих процессов (теплопроводность и лучистый теплообмен). Связь между моделями физических процессов осуществляется с помощью специально организованной процедуры через граничные условия (3) для задачи теплопроводности: плотность теплового потока q_w на каждом участке поверхности (в соответствии с конечно-элементным дроблением) определяется как сумма плотностей лучистого теплового потока и осредненной в пределах «большого» временного шага Δt плотности теплового потока q_w^{vg} , определяемой теплообменом с парогазовой средой на каждом «малом» шаге $\Delta' t$:

$$q_w = q_{i \text{ рез}} + \frac{1}{\Delta t} \sum_{n_i=1}^{N_t} \Delta' t \cdot (q_w^{vg})_{n_i}; \quad (19)$$

$\Delta t = N_t \cdot \Delta' t,$

где N_t – соотношение временных шагов.

При этом в рамках численной процедуры соблюдается условие интегрального теплового баланса. Соотношение между шагами подбиралось с помощью численных экспериментов.

Для дискретизации по времени используется схема Кранка-Николсона второго порядка точности. Все матричные операции в рамках МКЭ осуществляются с помощью техники разреженных матриц, учитывающих только ненулевые элементы [15]. Система линейных уравнений решается с помощью оксфордской версии [16] известного пакета MA28 разработки Харуэллского вычислительного центра, являющегося одним из лучших мировых программных продуктов данного класса. Этот пакет ис-

пользует метод исключения Гаусса с применением обобщенной стратегии Марковица, которая основана на ограничении роста главного элемента по заданному пороговому критерию.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (10)–(17) совместно с подобными системами для всех рассматриваемых ампул, описывающих динамику изменения параметров среды, решается по явной схеме с использованием процедур типа предиктор-корректор для расчета интенсивности генерации пара G_{gen} и объемной конденсации G^{vol} . Свойства воды и водяного пара, включая производные, рассчитываются с помощью специализированных программных средств, разработанных в Научно-исследовательском технологическом институте им. А.П. Александрова (НИТИ), использующих табличные значения [6] и линейную интерполяцию в интервалах между точками.

Системы линейных уравнений (4) и (5) для расчета разрешающих угловых коэффициентов Φ_{ik} и результирующих лучистых тепловых пото-

ков $q_{i\text{рез}}$ также решаются с помощью пакета МА28.

На основе вычислительного алгоритма был разработан программный комплекс (рис. 3), который позволяет вести сквозной расчет процессов тепломассопереноса, начиная с момента герметизации контейнера и заканчивая его вакуумным осушением. Одним из важнейших практических качеств этой программы является ее вычислительная эффективность, достигнутая благодаря применению различных временных шагов интегрирования, что позволяет моделировать рассматриваемые процессы в реальном масштабе времени.

Вычислительный процесс организован следующим образом. Сначала осуществляется ввод исходных данных: период выдержки герметичного контейнера с ОЯТ (этап предварительного разогрева до начала вакуумирования), температура окружающего воздуха, уровень давления разрежения, создаваемого в контейнере, расход среды (или давление) на выходе

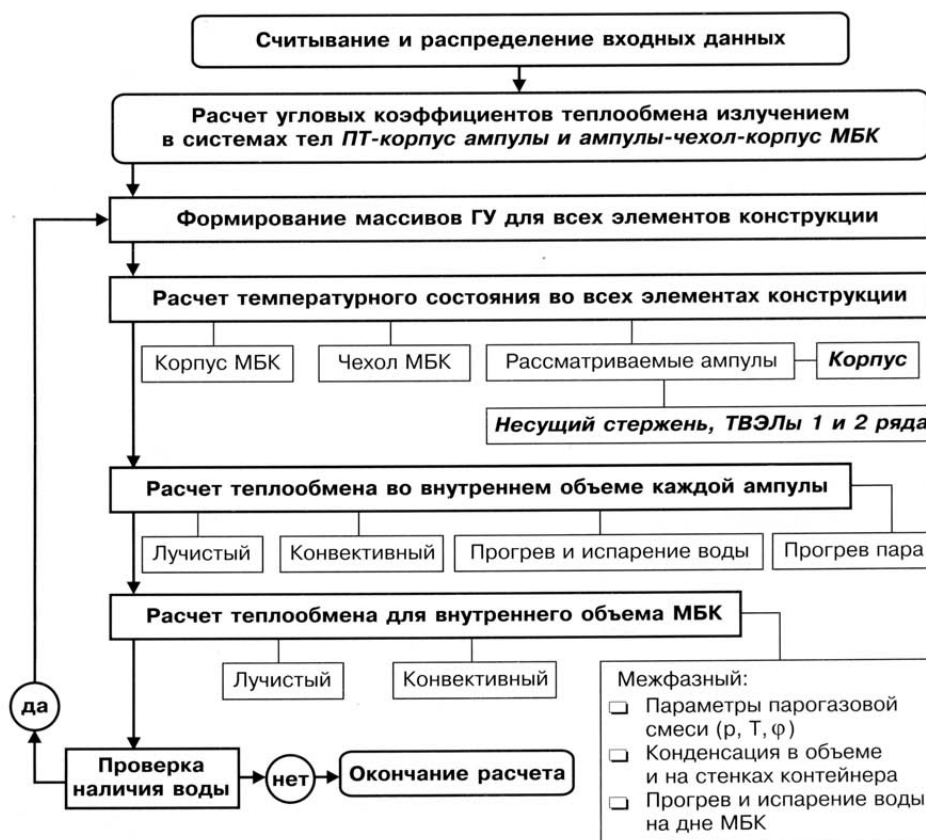


Рис. 3. Структурная схема вычислительной программы

из МБК. Затем на каждом «большом» (интегральном) временном шаге формируются граничные условия (ГУ) по лучистому и конвективному теплообмену. Для ТВЭЛов и элементов конструкции МБК (корпус, дистанционирующие решетки, ампулы) решается задача нестационарной теплопроводности. Для определения параметров парогазовой среды, воды в контейнере и ампулах в рамках интегрального интервала на малых временных шагах численно решаются уравнения теплового баланса.

Вычисления прекращаются по условию отсутствия воды на дне контейнера и в каждой из ампул.

Формат вывода результатов расчетов адаптирован к пакетам графической обработки Grapher и Tecplot.

Верификация программного комплекса и результаты расчетов

Модули разработанного программного комплекса были оттестированы на классических задачах, имеющих аналитические решения. В частности, рассматривались задачи об адиабатическом расширении идеального газа, об охлаждении цилиндра конечных размеров с граничными условиями третьего рода, об охлаждении неограниченного цилиндра с равномерным объемным выделением.

Для верификации программного комплекса использовались следующие данные:

результаты экспериментальных исследований ЦКТИ по распределению температур по сечению модели, состоящей из 127-ми электрообогреваемых трубок, расположенных в кожухе по гексагональной решетке с шагом $s = 13,4$ мм, при обеспечении постоянной температуры кожуха водяной «рубашкой» охлаждения и их расчетного анализа с использованием методик, основанных на модели эффективной теплопроводности [17];

результаты расчетов температурных режимов упаковочных комплектов УКХ-104 и УКХ-109 при длительном сухом хранении,

проведенные КБСМ для сечения с максимальными температурами с использованием методик, основанных на модели теплового баланса и модели «эффективной проводимости»;

результаты экспериментов по вакуумному осушению модели одиночной ампулы с пучком ТВЭЛов, проведенных в НИТИ [18].

На рис. 4 представлено сопоставление расчетных данных, полученных с помощью разработанного программного комплекса, с данными ЦКТИ и КБСМ.

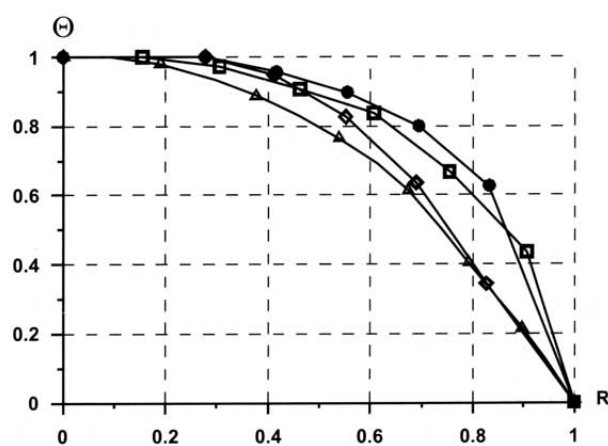


Рис. 4. Распределение безразмерной температуры в максимally прогретом сечении по безразмерному радиусу:

- эксперимент ЦКТИ;
- расчет по предложенной методике;
- ◆— расчет КБСМ; —▲— расчет ЦКТИ

Результаты приведены в безразмерном виде. По оси абсцисс отложен безразмерный радиус контейнера

$$R = \frac{r}{R_{\text{вн}}},$$

где r – текущий радиус, $R_{\text{вн}}$ – внутренний радиус контейнера. По оси ординат отложено безразмерное значение температуры

$$\theta = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}},$$

где T – текущее значение температуры, $T_{\min}$ и $T_{\max}$ – соответственно ее минимальное и максимальное значения.

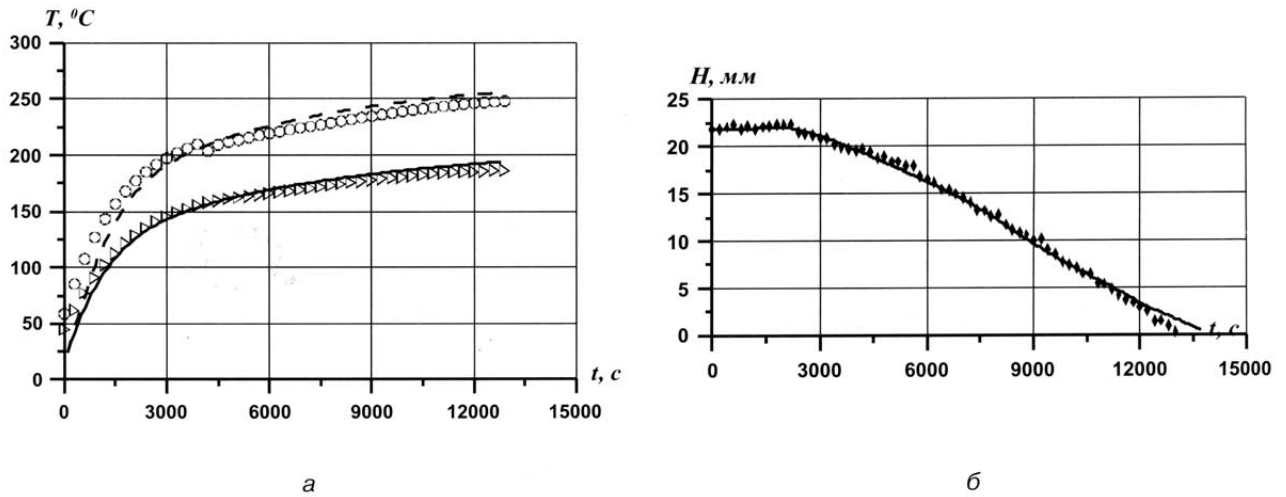


Рис. 5. Зависимости расчетных и экспериментальных данных по осушению модели одиночной ампулы с пучком ТВЭЛов: а – температуры на оси имитатора ТВЭЛа в точках расположения термодпар на высотах: $\circ$ – 209 мм, эксперимент; — — — — — 209 мм, расчет; $\triangleright$ – 490 мм, эксперимент; — — — — — 490 мм, расчет; б – уровни воды в имитаторе ампулы: $\blacklozenge$ – эксперимент; — — — — — расчет

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов для одного из экспериментов НИТИ (мощность нагревателя 67,2 Вт; температура окружающего воздуха 18°C ; давление в ампуле 4–6 кПа) приведено на рис. 5.

В этом случае основным интегральным параметром верификации являлось изменение во времени уровня воды в имитаторе ампулы с пучком ТВЭЛов при низком давлении.

В ходе верификации было продемонстрировано достаточно хорошее совпадение результатов расчетов, полученных с помощью рассматриваемого программного комплекса, с опытными данными. Кроме того, выявлено некоторое преимущество в точности полученных результатов по сравнению с расчетами, основанными на моделях, использующих более жесткие допущения, такие, как эффективную теплопроводность и методику теплового баланса.

С помощью разработанного программного комплекса были проведены серийные расчетные исследования процессов теплообмена в контейнерах УКХ-104 и УКХ-109 при вакуумном осушении применительно к технологическому регламенту для Ленинградской АЭС. Расчеты моделировали осушение полностью загруженного контейнера, который разогревался в течение 24 ч в герметично закрытом

состоянии; затем откачали среду из контейнера до заданного давления, далее оно поддерживалось до полного испарения воды в контейнере и ампулах. Количество воды задавалось из расчета 0,25 кг в ампуле и 2 кг во внутренней полости контейнера. Остаточное тепловыделение варьировалось в диапазоне 3–6,3 кВт в соответствии с типом конструкции УКХ и длительностью выдержки ОЯТ. Максимальное значение коэффициента неравномерности тепловыделения по высоте k_z (см. соотношение (1)) составило 1,15 с учетом времени выдержки ОЯТ в водной среде.

В качестве иллюстрации на рис. 6 и 7 представлены динамика изменения параметров среды в контейнере УКХ-104 с ОЯТ 10-летней выдержки (суммарное тепловыделение 5 кВт/контейнер) реактора РБМК-1000 и распределения температур топлива и корпуса МБК на момент окончания процесса осушки для двух режимов. Режиму 1 соответствуют температура окружающего воздуха $+38^{\circ}\text{C}$, поддерживаемый диапазон давлений в контейнере 4–10 кПа; режиму 2 – температура воздуха в помещении осушки $+5^{\circ}\text{C}$, диапазон давлений 2–2,1 кПа. Как показали расчеты, в последнем случае тепла, выделяемого ОЯТ, оказывается недостаточно для испарения воды из ампул, так как из-за

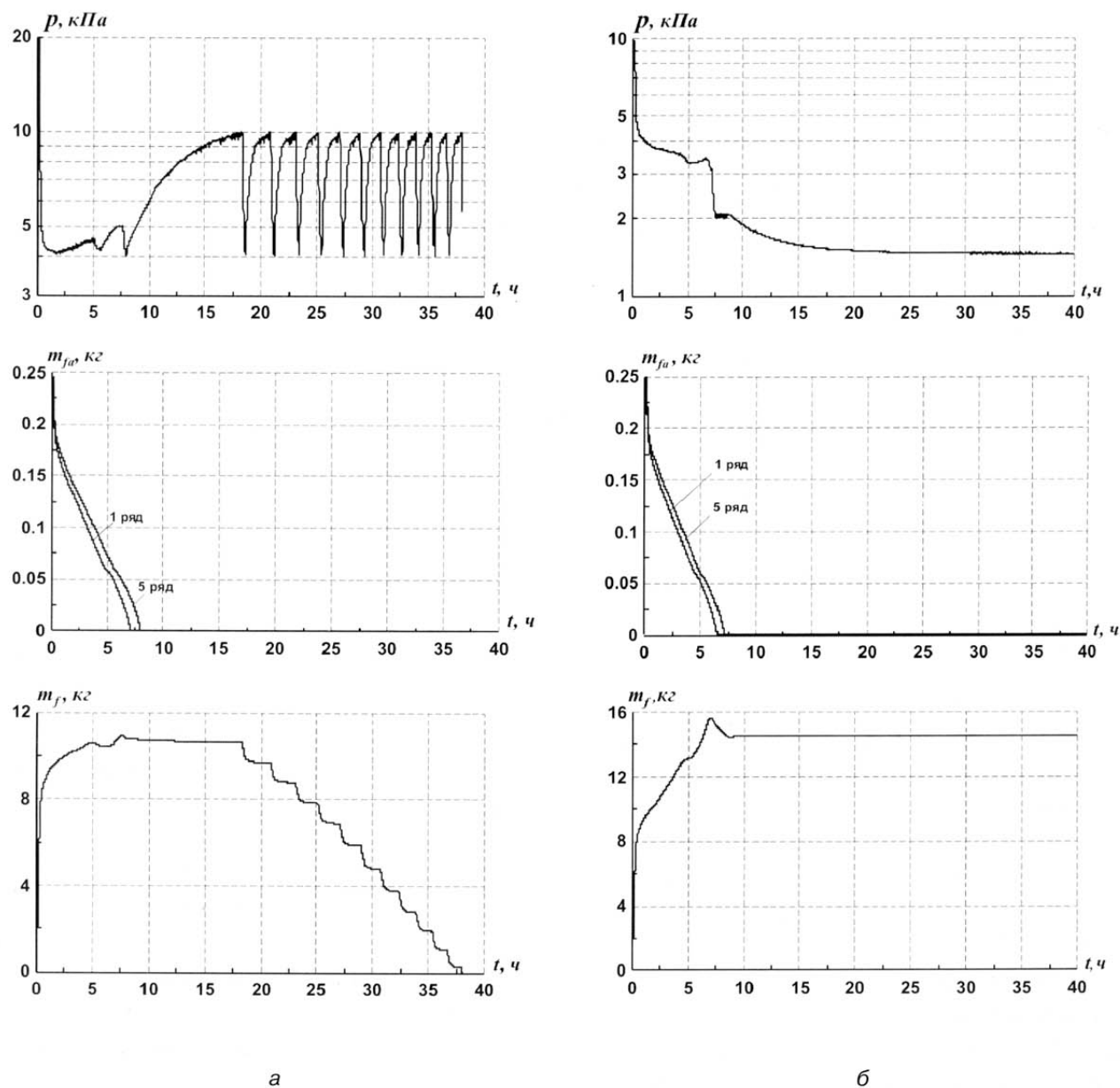


Рис. 6. Изменение параметров среды при вакуумном осушении контейнера УКХ-104 с ОЯТ 10-летней выдержки: а – режим 1; б – режим 2: p – давление в контейнере; m_{fa} – масса воды в ампулах; m_f – масса воды в контейнере

охлаждения контейнера наружным воздухом в его внутренней полости образуется конденсат, и процесс осушки становится нереализуемым.

В целом, проведенные исследования показали, что для обеспечения физической реализуемости вакуумного осушения для указанных типов контейнеров при существующих уровнях тепловыделения ОЯТ во всем диапазоне температур воздуха в помещении осушки (от +5 до +35 °С) и достижения требуемо-

го остаточного содержания влаги необходимо создание давления разрежения не более 1 кПа. При этом расчетная длительность технологического процесса (при отсутствии остановок оборудования) составила не более двух суток.

Заключение

Разработанная комплексная математическая модель позволяет с достаточной для инже-

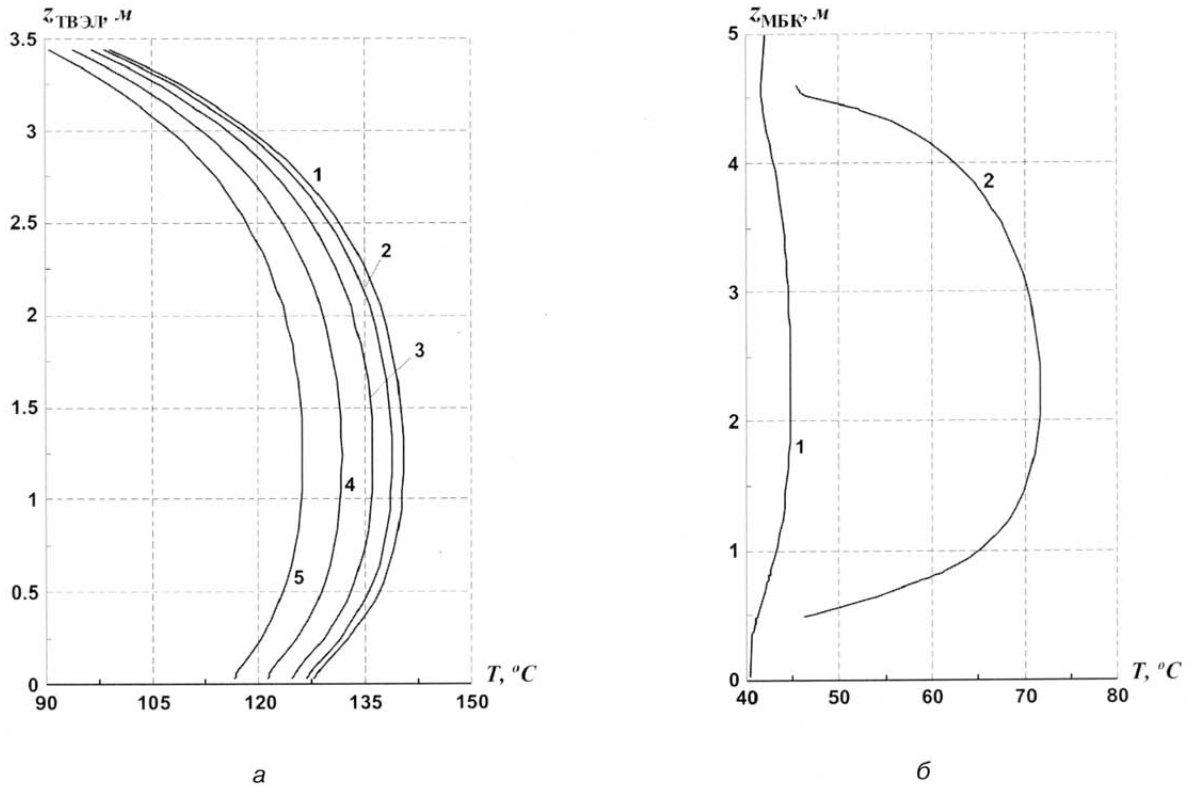


Рис. 7. Координатно-температурные зависимости для топлива и корпуса МБК на момент окончания процесса осушения (режим 1): $z_{ТВЭЛ}$, $z_{МБК}$ – координаты по осям ТВЭЛов и МБК соответственно; а – температуры ТВЭЛов: 1–5 – номера ТВЭЛов в зависимости от ряда ампул по мере удаления от центра; б – температуры боковой стенки контейнера: 1 – внешняя поверхность; 2 – внутренняя поверхность

нерных расчетов точно описывать процессы тепломассообмена в контейнерах с ОЯТ в условиях вакуумного осушения. На базе данной модели создан специализированный программный комплекс, характеризующийся вычислительной эффективностью, обеспечивающей проведение серийных расчетов в приемлемые для практики сроки при разработке соответствующей проектной документации.

С помощью данных программных средств были проведены расчетные исследования применительно к технологическому регламенту для Ленинградской АЭС в широком диапазоне параметров, при этом получены практически значимые результаты, которые были использованы для внесения изменений в проектную документацию и для обоснования переходных режимов при обращении с ОЯТ реактора РБМК-1000.

Список литературы

1. Гуськов В.Д. Опыт создания Российских двухцелевых упаковочных комплектов на основе металлобетонных контейнеров // Материалы 3-й Межд. конф. «Радиационная безопасность: транспортирование радиоактивных материалов», 31 окт.-4 нояб. СПб., 2000 г. С. 111–114.
2. Стерман Л.С., Лавыгин В.М., Тишин С.Г. Тепловые и атомные электрические станции: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 424 с.
3. Блох А.Г. и др. Теплообмен излучением. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1985. – 479 с.
5. Плютинский В.И., Охотин В.В. Моделирование неравновесных процессов в компен-

- саторе объема для использования в тренажерных установках // В сб. статей «Атомные электрические станции». – М.: Энергоатомиздат, вып. 6, 1983. С. 15–22.
6. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
7. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
8. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 434 с.
9. Кейхани М., Кулаки Ф.А., Христенсен Р.Н. Свободная конвекция в вертикальном кольцевом канале с постоянной плотностью теплового потока на внутренней стенке / Труды Амер. о-ва инж.-мех. // Теплопередача. 1983. № 3. Т. 105. С. 31–37.
10. Кейхани М., Куляцкий Ф.А., Христенсен Р.Н. Экспериментальное исследование свободной конвекции в вертикальной сборке стержней (общая корреляция для числа Нуссельта) / Труды Амер. о-ва инж.-мех. // Теплопередача. 1985. № 3. Т. 107. С. 100–113.
11. Лабунцов Д.А. Обобщенные зависимости для теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1960. № 5. С. 76–81.
12. Лабунцов Д.А. Обобщенные зависимости для критических тепловых нагрузок при кипении жидкостей в условиях свободного движения // Теплоэнергетика. 1960. № 7. С. 76–80.
13. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 417 с.
14. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости. Т. 1, 2. – М.: Мир, 1991. Т.1. – 504 с. Т. 2. – 552 с.
15. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. – М.: Мир, 1988. – 412 с.
16. NAG Library Fortran Manual, Mark 7, Vol. 3-4, England, Oxford, Banbury Road, Numerical Algorithms Group, 1979. – 468 p.
17. Фромзель В.Н., Фромзель Л.В., Вдовец Н.В. Методика определения эффективной теплопроводности сборки ТВЭЛов и расчет температурного поля в сборках, размещенных в вертикальных контейнерах // В сб. «Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640». – СПб, 1997. С. 139–150.
18. Иванов М.Б., Иванова В.О., Ефимов В.К., Черный О.Д. Разработка программного комплекса для расчета температурного состояния контейнера с ОЯТ в период подготовки к длительному хранению // Межд. конф. «Радиационная безопасность: транспортирование радиоактивных материалов», 31 окт.–4 нояб. СПб, 2000. С. 59–61.