

# ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039.58.00157

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-21-28

## Оценка точности моделирования на основе двухзонного подхода для анализа пожарной безопасности объектов ядерной энергетики

Ю.Б. Воробьев, Д.С. Уртенев, В.Е. Карнаухов, В.Н. Подгорный, Ю.Н. Эйхорн, М.Л. Лукашенко

Проанализирована возможность использования двухзонной модели для моделирования пожаров на объектах ядерной энергетики, в частности, на транспортабельных ядерных энергетических установках (ТЯЭУ), таких как плавучий энергоблок (ПЭБ).

Для учета неопределенностей параметров проведения множества расчетов, а также в случае возникновения пожарной ситуации специфика ТЯЭУ требует быстрой оценки и выдачи правильных рекомендаций с целью предотвращения опасных последствий. Для этого нужна экспресс-методика. Выделены основные характеристики данных установок: компактные помещения, возможность отсутствия вентиляции, разноуровневое расположение объектов, существенная роль теплопроводности между помещениями.

Изучены существующие мировые направления моделирования пожаров и сделан вывод, что использование двухзонного моделирования дает требуемый компромисс между точностью и скоростью расчетов. Для практических целей предложено адаптировать существующий опыт зонного моделирования на основе разработки кода ПАБМТ (пожары, анализ безопасности, морской транспорт). С целью оценки точности кода выполнено сравнение двухзонного моделирования с результатами экспериментов и расчетами по коду расчетной гидродинамики (CFD). Рассмотрены случаи, близкие по характеристикам к условиям ТЯЭУ: пожары в комнате, цилиндрическом помещении и технологических помещениях ПЭБ. Для оценки точности использованы параметры температуры верхнего слоя горячих газов, давления и концентрации кислорода. Полученные результаты показывают, что оценка относительной разницы для кода ПАБМТ хорошо согласуется с другими работами и код может быть использован в качестве основы для экспресс-оценок пожарной ситуации на ТЯЭУ.

*Ключевые слова:* двухзонное моделирование, безопасность транспортабельных ядерных энергетических установок, пожары на ядерных объектах.

*Для цитирования:* Воробьев Ю.Б., Уртенев Д.С., Карнаухов В.Е., Подгорный В.Н., Эйхорн Ю.Н., Лукашенко М.Л. Оценка точности моделирования на основе двухзонного подхода для анализа пожарной безопасности объектов ядерной энергетики // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 21—28. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-21-28.

## About the Accuracy of Modeling Based on the Two-Zone Approach for Analyzing the Fire Safety of Nuclear Power Facilities

Yu.B. Vorobyev, D.S. Urtenov, V.E. Karnaukhov, V.N. Podgornyi, Yu.N. Eikhorn, M.L. Lukashenko

The possibility of using a two-zone model for simulating fires at nuclear power facilities in particular, at transportable nuclear power plants (TNPP), such as a floating nuclear power unit (FNPU), is considered.

For taking into account the uncertainty of parameters used in carrying out numerous calculations, and also when a fire breakout occurs, the specifics of a TNPP involves the need to perform fast assessment and produce correct recommendations to prevent the occurrence of hazardous effects. For this purpose, an express procedure is needed. The main characteristics of TNPPs are pointed out, namely, that they are accommodated in compact compartments, in which lack of ventilation is possible; that the plant components can be arranged at different height elevations, and that heat conduction between different compartments may play an essential role.

The fire modeling approaches existing around the world are analyzed, and a conclusion is drawn that the use of two-zone modeling can provide the required compromise between accuracy and speed of calculations. For practical purposes, it is proposed to adapt the existing experience with two-zone

modeling based of developing the PABMT code (fires, safety analysis, and maritime transport). To estimate the code accuracy, the two-zone modeling results are compared with the results of experiments and calculations carried out using a computational fluid dynamics (CFD) code. Cases close in characteristics to the TNPP conditions are considered: fire breakouts in a room, in a cylindrical compartment, and in the FNPU process compartments. For the accuracy estimation purposes, the following parameters were used: the hot gas upper layer temperature, pressure, and oxygen concentration. The obtained results show that the estimation of relative difference for the PABMT code is in good agreement with other studies, and that the code can be used as a basis for making express assessments of fire conditions at a TNPP.

*Key words:* two-zone modeling, safety of transportable nuclear power plants, fires at nuclear facilities.

*For citation:* Vorobyev Yu.B., Urtenov D.S., Karnaukhov V.E., Podgornyi V.N., Eikhorn Yu.N., Lukashenko M.L. About the Accuracy of Modeling Based on the Two-Zone Approach for Analyzing the Fire Safety of Nuclear Power Facilities. Bulletin of MPEI. 2019;2:21—28. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-21-28.

## Введение

При анализе безопасности объектов ядерной энергетики существенное внимание уделяется анализу возможностей различного рода возгораний и возникающих в связи с этим проблем в общей ситуации с безопасностью. Пожары представляют опасность по воздействию на персонал, могут способствовать распространению продуктов радиации, усугублять протекание аварии и т. д., поэтому крайне важно уметь прогнозировать характеристики процессов горения, возможность его распространения, перенос продуктов горения и оценивать опасность от поражающих факторов. Исследования усложняются при изучении пожаров на судах и других плавсредствах с ядерными реакторами, таких как судовые ЯЭУ или плавучий энергоблок (ПЭБ) [1]. В отличие от стационарных аналогов пожарная ситуация на плавучем энергоблоке в процессе ее транспортировки не позволяет легко эвакуировать обслуживающий персонал, обеспечить внешними средствами пожаротушения. Также своя специфика заключается в более компактном размещении оборудования и, следовательно, представления сценария пожара, распространяющегося по множеству относительно небольших, по сравнению с АЭС, помещений, расположенных на разных уровнях.

Указанные особенности определяют необходимость исследования множества помещений, где может быть включена (выключена) принудительная вентиляция и иметься или отсутствовать естественная. Анализ пожарной опасности можно использовать в кризисном центре для оперативной идентификации текущего типа возгорания в режиме ограниченного времени для принятия решения и выработки рекомендаций для персонала ЯЭУ по борьбе за живучесть. Это обуславливает использование расчетного кода, функционирующего в реальном времени, или, даже, существенно быстрее, обеспечивая относительную точность по макропараметрам, характеризующим аварийную ситуацию с пожаром — т. е. необходим код-экспресс оценки развития пожара.

## Экспресс-методика на основе двухзонного моделирования

В настоящее время расчетные коды — основной инструмент анализа процессов во время пожара. Выделя-

ют три направления: инженерные методики [1], зонное моделирование [2] и коды расчетной гидродинамики (CFD) [3]. CFD-коды дают наилучшую точность, но отличаются высокими требованиями к вычислительным ресурсам. Инженерные методики, наоборот, за счет использования упрощенных эмпирических соотношений обеспечивают практически мгновенный результат.

Зонное моделирование в данном контексте представляет разумный компромисс между точностью вычислений и требуемыми ресурсами. Помещение делят на две зоны или контрольных объема и подразумевают, что свойства газов в них гомогенны. Изначально зонное моделирование предназначалось для решения практических проблем в инженерных противопожарных задачах, а также в моделировании распространения пожара в здании. По сравнению с CFD-кодами этот подход не предназначен для детального отображения потоков в помещении.

На сегодняшний день существует ряд кодов двухзонного моделирования, достаточно схожих по моделям и дающих похожие результаты. Валидация зонного моделирования описана в [4, 5] применительно к экспериментам, схожим с типичными вариантами возможных возгораний на АЭС. В работах проанализированы два кода зонного моделирования — CFAST и MAGIC, получено хорошее совпадение с экспериментальными данными по температуре слоя горячих газов в объеме, давлению, содержанию кислорода. Моделирование и кросс-валидация CFAST при пожаре на судне для сложной, многоуровневой конфигурации помещений представлены в [6 — 8]. Показано, что код может быть использован для данной специфики с учетом особенностей анализируемого объекта.

В настоящей работе для экспресс-анализа пожарной безопасности транспортабельных ЯЭУ при помощи разработанного кода ПАБМТ (пожары, анализ безопасности, морской транспорт) использовано зонное моделирование. В ПАБМТ для каждой зоны решаются обычные дифференциальные уравнения сохранения массы и энергии, уравнения состояния идеального газа и теплопроводности стенки. Явно уравнение сохранения моментов не используется, для горизонтальных потоков между помещениями применяется уравнение Бернулли, имеются эмпирические модели: образования дыма, конвективной (дымовой) струи, теплообмена при радиации, конвекции и теплопроводности.

В рамках адаптации зонного подхода для специфики рассматриваемых объектов разработана модель пиролиза, расширены реакции горения, добавлены модели прекращения горения при выгорании  $O_2$  и др.

Существующая большая база данных валидации двухзонных моделей относится к специфике аварий, присущих АЭС или подобным объектам. Анализируемые эксперименты соответствуют ограничениям двухзонного моделирования — большие объемы с наличием естественной или принудительной вентиляции. Специфика судовых ЯЭУ заключается в более компактных помещениях, где часто вентиляция отсутствует, объемы расположены на разных уровнях, связываемых между собой люками. Помещения зданий и судов с ЯЭУ отличаются по свойствам материалов и, в случае последних, большую роль играет теплопроводность. Цель настоящей работы заключается в выработке дополнительных оценок применимости двухзонного подхода для транспортных установок, особенно для вариантов, когда характеристики горения не полностью подходят под диапазон применимости кода.

В работе [1] показано, что если CFD-коды адекватно отображают процессы горения, то помимо непосредственного сравнения результатов расчетов ПАБМТ с экспериментами можно использовать кросс-валидацию по CFD-коду. Это использовалось для двух экспериментов — горения в комнате и цилиндрическом помещении объемом  $164 \text{ м}^3$ , а также модели пожара в технологических помещениях ПЭБ. В первых двух случаях указаны лишь основные параметры, поскольку условия экспериментов и расчетов по CFD-коду ANSYS CFX v.14 [9] подробно даны в [1].

Поскольку в CFD-коде и экспериментальных данных нет разделения на верхний горячий и нижний холодный слои (зоны) газов, то для сравнения результатов расчетов по кодам и экспериментальным данным взята оценка высоты разделения слоев из [4, 6, 10] для непрерывных профилей температуры  $T(z)$  в зависимости от высоты  $z$ . При общей высоте помещения  $H$  и температурах верхнего и нижнего слоев  $T_u$  и  $T_p$  определив величины

$$I_1 = \int_0^H T(z) dz; I_2 = \int_0^H \frac{1}{T(z)} dz,$$

можно вычислить высоту разделения слоев  $z_{int}$ :

$$\frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2T_l H}$$

и определить  $T_u$  и  $T_p$ .

Относительная разница для максимальных значений, рассчитанных кодами, выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = (\Delta y - \Delta x) / \Delta x, \quad (1)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  — соответствующие разницы между максимальными и минимальными значениями в расчете для каждого из кодов.

### Моделирование горения в комнате

В эксперименте и в моделировании на основе CFD- и ПАБМТ-кодов участвовала комната размером  $2 \times 2,5 \times 2 \text{ м}$ . Макет (всей площадью своих ограждающих конструкций) граничил с атмосферой, смежных помещений не было. Площадь дверного проема —  $1,105 \text{ м}^2$ , масса горючих веществ —  $361,4 \text{ кг}$ , площадь их поверхности — около  $26 \text{ м}^2$ , удельная горючая нагрузка в помещении —  $77,8 \text{ кг/м}^2$ . Горючую нагрузку обобщенно представляли диван, стол, стул, шкаф и ламинатное покрытие, равномерно распределенные по комнате. Температуру при пожаре измеряли 56-ю термопарами, распределенными равномерно по комнате и в дверном проеме. По высоте термопары располагали на трех уровнях от пола, равномерно на каждом уровне. Дверь была полностью открыта. Поджиг выполняли с помощью керосина в середине комнаты. Эксперимент закончился на 840 с. Температуру измеряли каждые 120 с. Особенность данного случая заключается в относительно малом объеме и равномерном распределении горючей нагрузки, особенно внизу по полу, что затрудняло использование двухзонного приближения.

В CFD-код входили модель горения EDM (Eddy Dissipation Model) [9], гексагональная сетка из 428 тыс. элементов размером 3 см со сгущением до 1 мм к двери, k-ε-модель турбулентности. По значениям термопар в [1] получено хорошее совпадение с экспериментом.

Сложность моделирования в коде ПАБМТ заключается в задании возможности цепного зажигания горючих объектов. Для этого был взят элемент «Проба», необходимый для определения параметров в некой точке пространства: температуры поверхности, окружающего газа и т. д. В текущей модели пробы располагали в местах основных горючих объектов и использовали значение в  $250 \text{ °C}$  для инициализации начала пиролиза и воспламенения. Рост энерговыделения вычисляли в кВт по [11]

$$Q_w = 1055 \left( \frac{t}{t_g} \right)^2$$

для момента времени  $t$ .

Величина  $t_g$  табулирована по результатам экспериментов. Переход к стационарному горению осуществляли на основе удельного энерговыделения [11]. Горение продолжалось до исчерпания горючего материала в объекте. В реакции горения ПАБМТ следует задать долю энергии, отводимую на радиационный теплообмен  $r$ , типичные значения которой по различным источникам находятся в интервале 0,05...0,40. В модели взяты данные из примеров двухзонного моделирования

[4, 5] и доля на радиацию  $r$  варьировалась от 0,35 до 0,4. Результаты расчетов изменения температуры для верхнего слоя газов в ПАБМТ приведены на рис. 1 в сравнении с экспериментальными данными и CFD-кодом.

Из данных рис. 1 видно, что результаты расчета по ПАБМТ для верхнего слоя хорошо совпадают с экспериментом и местами даже лучше, чем по CFD-коду. Анализ последовательности возгорания объектов, распределенных в комнате, показал, что она очень схожа в обоих кодах.

### Моделирование горения в цилиндрическом помещении

Эксперимент проходил в полуцилиндрическом помещении объемом  $164 \text{ м}^3$ . По опытным данным принято, что общая площадь отверстия, сообщающегося с атмосферой, равна  $0,0005 \text{ м}^2$ . Горючей нагрузкой являлось дизельное топливо, налитое в противень размером  $1 \times 0,51 \text{ м}$  в центре помещения. Над областью горения установлено пять термопар на разных высотах. Воспламенение топлива происходило в центре противня. Горение продолжалось до самозатухания по снижению концентрации кислорода на 400-й с. Показания термопар снимали с периодичностью 25 с [1].

Данный вариант отличается от предыдущего локализацией источника горения, и с этой стороны он лучше подходит для двухзонного моделирования. Однако наличие цилиндрической геометрии не полностью соответствует требованиям двухзонного моделирования. Другой трудностью является фактическая герметичность рассматриваемого объема, что определяет прекращение горения из-за выгорания кислорода. По данному типу горения практически отсутствует валидация в анализируемых работах, и визуальные наблюдения

экспериментов показывают, что происходит быстрое расширение верхнего горячего слоя [4].

Поскольку термопары находились только над источником горения, то получить оценки высоты разделения слоев нельзя. В публикации [1] показано, что CFD-модель можно настроить для адекватного отображения горения, и на этой базе была проведена кросс-валидация расчетов ПАБМТ. Модель CFD базируется на гексагональной сетке с шагом  $0,05 \text{ м}$  и количеством элементов 363520. Использована SST-модель турбулентности, горение реализовано на основе модели CFX [9] неравновесной версии подхода Burke-Schumann — flamelet-PDF — локальных фронтов пламени (flamelet) с встраиванием в турбулентное горение на основе вероятностной функции.

Модель ПАБМТ построена по параметрам эксперимента на основе эквивалентного прямоугольного помещения. Энерговыведение при горении эквивалентно расчетам CFD. В ПАБМТ взяты значения доли на радиацию  $r = 0,35$  на основе стандартных примеров двухзонного моделирования для дизельного топлива. Исходя из того, что по  $r$  имеется существенная неопределенность [4], дополнительно рассчитывали вариант с  $r = 0,3$ . Результаты в виде изменений температур верхнего слоя изображены на рис. 2, где видно хорошее совпадение температур. Для температурного пика величина  $\epsilon$  (1) между кодами составляет 1,6% для  $r = 0,3$  и 5,1% для  $r = 0,35$ .

### Моделирование горения в технологических помещениях плавучего энергоблока

В расчетах рассматривалась группа из шести технологических помещений ПЭБ. Вид модели для кода ПАБМТ дан на рис. 3. Помещения 1 — 5 представляют

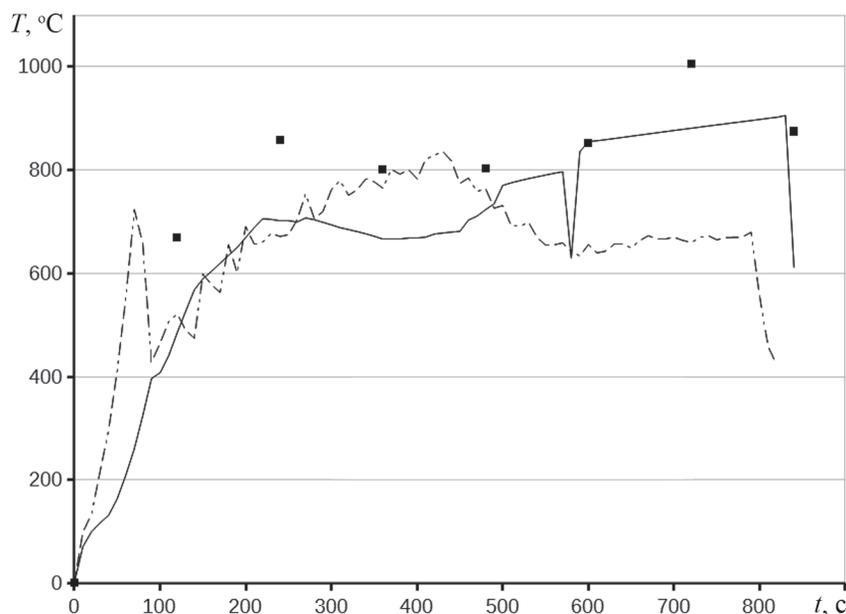


Рис. 1. Изменение температуры верхнего слоя газов для модели горения комнаты для кодов ПАБМТ (—), CFD (- - -) и данных эксперимента (■)

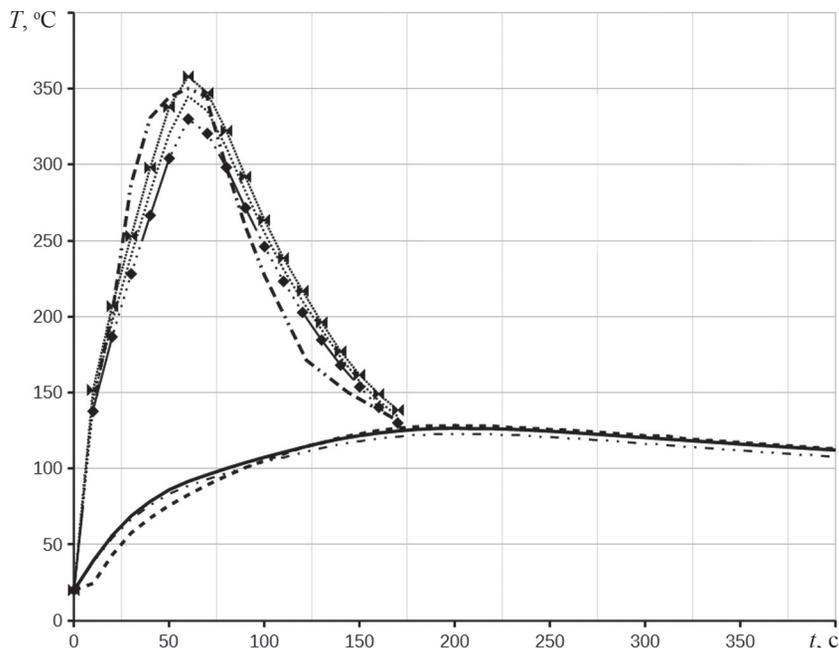


Рис. 2. Изменение температуры для верхнего слоя газов кодов ПАБМТ и CFD, моделей горения в помещениях 164 м<sup>3</sup> и объеме 1 ПЭБ (рис. 3) для доли на радиацию  $r$ :

— ПАБМТ 164 м<sup>3</sup>,  $r = 0,3$  рад.; ···· — ПАБМТ 164 м<sup>3</sup>,  $r = 0,35$  рад.; - - - - - CFD 164 м<sup>3</sup>; ···◆·· — ПАБМТ ПЭБ,  $r = 0,1$  рад.;  
···· — ПЭБ,  $r = 0,2$  рад.; —◆— — ПАБМТ ПЭБ,  $r = 0,3$  рад.; - - - - - CFD ПЭБ

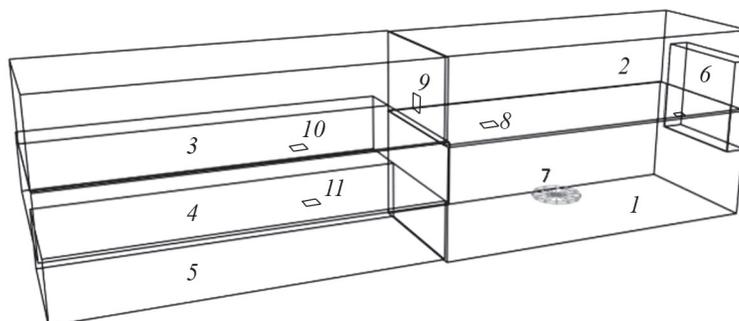


Рис. 3. Расчетная модель группы технологических помещений ПЭБ для кода ПАБМТ:

1 — 6 — помещения; 7 — источник горения; 8 — 11 — вертикальные и горизонтальные проемы в стенах, связывающие помещения

собой расчетные объемы величиной 380, 262, 277, 278 и 187 м<sup>3</sup>. Помещение 6 объемом 19 м<sup>3</sup> по вертикальной плоскости пересекается с помещениями 1 площадью 10 м<sup>2</sup> и 2 площадью 6 м<sup>2</sup>, что позволяет газам циркулировать между объемами 1 и 2 через помещение 6, являющееся в этом случае вентиляционной шахтой. Очаг горения 7 представлен разлитием 500 кг топлива от дизель-генератора на возвышении 0,966 м от пола и эквивалентной площадью 7 м<sup>2</sup>. Проемы в стенах 8 — 11 связывают между собой помещения площадью от 0,3 м<sup>2</sup> для вертикальных соединений и 0,49 м<sup>2</sup> для горизонтальных.

Особенность модели заключается в наличии элементов цилиндрической геометрии для всех объемов в реальных помещениях ПЭБ, что влияет на результаты, как и в варианте для помещения 164 м<sup>3</sup>. Относительно

малая площадь вентиляционных отверстий по сравнению с мощностью энерговыделения позволяет предположить возможность прекращения горения при выгорании кислорода в помещении 1.

Для точного моделирования применяли CFD-код, в котором моделировали цилиндрическую геометрию помещений. Общее количество расчетных объемов по всем помещениям — 1 003 263. В основном использовали гексагональную расчетную сетку с варьированием размеров элементов от 0,02 до 0,17 м, работали с SST-моделью турбулентности и моделью горения EDM. Для учета регулировки горения при уменьшении локальной концентрации O<sub>2</sub> использован механизм обратной связи, основанный на суммарном тепловом потоке, падающем на поверхность топлива. В результате CFD-расчета выявлено, что после 50 с концентрация

$O_2$  падает, что приводит к постепенному снижению интенсивности горения. Анализ циркуляции газов, полученных в трехмерной модели, показал, что имеет место, как и в варианте  $164 \text{ м}^3$ , существенное перемешивание газов в помещении.

Полученная динамика процесса горения была использована в ПАБМТ-модели. Исходя из опыта предыдущих расчетов для  $164 \text{ м}^3$ , брали значения  $r = 0,3$  и для сравнения проводили расчеты для  $r = 0,2$  и  $r = 0,1$ . Результаты изменения температуры верхнего слоя для помещения  $l$  модели представлены на рис. 2 вместе с результатами для  $164 \text{ м}^3$ , где видна схожая качественная картина. В обоих случаях в наличии возрастание температуры, достижение максимума и ее снижение из-за выгорания  $O_2$ . Для температурного пика ПЭБ значение  $\varepsilon$  (1) составляет: 6,1% для  $r = 0,3$ , 1,6% для  $r = 0,2$  и 2,4% для  $r = 0,1$ . Влияние доли энергии, отводимой на радиационный теплообмен, в расчетах объясняется представлением в ПАБМТ и других двухзонных кодах источника горения как точечного при распространении тепловой радиации. Расчеты по CFD-коду показывают, что имеется развитая конвективная струя горячих газов, являющаяся источником теплового излучения и точечное приближение в этом случае неадекватно, что отмечено в [4] как один из источников отклонений. Большая разница максимальных значений температурного пика для  $164 \text{ м}^3$  и ПЭБ основывается на существенном отличии энерговыделения при горении.

На рисунке 4 изображено изменение давления в объемах для  $164 \text{ м}^3$  и ПЭБ, где видно хорошее совпадение для двух кодов, динамика изменения давления соответствует изменению температуры рис. 3. Величина относительной разности  $\varepsilon$  (1) для пика давления для

ПЭБ составляет 19,5% для  $r = 0,1$ , 14,4% для  $r = 0,2$  и 8,8% для  $r = 0,3$  и 3,5% для  $164 \text{ м}^3$ . Полученные данные по давлению хорошо согласуются с [6], где получена точность для кода CFAST в пределах 20%. Изменение массовой доли  $O_2$  дано на рис. 5 для комнаты  $164 \text{ м}^3$  и ПЭБ, где приведено только одно значение параметра  $r$  из-за его малого влияния. Для  $164 \text{ м}^3$   $\varepsilon = 17\%$ , для ПЭБ при  $r = 0,1; 0,2; 0,3$ ;  $\varepsilon = 12; 13,7; 15,56\%$ , что согласуется с [4], где разница с экспериментом достигала 22...25%, что лежит в пределах экспериментальной неточности. Для всех вариантов изменение  $O_2$  физически обосновано условиями каждой задачи и согласуется с другими параметрами — падение концентрации  $O_2$  вызывает соответствующий спад  $T_u$ , что обуславливает изменение давления.

### Заключение

На основе проведенного сравнения результатов расчетов по разрабатываемому коду двухзонного моделирования ПАБМТ с экспериментальными данными и результатами CFD-кода показано, что ПАБМТ достаточно хорошо отображает температуру верхнего слоя горячих газов, относительная разница для пикового значения температуры между кодами находится существенно ниже 10...20% экспериментальной погрешности [4]. По давлению и массовой доле  $O_2$  также имеется хорошее совпадение, за исключением пожара в комнате.

Время, затраченное на расчет для кода ПАБМТ для рассмотренных вариантов, находится в районе 1...10 с, что существенно меньше времени, требуемого на расчет для CFD-кода, которое составляло от одного дня до 1,5 недель с применением нескольких десятков процессоров. Это подтверждает, что двухзонное моделирова-

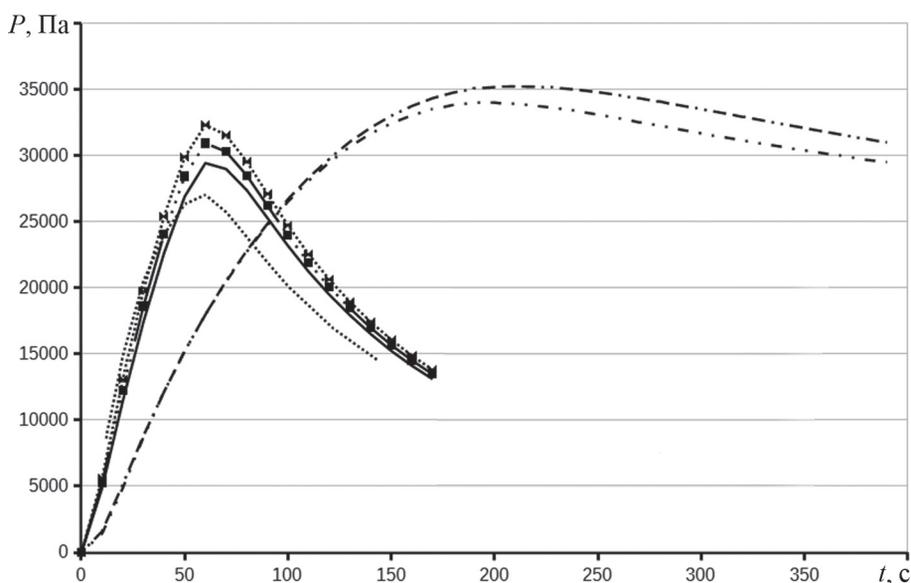


Рис. 4. Изменение давления для варианта  $164 \text{ м}^3$  и модели горения технологических помещений ПЭБ:

..... — CFD ПЭБ;  $\cdot\blacktriangleleft\cdot$  — ПАБМТ ПЭБ,  $r = 0,1$  рад.;  $\text{—}\blacksquare\text{—}$  — ПАБМТ ПЭБ,  $r = 0,2$  рад.;  $\text{—}\blacksquare\text{—}$  — ПАБМТ ПЭБ,  $r = 0,3$  рад.;  $\text{-- -- --}$  — CFD  $164 \text{ м}^3$ ;  $\cdot\text{---}\cdot$  — ПАБМТ  $164 \text{ м}^3$

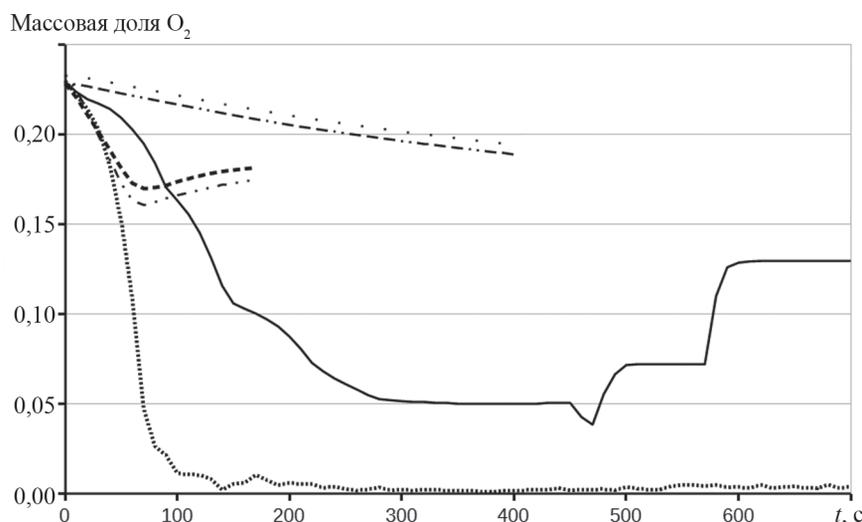


Рис. 5. Изменение массовой доли O<sub>2</sub> для вариантов комнаты, 164 м<sup>3</sup> и горения технологических помещений ПЭБ:

— ПАБМТ (комната); ..... CFD (комната); - · - · - ПАБМТ 164 м<sup>3</sup>, r = 0,35 рад; ●●● CFD 164 м<sup>3</sup>; - - - ПАБМТ ПЭБ, r = 0,2 рад; ····· CFD ПЭБ

ние на основе кода ПАБМТ может быть использовано в системе экспресс-оценки пожарной опасности для судов с ЯЭУ, даже если объект не полностью подходит под ограничения зонного моделирования. Имеющиеся

отклонения могут быть скомпенсированы соответствующей вариацией неопределенных параметров моделей, например, кривой энерговыделения, доли энергии на радиационный теплообмен.

### Литература

1. Fire Dynamics Tools (FDT): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Final Rep. NUREG-1805, 2004. Suppl. 1. V. 1—2.
2. Peacock R.D., Jones W.W., Reneke P.A., Forney G.P. CFAST — Consol-idated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7): Tech. Reference Guide // NIST Technical Note. 2016. V. 1.
3. Воробьев Ю.Б., Ганжинов А.М., Карнаухов В.Е., Уртенев Д.С., Устинов В.С. Опыт использования расчетных кодов для моделирования пожаров на объектах транспортных ядерных энергетических установок // Вестник МЭИ. 2016. № 5. С. 39—48.
4. Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. NUREG-1824. 2007. V. 1 — 7.
5. Peacock R.D., Forney G.P., Reneke P.A. CFAST — Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7): Verification and Validation Guide // NIST Technical Note. 2006. V 3.
6. Hoover J.B. Application of the CFAST Zone Model to Ships — Fire Specification Parameters // J. Fire Protection Eng. 2008. V. 18. Pp. 199—222.
7. Reneke P.A. e. a. A Comparison of CFAST Predictions to USCG Real-Scale Fire Tests // J. Fire Protection Eng. 2001. V. 11. Pp. 43—68.
8. Bhargab D., Apurba K. A Comparative Study on the Application of Simulation Techniques for Shipboard Fire Safety Analysis // Reliability, Risk and Safety:

### References

1. Fire Dynamics Tools (FDT): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Final Rep. NUREG-1805, 2004;1;1—2.
2. Peacock R.D., Jones W.W., Reneke P.A., Forney G.P. CFAST — Consol-idated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7): Tech. Reference Guide. NIST Technical Note. 2016;1.
3. Vorob'ev Yu.B., Ganzhinov A.M., Karnauhov V.E., Urtenov D.S., Ustinov V.S. Opyt Ispol'zovaniya Raschetnyh Kodov dlya Modelirovaniya Pozharov na Ob'ekтах Transportnyh Yadernyh Energeticheskikh Ustanovok. Vestnik MEI. 2016;5:39—48. (in Russian).
4. Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. NUREG-1824. 2007;1 — 7.
5. Peacock R.D., Forney G.P., Reneke P.A. CFAST — Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7): Verification and Validation Guide. NIST Technical Note. 2006;3.
6. Hoover J.B. Application of the CFAST Zone Model to Ships — Fire Specification Parameters. J. Fire Protection Eng. 2008;18:199—222.
7. Reneke P.A. e. a. A Comparison of CFAST Predictions to USCG Real-Scale Fire Tests. J. Fire Protection Eng. 2001;11:43—68.
8. Bhargab D., Apurba K. A Comparative Study on the Application of Simulation Techniques for Shipboard Fire Safety Analysis. Reliability, Risk and Safety: Theory

Theory and Appl. London: Taylor & Francis Group, 2010. Pp. 931—938.

9. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 14.0, 2011.

10. McGrattan K. e. a. Fire Dynamics Simulator User's Guide. NIST Special Publ., 2013.

11. NFPA 204—2007. Standard for Smoke and Heat Venting.

and Appl. London: Taylor & Francis Group, 2010: 931—938.

9. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 14.0, 2011.

10. McGrattan K. e. a. Fire Dynamics Simulator User's Guide. NIST Special Publ., 2013.

11. NFPA 204—2007. Standard for Smoke and Heat Venting.

#### Сведения об авторах:

**Воробьев Юрий Борисович** — кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: yura3510@gmail.com

**Уртенев Дахир Сулейманович** — начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт»

**Карнаухов Валерий Евгеньевич** — старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

**Подгорный Валерий Николаевич** — аспирант кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

**Эйхорн Юлия Николаевна** — младший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

**Лукашенко Михаил Леонидович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

#### Information about authors:

**Vorobyev Yuriy B.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, Leading Researcher of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: yura3510@gmail.com

**Urtenov Dakhir S.** — Head of Department of NRC «Kurchatov Institute»

**Karnaukhov Valeriy E.** — Senior Researcher of NRC «Kurchatov Institute»

**Podgorny Valeriy N.** — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

**Eikhorn Yulia N.** — Junior Researcher of NRC «Kurchatov Institute»

**Lukashenko Mikhail L.** — Ph.D. (Techn.), Leading Researcher of NRC «Kurchatov Institute»

**Работа выполнена:** с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мегакласса» НИЦ «Курчатовский институт» (субсидия Минобрнауки, идентификатор работ: RFMEFI62117X0016)

**The work is executed:** Using the Equipment of the Center of Collective use «Complex of Modeling and Data Processing of Research Facilities of Megaclasse» NRC «Kurchatov Institute» (Subsidy of the Ministry of Education and Science, work ID: RFMEFI62117X0016)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 29.05.2018

**The article received to the editor:** 29.05.2018