

УДК 621.039.58.00157

Опыт использования расчетных кодов для моделирования пожаров на объектах транспортных ядерных энергетических установок

Ю. Б. Воробьев, А. М. Ганжинов, В. Е. Карнаухов, Д. С. Уртенев, В. С. Устинов

Сведения об авторах

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

Ганжинов Андрей Михайлович — кандидат технических наук, заместитель руководителя отделения НИЦ «Курчатовский институт»

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

Уртенев Дахир Сулейманович — начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт»

Устинов Василий Сергеевич — кандидат технических наук, руководитель комплекса, НИЦ «Курчатовский институт»

Рассмотрена возможность использования кодов расчетной гидродинамики (CFD) для моделирования пожаров на ядерных объектах. Основная задача исследования заключается в выработке алгоритма создания модели на CFD-кодах и поиске оптимальных параметров используемых моделей для получения наилучшего совпадения с экспериментальными данными. Представлены расчеты по CFD кодам-пожара для двух задач.

В первом случае описана комната с распределенной горючей нагрузкой на основе стандартных элементов типа шкаф, стол и т.д. Особенность моделирования данного варианта состоит в выборе и применении адекватной инженерной модели пиролиза деревянных изделий. Для непосредственного моделирования горения использовалась модель EDM (Eddy Dissipation Model), которая часто применяется для инженерных расчетов. Приведены результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными для характерных точек измерения. Анализ результатов, представленный в статье, показал, что достигнуто хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Во втором варианте показано горение локализованного разлива горючей жидкости в объеме производственного помещения. Одним из отличий данного варианта является то, что горение в нем прекращалось при выгорании кислорода. Для этого модель горения была изменена на основе введения обратной связи по тепловому потоку при поступлении паров топлива в объем. Дополнительные модификации: уточнение модели горения с применением подхода локальных фронтов пламени, учет анизотропии турбулентности на основе использования соответствующих моделей второго порядка и калибровки параметров. По результатам сравнения расчетных и экспериментальных данных достигнуто приемлемое совпадение.

Ключевые слова: CFD-коды, безопасность транспортных ядерных энергетических установок, пожары на ядерных объектах.

Experience gained from using computation codes for modeling fires at nuclear-powered transport facilities

Yu. B. Vorob'ev, A. M. Ganzhinov, V. E. Karnaukhov, D. S. Urtenov, V. S. Ustinov

Information about authors

Vorob'ev Yuriy B. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., MPEI, Leading Researcher of Research Center «Kurchatov Institute», e-mail: yura3510@gmail.com

Ganzhinov Andrey M. — Ph.D. (Techn.), Deputy Head of the Department of Research Center «Kurchatov Institute»

Karnaukhov Valeriy E. — Senior Researcher of Research Center «Kurchatov Institute»

Urtenov Dakhir S. — Head of Department of Research Center «Kurchatov Institute»

Ustinov Vasiliy S. — Ph.D. (Techn.), Head of Complex of Research Center «Kurchatov Institute»

The possibility of using computational fluid dynamics (CFD) codes for modeling fires at nuclear facilities is considered. The main objective of the study is to elaborate an algorithm for constructing a model on the basis of CFD codes and to find the optimal parameters of the used models to achieve the best agreement with experimental data. Calculations of fires by CFD codes for two problems are presented.

In the first case, a room with a distributed combustible load is described in terms of standard elements like a bookcase, table etc. The main feature of modeling such a case is to select and apply an adequate engineering model representing the pyrolysis of woodwork. The Eddy Dissipation Model, which is often used in engineering calculations, was applied for directly modeling the burning process. The results of

calculations are presented by way of comparison with experimental data for typical measurement points. The presented analysis of the results shows that good agreement has been reached between the experimental and calculated data.

In the second case, the burning of a localized spill of combustible liquid within the volume of a production premise is considered. One of the major differences of the second case from the first one is that the fire in it terminated once the oxygen in the premise has burnt out. To this end, the original burning model was modified by including a heat flux feedback as fuel vapor enters into the volume. Some other modifications were also introduced into the model, namely, sophisticating the burning model by applying the flamelets approach, taking into account the turbulence anisotropy based on using appropriate second-order models, and calibrating the model parameters. A comparison of the calculated and experimental data shows that acceptable agreement between them has been reached.

Key words: CFD codes, safety of transport nuclear power facilities, fire accidents at nuclear facilities.

В настоящее время для дальнейшего успешного развития ядерной энергетики, как на АЭС, так и для ее транспортных вариантов на основе ледоколов, плавучих АЭС и др. существенное внимание должно быть уделено обеспечению ее безопасности. Решающую роль играют новые методы анализа возможных аварий, оптимизация конструкций ядерных объектов для их предотвращения и уменьшения последствий. Современные расчетные методы интенсивно развиваются и позволяют, используя фундаментальные физические законы сохранения, получать с большой степенью достоверности прогноз характеристик моделируемого объекта во время сложных аварийных ситуаций, таких как, например, пожары различного типа.

Пожары чрезвычайно опасны на АЭС и, особенно, на объектах транспортных ядерных энергетических установок (ТЯЭУ), и могут явиться иницирующим событием для дальнейшего развития аварии. По [1] вклад в общую частоту повреждений активной зоны реактора от возникновения пожара на АЭС находится в диапазоне 1 — 68%. Пожары могут возникать и в процессе развития аварии, приводить к ухудшению ситуации на ЯЭУ — например, аварии на Чернобыльской АЭС, «Фукусима» и др. Последствия пожаров могут быть связаны с разрушением оборудования АЭС, ТЯЭУ под воздействием температуры, нарушением функций управления, иницированием и интенсификацией распространения радиоактивных веществ, негативным воздействием на персонал и т.д. Требования о проведении анализов и оценок пожарной опасности включены в российские и международные стандарты по безопасности ядерных объектов, а разработка вычислительных методов для них и проведение экспериментальных работ является приоритетным направлением.

В работе представляется опыт, накопленный по изучению возможности применения кодов расчетной гидродинамики (CFD) к моделированию пожаров на ТЯЭУ, который также может быть применен для АЭС.

Постановка задачи

В работе рассматривается расчет пожара для двух типовых задач, по которым имеются экспериментальные данные. Это пожар в комнате с распределенной горючей нагрузкой и горение локализованного разлива горючей жидкости в объеме производственного помещения. Оба объекта исследований являются типовыми как для ТЯЭУ, так и на АЭС [2, 3].

Задача исследования заключалась в выработке алгоритма создания модели на CFD-кодах и нахождении оптимальных параметров (калибровки) используемых моделей горения, турбулентности и т.д. для получения наилучшего совпадения с экспериментальными данными.

Подобные проблемы систематически исследуются в мире в рамках повышения безопасности ядерных объектов. Из наиболее известных, стоит упомянуть международный проект PRISME, задача которого заключается в проведении серии реперных экспериментов для типовых объектов АЭС и калибровки на их основе расчетных кодов [3].

Можно выделить три основных метода моделирования пожаров. Это использование инженерных методов, позволяющих оценивать интегральные параметры в моделируемом объекте на основе эмпирических моделей. Другой, более точный метод зонного моделирования основывается на разбиении анализируемого объекта на зоны, каждая из которых описывается набором параметров и полуэмпирических законов. Параметры усредняются по каждой зоне. Сохранение условий на границах вместе с общими законами сохранения позволяет получить систему уравнений, описывающих пожар. Существуют коды для его применения, например, CFAST, использование которого можно найти в [5, 6]. Есть проблемы, ограничивающие его точность: усреднение параметров по зонам, способ разбиения объекта на зоны и необходимость его изменения в процессе развития пожара, бифуркционный характер изменения структуры потока от параметров. Полевое или CFD-моделирование представляет собой более точный подход, базирующийся на локальном соблюдении законов сохранения основных физических параметров, разрешаемых с необходимой точностью по пространству моделирования и времени. В принципе данный подход позволяет получить моделирование развития пожара с любой точностью, но в реальности он базируется на ряде предположений, которые охватывают текущее понимание процессов турбулентности, радиационного теплообмена, химической кинетики и т.д. Они могут серьезно влиять на точность моделирования, но, в любом случае, подход позволяет получить более точные результаты, по сравнению с другими методами.

Задачей текущего исследования являлась разработка алгоритма составления CFD-моделей для типичных задач, связанных с пожарами на ядерных объектах

ТЯЭУ. При этом упор делался на возможность проведения CFD расчетов инженерного типа, позволяющих получить результаты с допустимой погрешностью без использования чрезмерных вычислительных ресурсов и в приемлемые временные сроки. Это ограничило использование излишне подробных расчетных сеток и ресурсоемких моделей турбулентности типа LES.

Моделирование горения в комнате

Макет комнаты размером $2000 \times 2500 \times 2000$ мм в виде ее трехмерной модели для расчетов на CFD-коде представлен на рис. 1. Макет в эксперименте был подвешен на креплении и всей площадью своих ограждающих конструкций граничил с атмосферой. Смежных помещений у макета не было. Площадь дверного проема, связывающего макет с атмосферой, — $1,105 \text{ м}^2$, масса горючих веществ — $361,4 \text{ кг}$, площадь их поверхности — около 26 м^2 , удельная горючая нагрузка в помещении — $77,8 \text{ кг/м}^2$. Горючую нагрузку обобщенно представляют элементы (см. рис. 1): диван, стол, стул, шкаф и ламинатное покрытие. При их моделировании в эксперименте было помещено эквивалентное по теплотворной способности количество древесины. Температура при пожаре измерялась 56 термопарами, распределенными равномерно по комнате и в дверном проеме. По высоте термопары располагались на

трех уровнях от пола. Дверь была полностью открыта. Поджигание осуществлялось с помощью керосина (см. рис. 1). Эксперимент закончился на 840 с. Температура измерялась каждые 120 с.

При моделировании площадь области поджога $0,0625 \text{ м}^2$ определялась из предположения о разливе керосина на ковровую дорожку. Использовалась гексагональная сетка, которая была на начальном этапе относительно разреженная — 77 000 элементов с размером 5 см на один элемент. В дальнейшем применялась сетка из 428 000 элементов размером 3 см со сгущением до 1 мм к двери. Данная точность может быть принята как достаточная, так как по опыту моделирования пожаров на основе CFD-кодов [5, 6] рекомендуется использовать расчетные сетки в диапазоне от 1 до 10 см даже для LES-модели турбулентности для достижения хорошей точности моделирования потоков газа в помещении. В [7] отмечается, что более разреженная сетка с размером элементов 10 см дала лучшее совпадение с экспериментальными данными, чем сетка с размером элемента 5 см. При моделировании решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) с использованием $k-\epsilon$ - и SST-моделей турбулентности. SST использовалась на первом этапе, но поскольку она дала существенную нестабильность расчетов, то в дальнейшем применялась $k-\epsilon$ -модель.

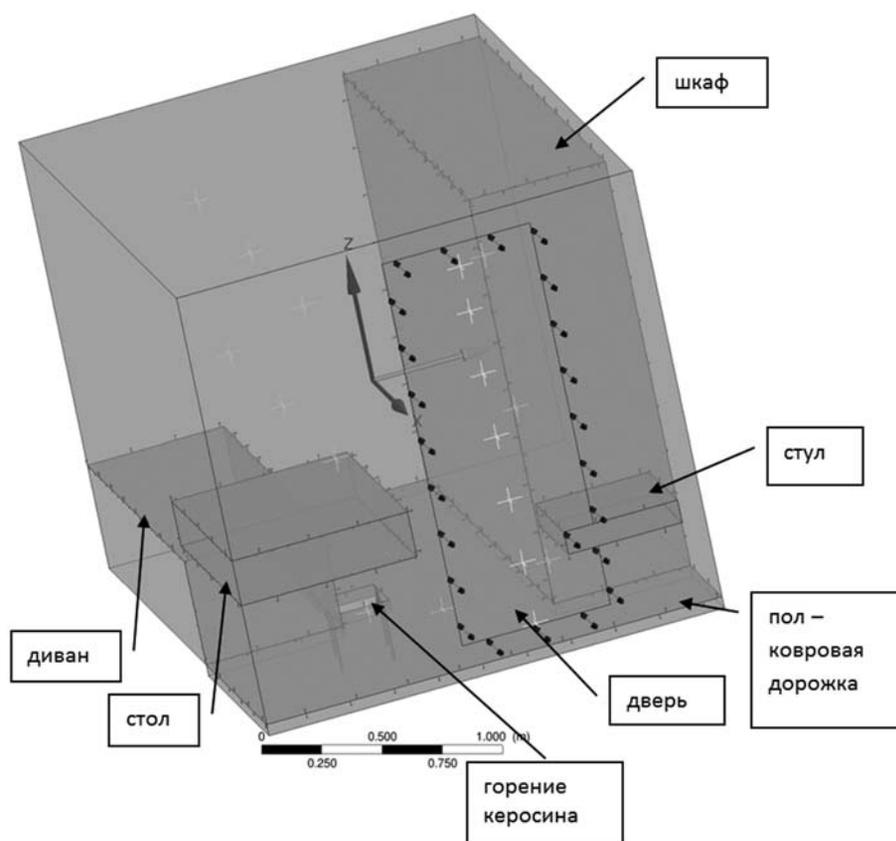


Рис. 1. Модель горения распределенной горючей нагрузки в комнате

Зажигание, как в эксперименте, моделировалось горением разлитого керосина. Согласно инженерной практике [8], так как площадь разлития достаточно мала, принято, что керосин практически сразу с момента поджога выходит на стадию воспламенения всей поверхности и реализацию режима максимального выгорания, которая по [8] определялась через выражение:

$$\dot{m}_{fc} = m_{\infty} (1 - \exp(-k\beta D)).$$

Для керосина $m_{\infty} = 0,039$ кг/м²с; $k\beta = 1,7$ м⁻¹; D — эквивалентный диаметр области горения.

Горение древесины, которая является основным горючим материалом помещения, базируется на двух процессах. Первый процесс является пиролизом с выделением летучих веществ из дерева при его нагреве больше критической температуры. Непосредственное сгорание выделившихся газообразных продуктов пиролиза определяет второй процесс. При этом образовавшееся тепло расходуется на дальнейший нагрев дерева и поддержание пиролиза. Процесс пиролиза древесины является сложным и нелинейным, и в настоящее время отсутствуют общепринятые инженерные методы его точной оценки. Это определяется нелинейными свойствами древесины, анизотропией, что сильно влияет на распространение тепла внутри древесины и диффузию образовавшихся летучих веществ наружу. При пиролизе происходит ее деградация, отражающаяся на целостности конструкций, изменении физических свойств. Существующие подходы относительно неплохо воспроизводят пиролиз для небольших образцов порядка 10 см [9], однако для больших объектов и случаев сложной геометрии они пока неприменимы. Поэтому была выбрана инженерная методика [8,10]. Следуя общепринятой практике, было выделено две фазы пожара: роста и стационарного горения. Рост характеризуется увеличением энерговыделения в (кВт) по [8]:

$$Q_w = 1055(t/t_g)^2$$

для момента времени t . Величина t_g табулируется на основе экспериментов для разных материалов, геометрий, конструкций и т.д. Переход к стационарному горению определяется на основе удельного энерговыделения, табулируемого в [8]. Горение продолжается до исчерпания горючего материала в объекте. Пиролиз объектах модели включался при превышении температуры стенки 250 °С. Поступление летучих веществ при пиролизе моделировалось эквивалентным по энергии расходом горючего газа из поверхности объекта. В качестве газа из рассматривавшихся: этанол, метан, керосин, ацетон были выбраны пары ацетона, поскольку эта реакция горения по потреблению кислорода, образованию CO₂ и H₂O на единицу выделившегося тепла наиболее близка к древесине.

Использовалась модель горения EDM (Eddy Dissipation Model), в которой принимается, что ско-

рость горения пламени лимитируется интенсивностью турбулентного перемешивания реагентов, а химической кинетикой пренебрегается как быстро протекающей. EDM требует гораздо меньших расчетных мощностей по сравнению с химической кинетикой. Скорость образования компонента i в результате реакции выбирается как наименьшая величина из двух уравнений на основе массовых долей:

для исходных компонентов:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A_p \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{\omega,R}} \right); \quad (1)$$

для продуктов реакции:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A B p \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{\omega,j}}, \quad (2)$$

где k — турбулентная кинетическая энергия; ε — скорость диссипации турбулентной энергии; Y_p , Y_r — массовые доли компонентов; A , B — эмпирические константы для реагентов и продуктов соответственно; $M_{\omega,i}$ — молекулярный вес; индексы R и P — реагенты и продукты, соответственно; $v'_{i,r}$ — стехиометрический коэффициент для компонента i реакции r .

Ключевую роль при моделировании пожаров играет радиационный теплообмен как основной механизм передачи тепловой энергии от пламени к горючей нагрузке. Он в модели для кода CFX применялся на основе метода Discrete transfer model (DTM) и сравнительные расчеты с методом Монте-Карло показали, что разница между ними не существенна.

В коде Fluent для учета радиационного теплообмена имеются две модели — диффузионное приближение уравнения лучистого переноса P1 и модель дискретных ординат (DO). Несмотря на то, что DO является более точной по сравнению с P1, она обладает недостатком, связанным с дискретизацией распределения излучения по пространству (т.н. ray-effect) и, как следствие, возникновением на окружающих поверхностях локальных тепловых пятен, что нефизично. Поэтому использовалась менее точная, но часто применяемая в задачах горения, модель P1. Радиационный теплообмен находится в прямой зависимости от образования и окисления сажи. CFX и Fluent располагают несколькими моделями этих процессов [12] и их влияния на излучательные характеристики среды.

Принималось, что дерево имеет постоянные свойства. Были взяты усредненные характеристики: плотность 500 кг/м³, теплоемкость 2100 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,116 Вт/(м·К). В качестве начальных условий принималось, что объем заполнен неподвижным воздухом (67% азота и 23% кислорода по массе) при температуре 4 °С и атмосферном давлении.

В результате было получено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных на уровне требуемых инженерных оценок. На рис. 2, 3 приведены

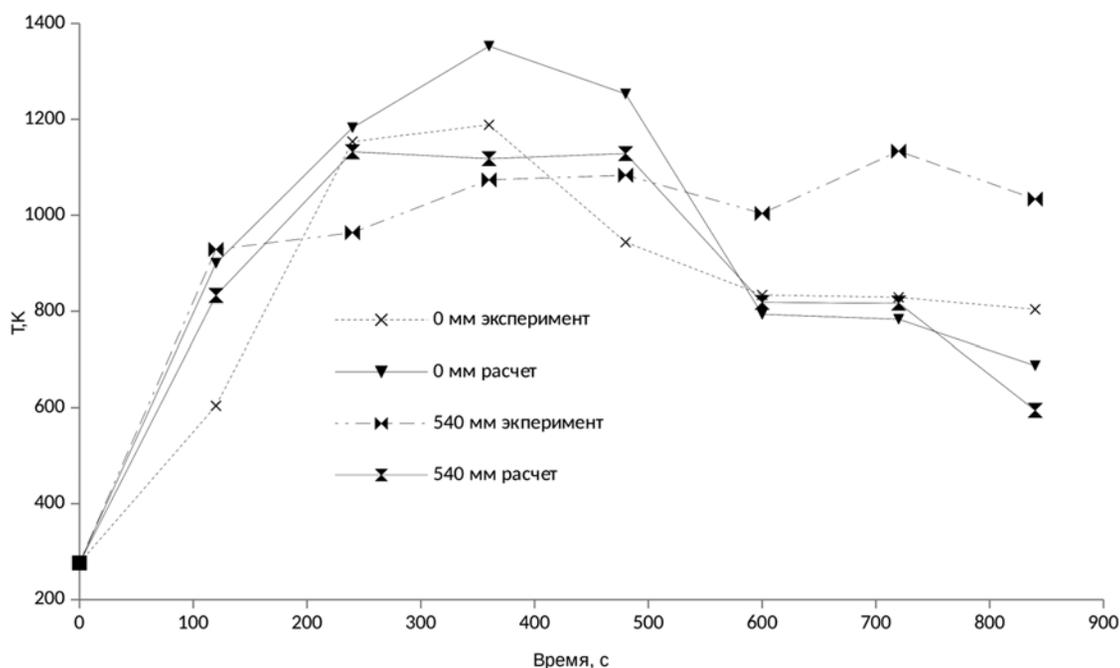


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения по коду CFX температуры для термопар на высоте 0 и 540 мм от пола

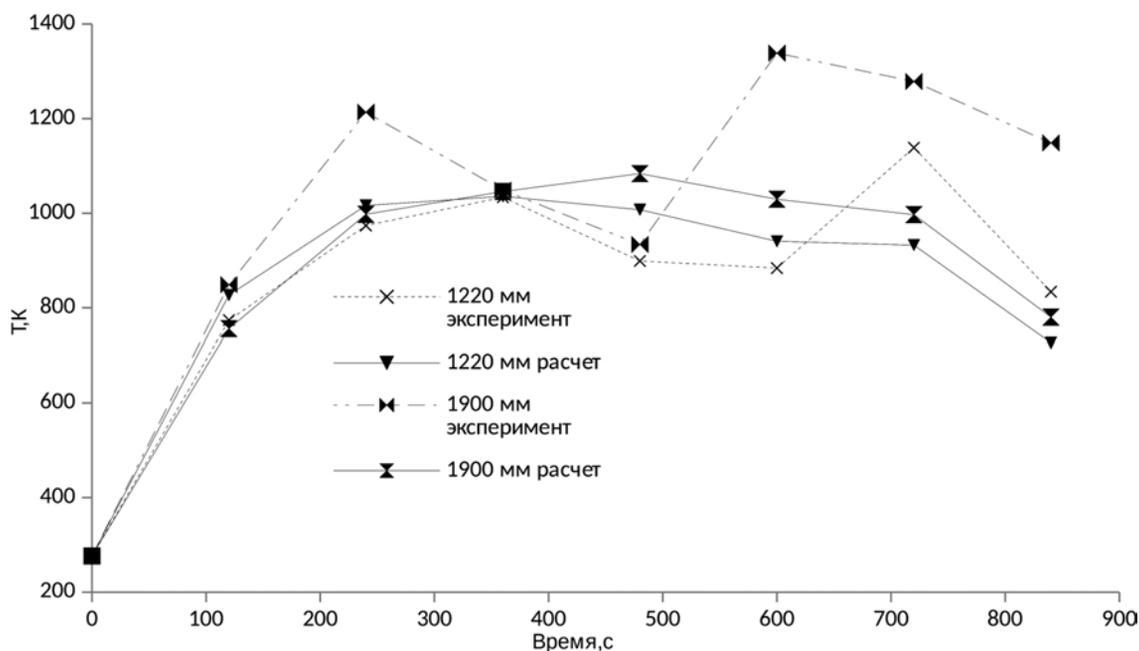


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные значения по коду CFX температуры для термопар на высоте 1220 и 1900 мм от пола

результаты для характерных термопар по комнате на полу и на трех уровнях по высоте для кода CFX. Видно, что тренд экспериментальных данных хорошо воспроизводится, но местами, особенно к концу, имеется отличие, которое может быть объяснено применявшейся упрощенной моделью пиролиза и погрешностями в распределении горючей нагрузки, а также не учетом деградации конструкций в процессе пожара.

Процесс горения следующий. В начале пожара на 25 с доминирует горение разлитого керосина. На 65 с

наблюдается большая вовлеченность окружающих объектов, в частности, большой вклад от вертикальной части дивана, пола и стола. Хотя наибольший вклад продолжает давать керосин. На 305 с практически все объекты вносят существенный вклад в горение. В помещении формируются три взаимосвязанных вихревых потока: доминирующий в верхней части, который переходит в нижний в припольной области, а также связан с вихрем, сформированным в области вблизи двери у шкафа. Взаимодействие данных трех вихрей носит не-

стационарный характер, что определяет более сложный характер температуры в данный интервал времени. В среднем по помещению температура держится в районе 900 — 1000 К и так как содержание кислорода существенно уменьшилось, то наиболее интенсивно горение идет вблизи двери при притоке кислорода. К 645 с горит только шкаф и температура в помещении постепенно уменьшается. Доминирует вихрь, связанный с продолжающимся горением шкафа и поступлением

кислорода из дверного проема. Это стабилизирует показание температуры.

На рис. 4, 5 представлены графики расчетных температур, полученных на основе кода Fluent для нескольких термопар по двум высотным отметкам помещения. Видно, что хотя на некоторых интервалах времени имеются ощутимые (порядка 200 — 300 К) расхождения расчетных и экспериментальных температур, общий температурный фон по высотным уровням воспроизводится адекватно.

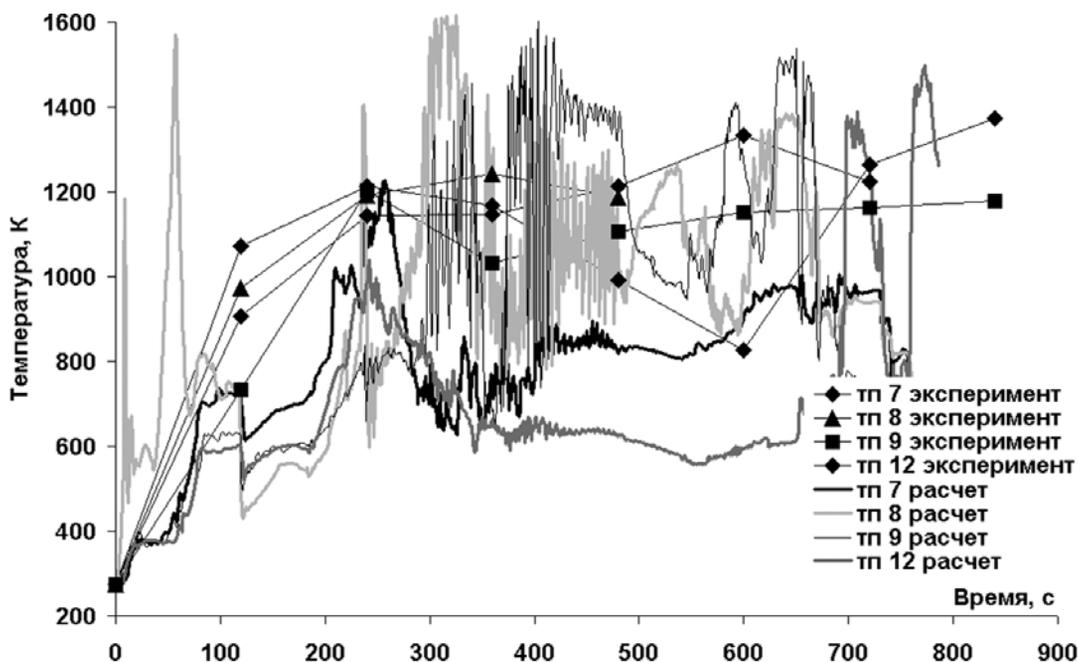


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные значения по коду FLUENT температуры для термопар на высоте 1220 мм от пола

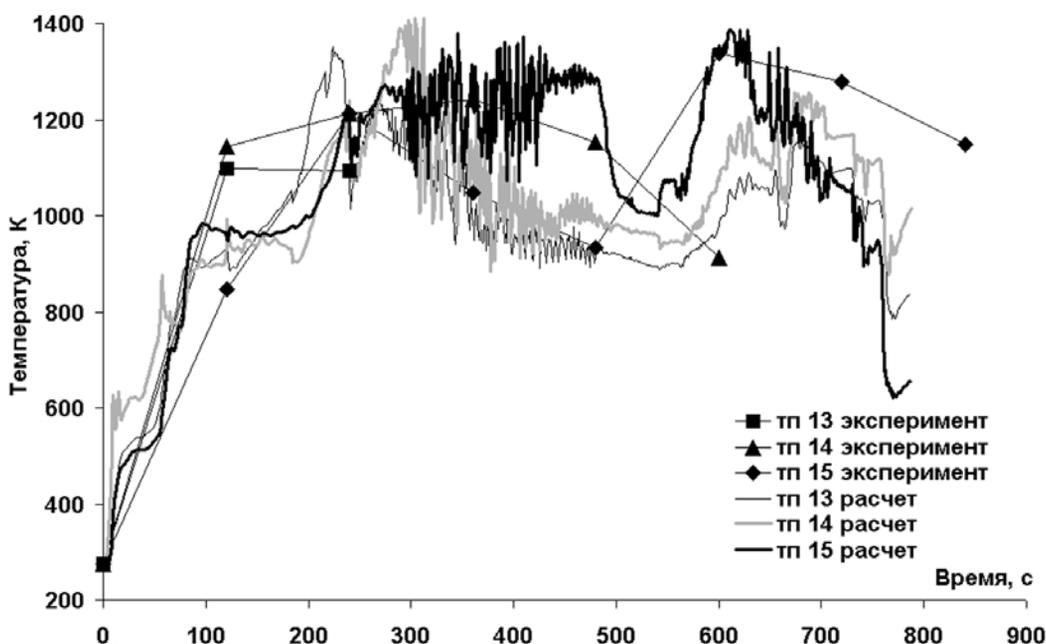


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные значения по коду FLUENT температуры для термопар на высоте 1900 мм от пола

Основными факторами, влияющими на развитие пожара, являются процессы накопления под потолком слоя горячих газов и вентиляции помещения через дверной проем. Накопление горячего слоя газов хорошо прослеживается в данном численном моделировании. Оно является следствием горения дивана и служит причиной возгорания шкафа, последующего возгорания другой горючей нагрузки. Хорошо известным является факт об опасности такого накопления газов служащих источником теплового излучения. Основным явлением, которое связано с ними является так называемая «вспышка помещения» (flashover), что представляет собой практически мгновенное вспыхивание окружающей горючей нагрузки и переход пожара в развитую стадию, сопровождающуюся сильным повышением температуры. Определение времени данного эффекта и учет подобных процессов в условиях сложной геометрии помещения может быть корректно описано только на основе CFD-кодов.

Моделирование горения в помещении с локализованным источником горения

Эксперимент проводился в полуцилиндрическом помещении объемом 164 м^3 . Точных сведений о степени герметичности нет, но принимается по опытным данным, что общая площадь отверстия, сообщающегося с атмосферой, равна $0,0005 \text{ м}^2$. Горючая нагрузка представлена дизельным топливом, налитым в противень размером $1 \times 0,51 \text{ м}$ и установленным на пол в центре. Других горючих веществ или оборудования в эксперименте не было. Над областью горения было установлено пять термопар на разных высотах. Воспламенение топлива происходило в центре противня с последующим распространением пламени по поверхности. Горение продолжалось до самозатухания по снижению концентрации кислорода на 400-й с. Показания термопар снимались с периодичностью 25 с.

При моделировании, для экономии вычислительных ресурсов, рассматривалась $\frac{1}{4}$ часть реального объекта в предположении симметричности процессов. Общий вид модели и распределение термопар приведены на рис. 6. Для расчетов использовалась гексагональная, равномерная сетка с шагом $0,05 \text{ м}$ и количеством элементов — 363 520. Для исследования сеточной сходимости также использовалась сетка с измельчением центральной области горения с шагом $0,01 \text{ м}$ и количеством элементов — 821 032, основная часть которой оставалась гексагональной. В качестве начальных условий принималось, что объем заполнен неподвижным воздухом (67% азота и 23% кислорода по массе) при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении.

Первоначально расчеты, как и в предыдущем случае, базировались на модели горения EDM (1), (2), для радиационного теплообмена использовалась ДТМ. Принималось, что противень с дизельным топливом глубокий и необходимо предусмотреть в модели алго-

ритм прекращения горения по мере выгорания кислорода. Для этого процесс горения топлива был разбит на две части. Вначале происходит распространение фронта пламени по поверхности до достижения стационарного горения. Далее включается обратная связь, регулирующая количество испаряемого топлива в зависимости от суммарного теплового потока на его поверхности. При выгорании кислорода тепловой поток уменьшается, приводя к уменьшению испаряемого топлива и, в конце, к прекращению горения.

В первоначальных расчетах на основе модели турбулентности k - ϵ , а также на основе других из группы базирующихся на двух дополнительных уравнениях RANS: SST, RNG k - ϵ , k - ω , BSL [11], было получено существенное завышение расчетной температуры по сравнению с экспериментальной. Исследование сеточной сходимости на основе сетки с 821 032 элементами не дало положительных результатов.

Анализ литературы показал (например, [13]), что неправильный учет в модели турбулентности сил всплытия может приводить к существенному завышению значений температур. В k - ϵ -модели подразумевается изотропная турбулентность. Но в рассматриваемом случае в поднимающемся потоке продуктов сгорания происходит турбулентное перемешивание, усиливающееся из-за подъемной силы. В тоже время в стабильных, стратифицированных слоях газов, накопленных вблизи потолка и в других застойных зонах данный эффект будет наоборот затруднен. В k - ϵ -модели в транспортном уравнении для турбулентной кинетической энергии за данный эффект ответственен член [11]:

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

Здесь ρ — плотность; μ_t — турбулентная вязкость; g_i — компонент гравитационного вектора; σ_p — турбулентное число Шмидта.

В транспортном уравнении для ϵ имеется член, связанный с P_{kb} : $P_{eb} = C_3 \max(0, P_{kb})$. В коде CFX по умолчанию турбулентное число Шмидта и коэффициент диссипации C_3 равны 1. В тоже время в коде Fluent по умолчанию турбулентное число Шмидта равно 0,7. Так же в [12] говорится, что имеется мало информации о влиянии сил всплытия на ϵ и поэтому аналог в Fluent P_{eb} приравнивается по умолчанию к 0. То есть можно предложить возможную вариацию C_3 от 0 до 1. В [14] указывается, что в литературе при моделировании процессов горения турбулентные числа Прандтля/Шмидта варьируются в широких пределах и оказывают значительное влияние на результаты моделирования, и в [14] эти числа изменялись в диапазоне 0,25 — 0,85 для совпадения с экспериментальными данными. Поэтому было принято решение об использовании C_3 и σ_p в качестве калибровочных параметров. C_3 варьировалось в диапазоне 1 — 0,01 и σ_p от 0,9 до 0,2. Анализ расчетов

показал, что при уменьшении C_3 и σ_p значения температур находятся ближе к экспериментальным данным, но увеличиваются осцилляции температуры.

Далее были предприняты следующие шаги. Моделирование процессов диффузионного горения, к которым относятся текущие задачи, на основе EDM использует предположение о локальной химической равновесности, которое может быть неточно в отображении неравновесных эффектов — например, загорания и гашения пламени, а также образования промежуточных веществ, таких как CO и H₂. Поэтому предложено использовать альтернативную модель применения локальных фронтов пламени (flamelet), где горение осуществляется в бесконечно тонких фронтах пламени на поверхности соприкосновения топлива и кислорода. Турбулентный фронт представляется совокупностью дискретных стационарных/нестационарных ламинарных фронтов. Ламинарный фронт встраивается в турбулентное горение, используя вероятностную функцию PDF [15]. В модели CFX [11] используется неравновесная версия подхода Burke-Schumann — flamelet-PDF. Так как реальное дизельное топливо содержит множество углеводородных фракций, то в CFX используется библиотека химических реакций для локальных ламинарных фронтов

пламени для суррогатного дизельного топлива. Также отдельные специфические механизмы химических реакций с соответствующими параметрами могут быть найдены на сайтах исследовательских институтов.

Указанный ранее неправильный учет сил всплывания и возникающей при этом стратификации потоков, анизотропии турбулентности характерен для моделей, основанных на приближении Буссинеска типа $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST и др. [16]. Модели замыкания второго порядка в виде транспортных уравнений для компонентов тензора Рейнольдсовских напряжений (RSM) могут решить проблему и были в дополнение использованы. Во всех моделях исследовалось влияние калибровки замыкающих коэффициентов, зачастую полученных 20 — 30 лет назад на основе двухмерных асимптотических задач.

В калибровочных расчетах рассматривались модели: $k-\epsilon$ RNG, SST, два типа RSM, SAS SST [11] и для всех удалось достигнуть существенно лучшего совпадения с экспериментальными данными. Исследование вариации замыкающих коэффициентов показало, что наибольшее влияние дают действия, уменьшающие диссипацию турбулентной кинетической энергии в транспортном уравнении. Сравнение разных расчетов по среднеквадратичной ошибке выявило, что для термодары Тп 9 (рис. 6) все модели за исключением

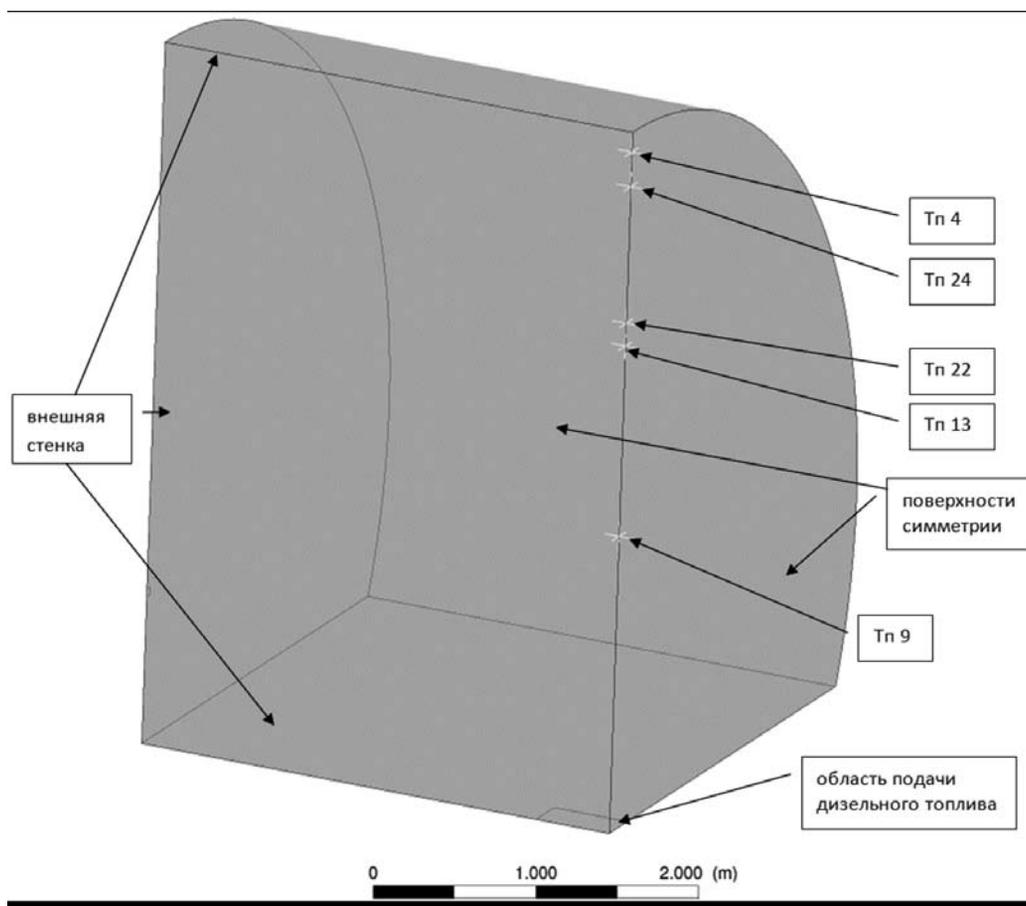


Рис. 6. Геометрия и модель горения с локализованным источником:
Тп 4 — 24 — точки размещения термопар над источником

SAS SST дают близкие результаты. Для SAS SST в этой точке отклонение температуры немного выше. Для остальных термопар SAS SST дает лучшее приближение к эксперименту. На рис. 7 представлены результаты расчета на основе кода CFX для модели SAS SST. Аналогичные результаты получены на основе кода Fluent (рис. 8) по $k-\epsilon$ -модели турбулентности. Видно, что результаты вычислений обоих кодов хорошо воспроиз-

водят температуру в точке, наиболее приближенной к пламени, и несколько завышают данные по остальным термопарам. Также имеется тенденция к их слиянию по сравнению с экспериментом.

Калибровка констант моделей турбулентности имеет недостаток, заключающийся в изменении модели не только в области пламени, но во всем расчетном домене, что может негативно сказываться на точности

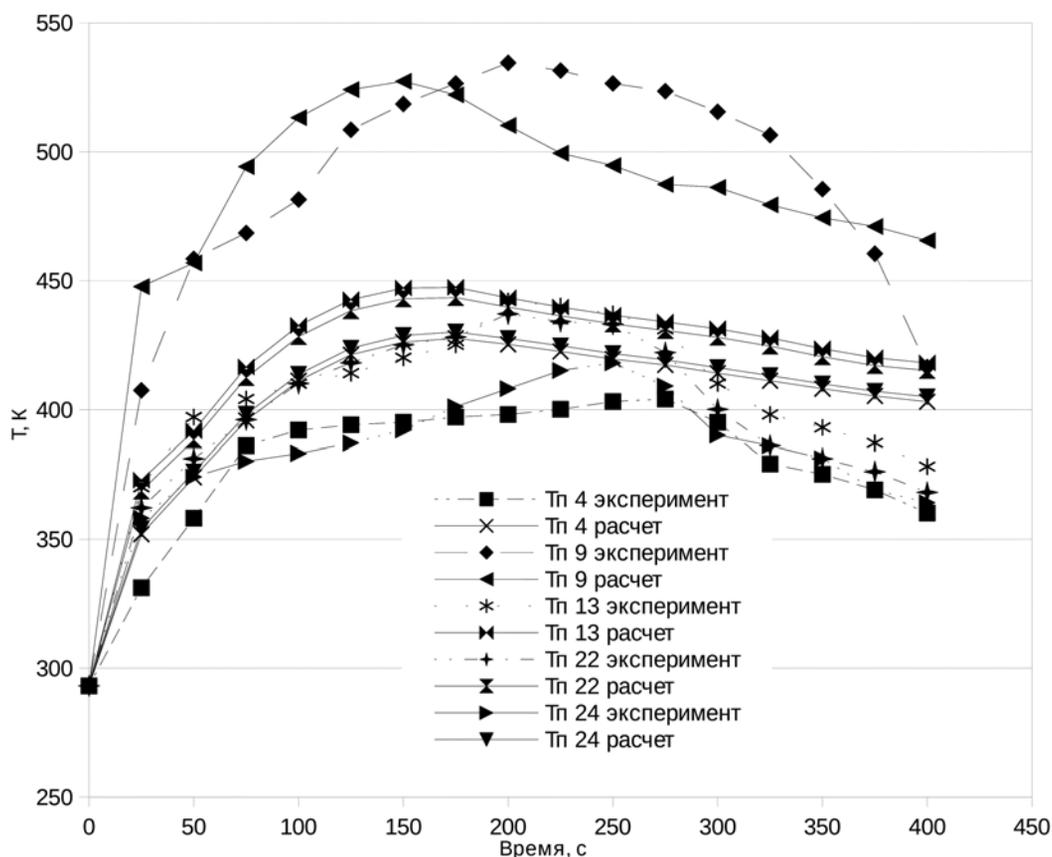


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные значения по коду CFX температуры для термопар

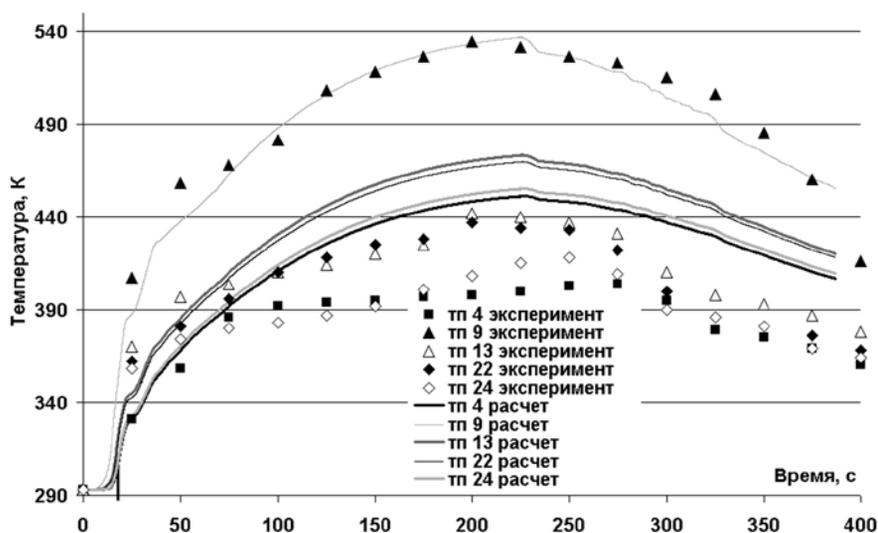


Рис. 8. Экспериментальные и расчетные значения по коду Fluent температуры для термопар

моделирования процессов переноса в этих областях, где общепринятые параметры являются адекватными. В частности, наблюдаемое слияние кривых температур может являться следствием этого процесса. Поэтому дальнейшее исследование может быть направлено на установление функциональной зависимости между генерацией/диссипацией турбулентной энергии и скоростями деформации с учетом эффектов анизотропии и т.п.

Выводы

Полученные результаты моделирования показывают, что CFD-коды могут быть настроены для адекватного отображения экспериментов с инженерной точки зрения. В первом варианте распределенной горючей нагрузки, когда имеется взаимовлияние разных горючих компонент во времени и, вследствие этого, некоторое усреднение результатов, использование параметров моделей CFD-кодов по умолчанию является оправданным и дает близкие к эксперименту результаты. Для второго варианта с локализованной горючей нагрузкой имеющиеся параметры моделей кодов приводят к завышению температур. Накопленный опыт показал, что значимым здесь является адекватное отображение эффектов всплытия и, в частности, калибровка замыкающих коэффициентов совместно с использованием более точных моделей горения позволило достигнуть лучшего приближения к эксперименту. Калибровка в дальнейшем может быть улучшена при связи замыкающих коэффициентов, например, со значениями компонент тензора скорости деформаций.

В практическом плане анализ пожаров с помощью CFD-кодов может служить для настройки и кроссверификации более быстрых, но менее точных моделей на основе зонного моделирования или 1D системных кодов, обобщенных метамоделей. В рамках вероятностного анализа безопасности объектов ТЯЭУ на основе CFD-кодов можно проводить уточненный расчет аварийных процессов приводящих к тяжелым последствиям.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов МВК НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Tech. Rev. Risk-Informed, Performance-Based Methods for Nuclear Power Plant Fire Protection Analyses,

NUREG – 1521. US Nuclear Regulatory Commission, 1998.

2. **Van Hees P. e. a.** Prediction and validation of pool fire development in enclosures by means of CFD Models for risk assessment of nuclear power plants (Poolfire) // Final Rep. Lunds universitet, 2014.

3. **Bonte F., Noterman N., Merci B.** Computer simulations to study interaction between burning rates and pressure variations in confined enclosure fires // Fire Safety J. 2013. V. 62. P. 125 — 143

4. **Yakush S.E.** Uncertainty of tenability times in multiroom building fires // Combust. Sci. Tech. 2012. V. 184. P. 1080 — 1092.

5. **McGrattan K., Rehm R., Baum H.** Large eddy simulations of smoke movement // Fire Safety J. 1998. V. 30. N 2. P. 161 — 178.

6. **Jahn W., Rein G., Torero J.** The effect of model parameters on the simulation of fire dynamics // Fire Safety Sci. 200. V. 9. P. 1341 — 1352.

7. **Jahn W., Rein G., Torero J.L.** A posteriori modelling of the growth phase of Dalmarnock Fire Test One // Building and Environment. 2011. V. 46. P. 1065 — 1073.

8. **NFPA 204.** Standard for Smoke and Heat Venting. National Fire Protection Association, 2007.

9. **Xie W., DesJardin P.** An embedded upward flame spread model using 2D direct numerical simulations // Combust Flame. 2009. V. 156. N 2. P. 522 — 530.

10. **Cooper L.** Compartment fire-generated environment and smoke filling // SFPE Handbook of Fire Protection Eng. Quincy, MA: Society of Fire Protection Eng. and National Fire Protection Association, 2002. P. 3-243 — 3-267.

11. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**, 2011.

12. **ANSYS Fluent Theory Guide**, 2011.

13. **Cox G., Kumar S.** Modeling Enclosure Fires Using CFD // SFPE Handbook of Fire Protection Eng. Quincy, MA: Society of Fire Protection Eng. and National Fire Protection Association, 2002. P. 3-194 — 3-218.

14. **Lei-Yong Jiang, Campbell I.** Reynolds analogy in combustor modeling // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2008. V. 51. Iss. 5 — 6. P. 1251 — 1263.

15. **Norbert P.** Turbulent combustion. Cambridge University Press, 2000.

16. **Wilcox D.C.** Turbulence modeling for CFD. DCW Industries Inc., 1994.

Статья поступила в редакцию 12.05.2016