

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-188-196>

УДК 004.942

## Моделирование сжигания топлива в котлоагрегатах большой и малой производительности для понижения токсичности продуктов горения

Желтухина Е. С.<sup>1\*</sup>, Павлова М. В.<sup>2</sup>, Зиганшин М. Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО "Казэнерго"

ул. Габдуллы Тукая, д.162, 420021, г. Казань, Россия

<sup>2</sup> ООО "Параллак"

ул. Адоратского, д. 29В, 420132, г. Казань, Россия

<sup>3</sup> Казанский государственный энергетический университет

ул. Красносельская, д.51, 420066, г. Казань, Россия

Поступила / Received 10.08.2020

Принята к печати / Accepted for publication 15.09.2020

Рассматриваются вопросы, связанные с выбросом атмосферных загрязнителей при оказании услуг энерго-снабжения и обращения бытового мусора в поселениях. Анализируются пути загрязнения воздуха селитебной зоны токсичными соединениями, которые образуются при существующих методах термообработки мусора, а также при эксплуатации индивидуальных источников теплоснабжения жилых объектов. Вопросы снижения содержания токсичных выбросов в продуктах горения изучаются на основе численного эксперимента средствами вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Рассмотрены топочные процессы в энергетическом котле ТП-14А (Е 220/100) и индивидуальном водогрейном котле Vitocrossal 200 VIESSMANN. Определены адекватные граничные условия процессов аэродинамики, теплообмена и сжигания газового топлива. Численные исследования проведены на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), с замыканием уравнений при помощи двухпараметрической k-ε модели. Процесс горения моделировался как перенос реагирующих веществ Species Transport. Расчеты горения выполнялись по модели рассеивания вихрей Eddy-dissipation. Использовалась схема одноступенчатой реакции окисления до конечных продуктов CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, исходного газообразного топлива — метана для котла VIESSMANN Vitocrossal 200, и продуктов газификации угольной пыли для котла ТП-14А. Определены температурные, скоростные и концентрационные поля в топках исследованных котлов. По результатам выполненных расчетов прогнозируется образование химического недожога и оксидов азота. Показаны возможности численного моделирования таких процессов на основе новых направлений в технологии моделирования Chemkin и применении алгоритма ISAT. Отмечено, что они перспективны и для моделирования кинетики процессов горения при использовании в качестве топлива бытового мусора, однако в этой области исследований их применение пока сильно ограничено вычислительной мощностью доступных процессоров.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** выбросы, загрязнители, твердые бытовые отходы, термообработка, вычислительная гидродинамика, котел, аэродинамика, окисление, угольная пыль, газ, метан

### Адрес для переписки:

Желтухина Е. С.

АО "Казэнерго"

ул. Габдуллы Тукая, д.162, 420021, г. Казань, Россия

e-mail: elizavetazheltukhina@ya.ru

### Address for correspondence:

Zheltukhina E. S.

JSC "Kazenergo"

Gabdulla Tukay str., 162, 420021, Kazan, Russia

e-mail: elizavetazheltukhina@ya.ru

### Для цитирования:

Желтухина Е. С., Павлова М. В., Зиганшин М. Г. Моделирование сжигания топлива в котлоагрегатах большой и малой производительности для понижения токсичности продуктов горения. Надежность и безопасность энергетики. 2020. – Т. 13, №3. – С. 188 – 196.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-188-196>

### For citation:

Zheltukhina E. S., Pavlova M. V., Ziganshin M. G. Modeling of fuel combustion in boilers of large and small capacity to reduce the toxicity of combustion products. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of power Industry. 2020, vol. 13, no. 3, pp. 188 – 196. (in Russian)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-188-196>

## Modeling of fuel combustion in boilers of large and small capacity to reduce the toxicity of combustion products

**Zheltukhina E. S.<sup>1\*</sup>, Pavlova M. V.<sup>2</sup>, Ziganshin M. G.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> JSC "Kazenergo"

Gabdulla Tukay str., 162, 420021, Kazan, Russia

<sup>2</sup> LLC "Parallax"

Adoratsky str., 29B, 420132, Kazan, Russia

<sup>3</sup> Kazan State Power University

Krasnosel'skaya str., 51, 420066, Kazan, Russia

The issues related to the emission of atmospheric pollutants during the provision of energy supply services and the circulation of household waste in settlements are considered. The ways of air pollution of the residential area with toxic compounds, which are formed by the existing methods of heat treatment of waste and during the operation of individual sources of heat supply for residential buildings, are analyzed. The issues of reducing the content of toxic emissions in combustion products are studied based on a numerical experiment using Computational Fluid Dynamics (CFD). Furnace processes in the energy boiler TP-14A (E 220/100) and the individual hot water boiler Vitocrossal 200 VISSMANN are considered. The appropriate boundary conditions for the processes of aerodynamics, heat exchange and combustion of gas fuel have been defined. Numerical researches were carried out based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS), with the closure of the equations using the two-parameter k-ε model. The combustion process was modeled as the transport of reactants Species Transport. The combustion calculations were performed using the Eddy-dissipation model. The scheme of a one-stage oxidation reaction to the final products of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O, the initial gaseous fuel — methane for the VISSMANN Vitocrossal 200 boiler, and the products of coal dust gasification for the TP-14A boiler was used. The temperature, velocity and concentration fields in the boiler fireboxes have been determined. Based on the results of the calculations performed, the formation of chemical underburning and nitrogen oxides is predicted. The possibilities of numerical modeling of such processes are shown based on new directions in Chemkin modeling technology and the application of the ISAT algorithm. It is noted that they are also promising for modeling the kinetics of combustion processes using household waste as a fuel, but in this area of research, their application is still strongly limited by the computing power of available processors.

**KEYWORDS:** emissions, pollutants, municipal solid waste, heat treatment, computational fluid dynamics, boiler, aerodynamics, oxidation, coal dust, gas, methane

Известно, что городская воздушная среда заметно отличается от атмосферного воздуха на удалении от селитебной зоны, а в потерю ее качества вносит свою лепту множество источников — транспорт, энергетика, промышленность и весь комплекс объектов ЖКХ, включая кварталы жилой застройки с объектами бытового обслуживания населения. Из последних при этом до пандемии не являлись исключением производственные выбросы даже мини-предприятий с видами экономической деятельности по коду<sup>1</sup> 96.02 ОКПД 2 [1]. Считается, что из стационарных источников наибольший вклад в загрязнение воздуха населенных пунктов вносят объекты большой энергетики и инфраструктуры коммунального хозяйства (его очистные сооружения и полигоны ТБО). По массовому выбросу основными среди загрязнителей (до 80% без учета парниковых газов) являются сернистый ангидрид SO<sub>2</sub>, оксиды азота NO<sub>x</sub> и оксид углерода CO. Подходя к проблеме национального здоровья с учетом токсического

воздействия загрязнителей различных источников и определяя в соответствии с этим их числовые рейтинговые оценки, например, по методике [2], можно обнаружить, что влияние большой энергетики на городской воздух преувеличено. Замена крупных источников выбросов множеством мелких рассредоточенных вплоть до индивидуальных теплогенераторов в многоквартирных домах, привела к снижению роли централизованной генерации в загрязнении воздушной среды. Сейчас в России соотношение централизованного и децентрализованного теплоснабжения в целом может быть оценено как 2:1, а касательно теплоснабжения населения приближается к паритету. Отметим, что токсичные соединения выбросов газовой энергогенерации представлены NO<sub>x</sub> и CO, относящихся к классу умеренно опасных веществ. При этом высотные трубы большой энергетики рассчитаны на разбавление и удаление загрязнителей от населенного пункта, а выбросы мелких теплоисточников остаются по соседству с генерирующим устройством.

Подсчет числовых рейтингов источников выбросов с учетом токсичности загрязнителей [2] позволяет еще обнаружить, что централизованные и децентрализованные генерирующие объекты, даже взятые в совокупности, по загрязнению воздушной среды не находятся

<sup>1</sup> Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности ОК 034-2014 - ОКПД 2. Код 96.02. Услуги парикмахерских и услуги салонов красоты прочие. Принят и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 31.01.2014 N 14-ст.

впереди предприятий ЖКХ, занимающихся оборотом твердых и жидких бытовых отходов. Так, например, на полигонах ТБО анаэробно образуется так называемый «свалочный» газ с выходом до 2–5 тыс. м<sup>3</sup>/ч, что на 3 порядка ниже выброса дымовых газов ТЭЦ. В зависимости от срока хранения ТБО «свалочный» газ на 90% и более будет состоять из NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>. Все это характеризовало бы его как несущественный источник атмосферного выброса, но оставшаяся часть загрязнителей представлена высокотоксичными веществами, в том числе фуранами и диоксинами. Так, например, в составе свалочного газа на полигоне «Кучино» (Московская обл.)<sup>2</sup> идентифицировано 157 наименований веществ. Среди них углеводородов 74 (суммарная концентрация  $c_{\Sigma} = 61 - 80$  мг/м<sup>3</sup>), кислородсодержащих 53 ( $c_{\Sigma} = 24 - 44$  мг/м<sup>3</sup>), серосодержащих 22 ( $c_{\Sigma} = 6 - 11$  мг/м<sup>3</sup>), азотсодержащих 2 ( $c_{\Sigma} = 0 - 0,6$  мг/м<sup>3</sup>), хлорсодержащих 3 ( $c_{\Sigma} = 0,18 - 2,1$  мг/м<sup>3</sup>), фуранов и пиранов 2 наименования ( $c_{\Sigma} = 0,17 - 1,2$  мг/м<sup>3</sup>). Последние служат индикаторами наличия полихлорированных дибензо-п-диоксинов и дибензофуранов (ПХДД/Ф) — химически стойких загрязнителей, способных накапливаться [3] и вызывать гормональные нарушения иммунной системы, что особенно опасно в условиях коронавирусной пандемии. Поэтому ПДК ПХДД/Ф на порядок ниже, чем ПДК боевых отравляющих веществ, и на 7–8 порядков ниже, чем ПДК NO<sub>x</sub> и CO, то есть выброс 1 мг диоксина соразмерен с выбросом 10–100 кг NO<sub>x</sub>.

Достаточно распространено непосредственное сжигание бытового мусора в качестве твердого топлива в топках парогенераторов «мусорных» ТЭС (МТЭС). Вместе с тем это основные поставщики ПХДД/Ф в атмосферу. Для уменьшения образования токсичных соединений при сжигании как традиционного топлива, так и мусора, особенно важно определить последовательность элементарных стадий трансформации исходных компонентов в термоокислительной зоне. При горении ТБО с температурой выше 1200–1300°C происходит термодеструкция органических и хлорорганических материалов в присутствии металлов и их оксидов. Промежуточные газообразные соединения — в основном радикалы и атомы, по ходу охлаждения реагируют между собой до конечных стабильных продуктов и конденсируются. Считается, что ПХДД/Ф генерируются при остывании от 650 до 250°C, и их основная часть осаждается на взвешенной в продуктах сгорания золе [4]. Заметно влияет на увеличение выхода ПХДД/Ф наличие ароматических углеводородов, меди и других металлов [5], присутствие же в высокотемпературной зоне диоксида серы SO<sub>2</sub> понижает концентрации диоксинов в продуктах сгорания [6]. В отдельных случаях возможно создание условий для совместного термообезвреживания токсичных газов и металлов, например, с восстановлением соединений шестивалентного хрома до трехвалентного [7].

В целом картина формирования ПХДД/Ф при сжигании ТБО еще недостаточно ясна [8]. Рекомендации по снижению их генерации имеются только в общих чертах и сводятся к следующему: температура в зоне горения — не ниже 1200–1300°C, время пребывания в ней газообразных продуктов термодеструкции ТБО — не менее 2–4 с; в последующем обязательна «закалка» (резкое охлаждение) продуктов горения до 200°C [9]. При этом исследования по кинетике реакций на основе натурального и численного эксперимента проведены пока только для отдельных сочетаний исходных компонентов [10, 11].

## 1. Методы

Рассматриваются результаты численного моделирования топок парового котла Е-220/100 (ТП-14А, производитель ОАО ТКЗ «Красный котельщик») паропроизводительностью 220 т/ч и газового напольного конденсационного котла Vitocrossal 200 (производитель VIESSMANN Group) теплопроизводительностью 400 кВт. Геометрическое моделирование топки ТП-14А для исследования сгорания низкосортного топлива и мусора выполнялось с помощью программного продукта Gambit со средой эмуляции Exceed. Выбор типа парогенератора продиктован возможностью верификации результатов моделирования по данным испытаний, проведенных на аналогичном парогенераторе Кумертауской ТЭЦ<sup>3</sup>. Численное моделирование, несмотря на его очевидные преимущества, основано на значительном количестве допущений и эмпирических констант, полученных для конкретных условий, и требует сопоставления с опытными данными [12]. Построения численной модели топки ТП-14А и выбор ее настроек в программе ANSYS Fluent проведены с учетом следующих положений.

Топочная камера имеет призматическую форму с размерами  $a \times b \times h = 9912 \times 7160 \times 17200$  мм. Объем топочной камеры котла ТП-14А 1220 м<sup>3</sup>. Имеются четыре основные фронтальные пылеугольные щелевые горелки производительностью 18 т/ч по бурому углю, установленные горизонтально, и две газомазутные горелки на боковых стенах. Над фронтальными горелками располагаются четыре наклонные сбросные горелки. Пространственная дискретизация расчетной зоны выполняется по методу конечных объемов (control-volume-based finite volume method CV-FVM). Грани рассчитываемого трехмерного элемента совпадают с гранями ячейки исходной сетки, а расчетным узлом служит центр геометрической ячейки. Сначала в программе Gambit была выполнена геометрически точная модель топки с холодной воронкой и всеми горелками — (рисунок 1 а). Однако неструктурированная гексаэдральная сетка в ней средствами Gambit не сгенерировалась, по-видимому, из-за сложности связывания фронтальных горизонтальных и наклон-

<sup>2</sup> Проект рекультивации полигона ТБО «Кучино» на территории городского округа Балашиха Московской области. Проектная документация. Подраздел 6. Система газоснабжения. Книга 1. Система дегазации полигона (сбор и отведение биогаза). ЗАО Спецгеоэкология 2017:281.

<sup>3</sup> Каверин А. А. Исследование факельного сжигания низкосортного твердого топлива угрубленного помола в системе прямоточных турбулентных струй // М.: ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» 2017:212.

ных горелок прямоугольной формы и боковых круглых горелок. Поэтому было решено оставить только основные фронтальные горелки; при этом отказались также и от воронки как создающей заметное усложнение модели при несущественном влиянии на кинетику топочных процессов — (рисунок 1 б). На рисунке 1 в представлена упрощенная 3D модель топочной камеры котла со сгенерированной неструктурированной гексаэдральной сеткой.

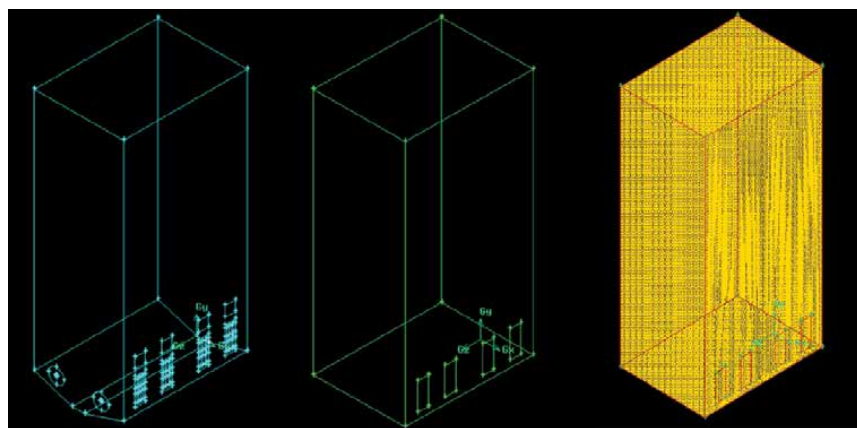
Далее полученная модель переносится в процессор Ansys Fluent, проверяется импортированная геометрия и сетка, которая играет важную роль в минимизации возможных ошибок расчета. Движение потоков в топке рассчитывается на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS, Reynolds-averaged Navier-Stokes). Для замыкания уравнений Навье-Стокса используется двухпараметрическая  $k-\varepsilon$  модель, добавляющая уравнения генерации кинетической энергии турбулентности и ее диссипации. Ввиду неизоотермичности задачи в панели Energy (энергия) включается уравнение энергии («EnergyEquation»). При решении задачи используется модель излучения P1. Поскольку в топке предусматривается горение как газовой, так и твердой диспергированной среды (угольная пыль, частицы органики бытовых отходов, зола), принята Composition PDF Transport — композиционная транспортная модель на основе функции плотности вероятностей, Probability density function (PDF). Ее удобно использовать для моделирования кинетики химических реакций с конечной скоростью в турбулентных пламенах, хотя она и требует повышенных вычислительных затрат. Средняя скорость реакции моделируется с помощью модели вихревой диссипации («Eddy-Dissipation»). После определения моделей заданы следующие исходные условия процесса в топке: давление атмосферное 101325 Па, температура отсчета приращения температуры для расчета плотности газового потока по модели Буссинеска, 288 К. В задачу загружен

материал реакций — «уголь – летучие горючие – воздух» (coal – mv – volatiles – air)

При установке граничных условий для стенок котла ставится условие Wall (стенка) и во вкладке Thermal задается температура поверхности стенок котла, равная 473 К, соответствующая температуре поверхности экранов. В качестве граничных условий для потока на входе пылеугольных горелок задается условие Velocity Inlet (равномерная скорость на входе). Во вкладке Momentum (импульс) задается значение скорости потока, 0,00042 м/с, подсчитанное по производительности котла. Во вкладке Thermal задается температура пылевоздушного потока во входном сечении пылеугольных горелок 430 К. Во вкладке Species (реагенты) задаются массовые доли угольной пыли (35,3%) и кислорода (14,88%) на входе в пылеугольные горелки. В качестве граничных условий для дымовых газов в выходном сечении топки задано условие Pressure Outlet (давление на выходе) со значением Gauge Pressure (избыточное давление) 0 Па, т.е. без учета разрежения. Это необходимо для устранения фиктивного возвратного потока (Backflow), который возник бы при разрежении. Во вкладке Thermal задана температура в выходном сечении, равная 1173 К. Во вкладке Species задаются массовые доли углекислого газа (25%) и паров воды (15%) на выходе из верхней части котла.

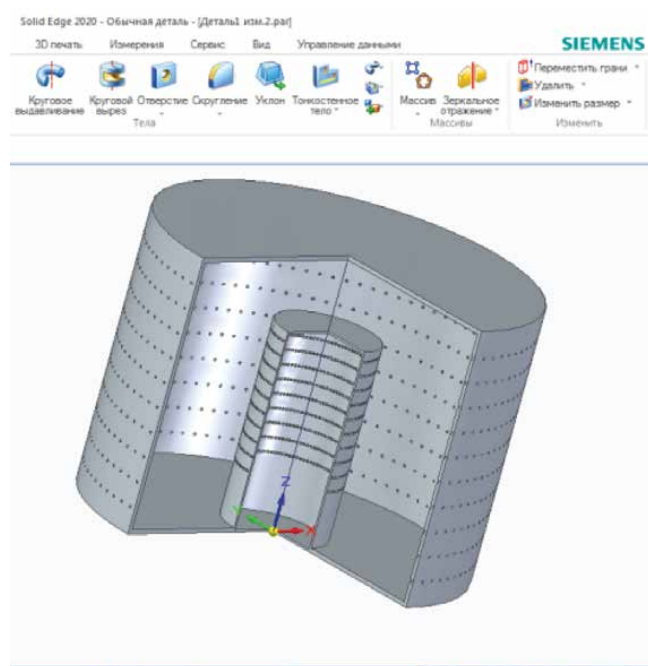
Далее рассматривается построение численной модели топки бытового котла Vitocrossal 200. Геометрия топки была создана в упрощенном варианте средствами Gambit — Exceed и более точно при помощи программного продукта Solid Edge. Горелочное устройство Vitocrossal 200 представляет собой перфорированный цилиндр, размещенный аксиально в водоохлаждаемой цилиндрической топке из нержавеющей стали. Дымовые газы выходят из топки через 18 вертикальных щелевых проходов в торце, противоположном торцу с горелкой, и попадают в специальную камеру с теплообменными поверхностями, после которой направляются в дымоход. Со-

ответствующая модель топки была создана в Solid Edge, однако сгенерировать в ней сетку не удалось, так как оказалось затруднительным связать круглые газовыпускные отверстия, располагающиеся на поверхности горизонтального цилиндра, со щелевыми проходами на плоской вертикальной стенке. Поэтому была создана модель с упрощенной геометрией (рисунок 2), для которой оказалась возможной генерация сетки после ее переноса в Gambit (рисунок 3). Она представляет собой два коаксиальных цилиндра с кольцевыми щелевыми проходами. Площади проходов на горелке и топочной камере выполнены согласно расходу топлива, обеспечивающему заданную мощность котла. Данная



**Рисунок 1.** 3D-модели топочной камеры котла ТП-14А в программе Gambit: а — геометрически точная модель, б — геометрия упрощенной модели, в — упрощенная модель топочной камеры парового котла ТП-14А со сгенерированной расчетной сеткой

**Figure 1.** 3D-models of the TP-14A boiler combustion chamber in the Gambit program: а — geometrically accurate model, б — geometry of the simplified model, в — simplified model of the TP-14A steam boiler combustion chamber with a generated computational grid

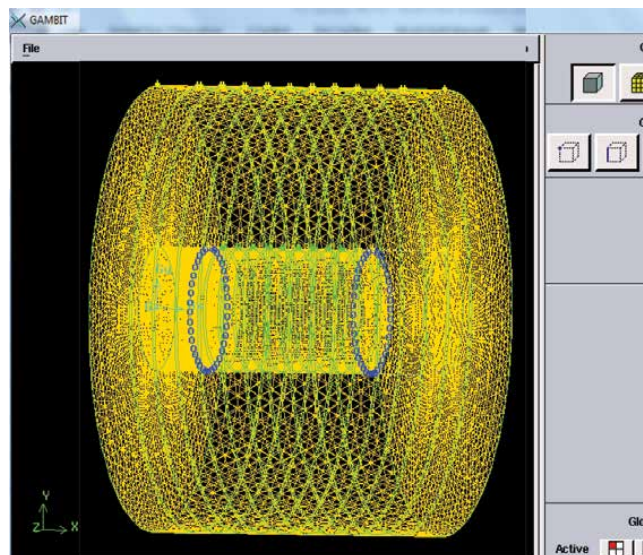


**Рисунок 2.** Геометрическая модель топки котла Vitocrossal 200, построенная в системе Solid Edge

**Figure 2.** Geometric model of the Vitocrossal 200 boiler furnace built in Solid Edge

постановка геометрии позволила в дальнейшем облегчить и постановку граничных условий по теплоотдаче, сосредоточив ее только на боковой поверхности внешнего цилиндра, с заданием на торце постоянной температуры, что приблизительно соответствует реальным условиям в топке.

Созданная модель со сгенерированной сеткой (рисунок 2) экспортировалась в процессор AnsysFluent. Далее производилось решение задачи объемной модели 3ddp с двойным уточнением решений. При задании начальных и граничных условий для расчета процесса горения принята метановоздушная смесь (тип материала «MaterialType» — воздух + метан). Модель горения принята как перенос горючих реагентов «Species Transport», модель смешения компонентов реакции — как вихревая диссипация «Eddy-Dissipation». Движение смеси турбулентное, модель турбулентности включает дополнительно к дифференциальным уравнениям движения и сплошности уравнения генерации  $k$  и диссипации  $\epsilon$  турбулентных вихрей. Для учета лучисто-конвективного теплообмена включены уравнение энергии «EnergyEquation» и модель излучения P1. При задании граничных условий для боковых и торцевой тепловоспринимающих стенках топки принят одинаковый тип зоны «Wall», в тепловых граничных условиях Thermal ставится условие по температуре «Temperature»: для стенок с правой стороны (на входе газа)  $T=300$  K, для левого торца  $T=353$  K. При установке граничных условий в зоне выхода дымовых газов (у боковой стенки внешнего цилиндра) установлено условие по давлению Pressure outlet — атмосферное давление на выходе, по температуре «Temperature»  $T=353$  K.



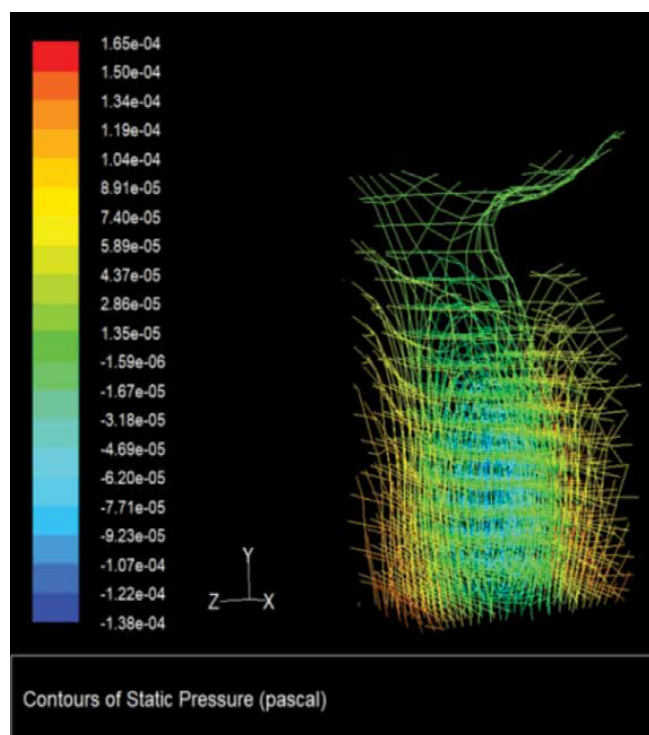
**Рисунок 3.** Расчетная сетка на поверхности и в объеме геометрической модели топки котла Vitocrossal 200, сгенерированная средствами Gambit

**Figure 3.** Computational grid on the surface and in the volume of the geometric model of the furnace of the Vitocrossal 200 boiler, generated by Gambit

## 2. Результаты и обсуждение

За эталонные опытные данные по топочным процессам в энергетических котлах приняты результаты отмеченного ранее исследования парогенератора Кумертауской ТЭЦ [4]. Верификация и валидация по полученным в нем данным показали физическую адекватность модели, созданной в нашей работе. В качестве примера на рисунке 4 представлены данные о распределении статического давления в топке котла ТП-14А при установленных в качестве исходных параметров атмосферного давления в топке и условия отсутствия избыточного давления на выходе из нее (Pressure Outlet со значением Gauge Pressure = 0 Па). Можно видеть, что в результате расчетов числовые значения давления в топке близки к атмосферному, и обратных токов не наблюдается. Также на рисунках 5 а, б представлены результаты численных расчетов по выходу летучих горючих и догоранию их до  $\text{CO}_2$  в различных зонах топки котла при подаче пылеугольного потока в 4 основные горелки и газификации угольной пыли. Приведенные данные показывают, что максимальный выход летучих и их наиболее полное догорание до  $\text{CO}_2$  происходят над уровнем расположения горелок, что можно считать физически адекватным.

Вместе с тем для корректного моделирования задач обработки нетрадиционного топлива, в том числе бытового мусора с содержанием соединений хлора, фосфора, серы, недостаточно добиться только физической адекватности численной модели. Она должна давать адекватные решения и по последовательности прохождения элементарных стадий радикально-цеп-

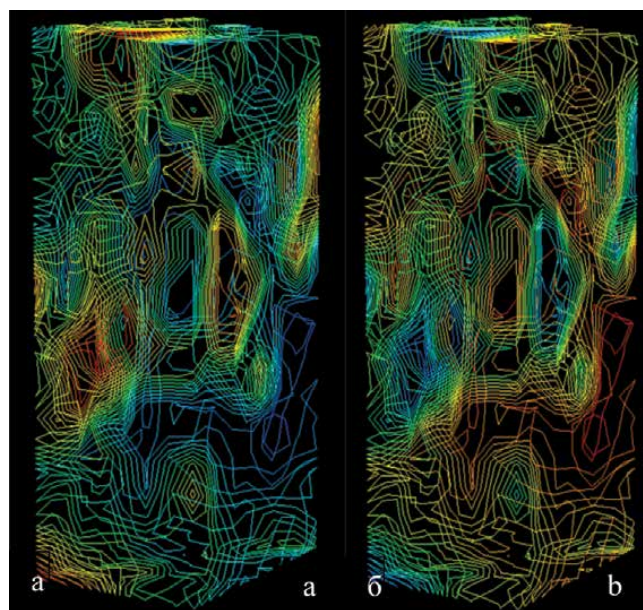


**Рисунок 4.** Расчетные данные по распределению статического давления в топке котла ТП 14А

**Figure 4.** Calculated data on the distribution of static pressure in the boiler furnace TP 14A

ного механизма химических реакций между активными центрами — продуктами трансформации исходных материалов (например, ПВХ-пластмасс) и традиционного топлива в высокотемпературной зоне до конечных продуктов (например, до  $\text{HCl}$ ,  $\text{HClO}_x$ ). Решения подобной задачи на сегодня нет, тогда как программа развития МТЭС уже реализуется, а в соответствии с последними директивными документами<sup>4</sup> технологические показатели наилучших доступных технологий термообезвреживания отходов по выбросам диоксинов в атмосферный воздух не должны превышать  $10-7 \text{ мг/м}^3$ . При этом конкуренция окислительных реакций с кислородом и хлором и наложение на нее ингибирующих эффектов от фосфорорганических соединений приводит к непредсказуемым результатам не только по химическим, но и по физическим характеристикам процесса даже при сжигании чисто органической биомассы. Конкурентный механизм пиролиза различных компонентов биомассы приводит к значительному изменению кинетических параметров пиролиза, и, соответственно, состава выделяемых летучих продуктов, что существенно влияет на температуру и распределение реагентов в реакторе. Такие отклонения могут моделироваться только на специальных ко-

<sup>4</sup> Приказ Минприроды России от 24.04.2019 N 270 "Об утверждении нормативного документа в области охраны окружающей среды "Технологические показатели наилучших доступных технологий обезвреживания отходов термическим способом (сжигание отходов)" (Зарегистрировано в Минюсте России 27.05.2019 N 54738).



**Рисунок 5.** Результаты расчетов по выходу летучих горючих (а) и по их догоранию (б) до  $\text{CO}_2$

**Figure 5.** Calculation results for the release of volatile fuels (a) and afterburning (b) to  $\text{CO}_2$

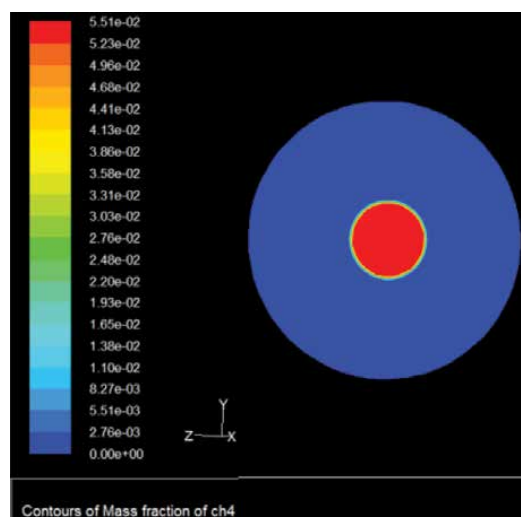
дах CFD, разработанных под каждый случай, или на существующих кодах CFD для моделирования сжигания угля, адаптированных с учетом отличий его состава и параметров процесса догорания до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  от характеристик компонентов мусорного топлива.

Последние версии ANSYS включают модернизированный код кинетики процессов горения Chemkin в виде программного пакета ANSYS Chemkin-Pro для газофазных и поверхностных химических процессов. Он содержит ряд кинетических моделей, позволяющих моделировать выбросы загрязняющих веществ с подробным и точным составлением модели топлива. Для стандартного топлива существуют тщательно верифицированные и валидированные модели, дающие близкие к реальным результаты. Исследования с использованием Chemkin-Pro по образованию диоксинов связаны с рассмотрением процессов термообработки только отдельных ингредиентов, например, формирования двух видов конечных диоксинов — 1,3,6,8- и 1,3,7,9-тетрахлордибензо-пара-диоксинов, ТХДД (1,3,6,8- & 1,3,7,9-tetrachlorodibenzo-p-dioxins, TCDDs) из одного вида исходного хлорорганического соединения — 2,4,6-трихлорфенола с использованием моделей, содержащих порядка 70 элементарных стадий. Очевидно, что охват широкого круга исходных соединений, которые могут возникать при термообработке бытового мусора, требует слишком большой вычислительной мощности. Поэтому пока реальным путем исследования кинетики процессов при мусоросжигании представляется жесткое ограничение в модели числа исходных соединений с рассмотрением формирования одного из наиболее токсичных продуктов, и с последующей адаптацией к данной кинетике всех топочных процессов, адекватность которых должна

быть проверена на стандартном топливе, например, на пылеугольном.

Исследования моделей топочного процесса бытовых котлов, работающих на стандартном газовом топливе, в отношении вычислительной мощности несколько более доступны, прежде всего благодаря тому, что исходный многокомпонентный природный газ без заметного ущерба для течения процессов гидродинамики и теплообмена может быть представлен одним компонентом — метаном  $\text{CH}_4$ . Однако в любом случае необходимо учитывать, что элементарные стадии химических реакций между активными центрами развиваются по радикально-цепному механизму. Это требует рассмотрения сотен вариантов реакций, незначительно различающихся между собой по кинетическим и термодинамическим параметрам, и подбора из них непротиворечивой последовательности, соответствующей температурным, аэродинамическим и геометрическим характеристикам топки. В последние десятилетия для этих целей практиковался алгоритм адаптивного табулирования реакций «ин ситу» (в понимании «по их моменту появления и локации в пламенной зоне») ISAT (in situ Adaptive Tabulation), в который сейчас внесен ряд усовершенствований, позволяющих повысить его устойчивость и скорость без снижения уровня точности [13, 14, 15]. Однако они адаптированы к двигателям внутреннего сгорания и при переходе к котлам нуждаются в валидации.

При исследовании расчетной модели бытового котла Vitocrossal 200 первоочередной задачей было обеспечение физически адекватных характеристик топочных процессов. На рисунках 6 а, б представлены расчетные данные по температуре в топке котла Vitocrossal 200, показывающие адекватное распределение температуры как по объему, так и в поперечном сечении топки. Температурному распределению также адекватно распределение концентраций  $\text{CO}_2$ : максимуму температуры по центру сечения топки (рисунок 6 б) соответствует



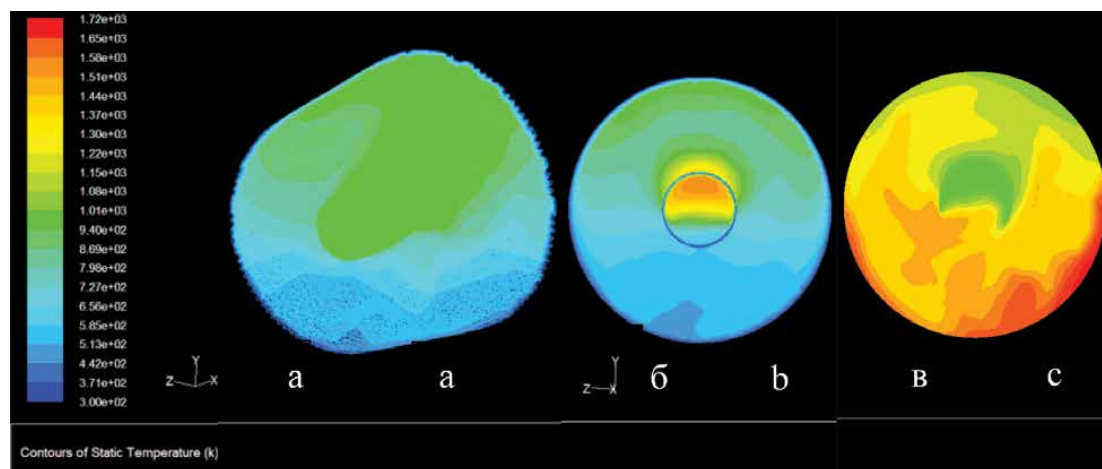
**Рисунок 7.** Распределение концентрации метана в поперечном сечении топки котла Vitocrossal 200

**Figure 7.** Distribution of methane concentration in the cross-section of the Vitocrossal 200 boiler furnace

наиболее интенсивная реакционная зона (рисунок 6 в) с минимумом содержания  $\text{CO}_2$  как конечного продукта реакции.

На рисунке 7 приведено распределение массовой концентрации  $\text{CH}_4$ . Можно видеть, что в горелке находится чистый газ с концентрацией 5,51% мас., что соответствует его исходному составу в газозооной смеси с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ .

Газ загорается на выходе из горелки, и  $\text{CH}_4$  сразу конвертируется в тонком слое вокруг нее. Далее в объеме топки концентрация метана равна 0. Однако по одноступенчатой модели окисления невозможно предсказать, насколько конверсия  $\text{CH}_4$  доходит до конечного продукта. Ранее в работе [16] нами было показано, что конверсию метана в стесненных условиях сжигания газа, к которым могут быть отнесены и условия в топке



**Рисунок 6.** Распределение температуры и содержания в топке котла Vitocrossal 200: а, б — распределение температуры в объеме и поперечном сечении, в — распределение  $\text{CO}_2$

**Figure 6.** Distribution of temperature and content in the furnace of the Vitocrossal 200 boiler: а, б — temperature distribution in the volume and cross-section, в —  $\text{CO}_2$  distribution

котла Vitocrossal 200, можно устанавливать оценочно по величине градиента  $\nabla_{VR}$ , характеризующего убывание скорости продуктов сгорания в пламенной зоне топочного пространства. Для данного устройства он составляет около  $30 \text{ с}^{-1}$ , что может говорить о достаточно высокой конверсии метана (что косвенно подтверждается и результатами расчетов на рисунке 7) и очень низком химическом недожоге. В то же время это служит и показателем повышенной генерации оксидов азота в пламенной зоне при горении топлива.

### 3. Выводы

Анализ путей загрязнения воздуха селитебной зоны показывает, что негативная роль большой энергетики в этом вопросе преувеличивается. В связи с продолжающейся децентрализацией теплоснабжения жилого фонда вклады большой энергетики и децентрализованных источников в ухудшение состояния атмосферы сближаются, а в совокупности они не превосходят воздействия на городскую воздушную среду выбросов, образующихся при обращении бытового мусора, в связи с чрезвычайной токсичностью последних. Представленные способы моделирования обеспечивают физическую адекватность численных моделей топочных устройств и могут быть использованы для исследований топок современных бытовых теплоисточников с конструктивными особенностями, а также процессов термообработки нестандартных видов топлива и бытового мусора. Так как общих способов, дающих адекватные решения по кинетике реакций в процессах термообработки отходов и сжигания топлива на сегодня нет, то практически применимым подходом к исследованиям по снижению вредных выбросов является ограничение моделей исходных соединений и конечных продуктов по числу компонентов. В статье также показана адекватность предложенного ранее параметра  $\nabla_{VR}$  для оценки совершенства топочного процесса по полноте сжигания стандартного топлива.

### Список использованных источников

1. Logachev K. et al. Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops. *Build. Environ* 2020; (181): 107124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107124>
2. Зиганшин М. Г. Методика оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса загрязнителей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики* 2019; 21(6): 29–38. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-29-38>
3. Feng Z., Xiaofei L., Jia-Wei L., Jing H., Jieru Z., Bing X., Chengyang H. Emission characteristics of PCDD/Fs in stack gas from municipal solid waste incineration plants in Northern China. *Chemosphere* 2018; (200): 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.092>
4. Тугов А. Н. Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов на ТЭС: монография А. Н. Тугов // М.: ОАО «ВТИ» 2017; 178.
5. Xiaoqing L., Yunfeng M., Zhiliang C., Xiaodong L., Shengyong L., Jianhua Y. Effect of different air pollution control devices on the gas/

solid-phase distribution of PCDD/F in a full-scale municipal solid waste incinerator. *Environmental Pollution* 2020; (265): 114888. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114888>

6. Meihui R., Zhenzhong Y.L., Lin X., Qiqi L., Xuefeng Z., Ying Y., Yun F., Yuan G., Jiping C., Haijun Z. Partitioning and removal behaviors of PCDD/Fs, PCBs and PCNs in a modern municipal solid waste incineration system. *Science of The Total Environment* 2020; (735): 139134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139134>

7. Bilalov M. I., Ziganshin M. G. Estimates of the influence of the solar irradiation spectrum energy on the intensity of heat treatment of solid waste with hexavalent chromium. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2019; (481): 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012044>

8. Yun F., Meihui R., Haijun Z., Ningbo G., Yun L., Ning Z., Liang Z., Yuan G., Jiping C. Levels and fingerprints of chlorinated aromatic hydrocarbons in fly ashes from the typical industrial thermal processes: Implication for the co-formation mechanism. *Chemosphere* 2019; (224): 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.117>

9. Тугов А. Н., Рябов Г. А., Штерман А. В., Майданик М. Н. Опыт освоения современных котельных установок российского производства. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики* 2018; 20(7–8): 87–98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-87-98>

10. Hongting Ma, Na Du, Xueyin Lin, Chaofan Liu, Jingyu Zhang, Zhuangzhuang Miao. Inhibition of element sulfur and calcium oxide on the formation of PCDD/Fs during co-combustion experiment of municipal solid waste. *Science of the Total Environment* 2018; (633): 1263–1271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.282>

11. Min Y., Liu C. J., Shi P. Y., Qin C. D., Feng Y. T., Liu B. C. Effects of the addition of municipal solid waste incineration fly ash on the behavior of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans in the iron ore sintering process. *Waste Manage* 2018; (77): 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.011>

12. Chaudhari P., Ravi B., Bagaria P., Mashuga C. Improved partial inerting MIE test method for combustible dusts and its CFD validation. *Process Safety and Environmental Protection* 2019; (122): 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.009>

13. Xie W., Lu Z., Ren Z., Goldin G. M. Dynamic adaptive acceleration of chemical kinetics with consistent error control. *Combustion and Flame* 2018; (197): 389–399. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2018.08.018>

14. Xie W., Lu Z., Ren. Z. Rate-controlled constrained equilibrium for large hydrocarbon fuels with NTC. *Combustion Theory and Modelling* 2018; (23): 226–244. <https://doi.org/10.1080/13647830.2018.1513566>

15. Zhou H., Li S., Ren Z., Rowinski D. H. Investigation of mixing model performance in transported PDF calculations of turbulent lean premixed jet flames through Lagrangian statistics and sensitivity analysis. *Combustion and Flame* 2017; (181): 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.03.011>

16. Валеев М. Р., Дюдина А. А., Фатихов А. Р., Зиганшин М. Г. Моделирование топочных процессов в современных теплогенераторах малой и средней производительности. *Надежность и безопасность энергетики* 2019; 12(2): 126–134. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-126-134>

### References

1. Logachev K. et al. Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shops. *Build. Environ* 2020; (181):

107124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107124> (In Eng.)

2. Ziganshin M.G. Method of assessment generation efficiency at thermal power plants taking into account emissions of pollutants. *Power engineering: research, equipment, technology* 2019; 21(6): 29–38. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-29-38> (In Russ.)

3. Feng Z., Xiaofei L., Jia-Wei L., Jing H., Jieru Z., Bing X., Chengyang H. Emission characteristics of PCDD/Fs in stack gas from municipal solid waste incineration plants in Northern China. *Chemosphere* 2018; (200): 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.092> (In Eng.)

4. Tugov A. N. Energy utilization of municipal solid waste at thermal power plants: monograph by A. N. Tugov // М.: JSC «VTI» 2017; 178. (In Russ.)

5. Xiaoqing L., Yunfeng M., Zhiliang C., Xiaodong L., Shengyong L., Jianhua Y. Effect of different air pollution control devices on the gas/solid-phase distribution of PCDD/F in a full-scale municipal solid waste incinerator. *Environmental Pollution* 2020; (265): 114888. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114888> (In Eng.)

6. Meihui R., Zhenzhong Y. L., Lin X., Qiqi L., Xuefeng Z., Ying Y., Yun F., Yuan G., Jiping C., Haijun Z. Partitioning and removal behaviors of PCDD/Fs, PCBs and PCNs in a modern municipal solid waste incineration system. *Science of The Total Environment* 2020; (735): 139134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139134> (In Eng.)

7. Bilalov M. I., Ziganshin M. G. Estimates of the influence of the solar irradiation spectrum energy on the intensity of heat treatment of solid waste with hexavalent chromium. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2019; (481): 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012044> (In Eng.)

8. Yun F., Meihui R., Haijun Z., Ningbo G., Yun L., Ning Z., Liang Z., Yuan G., Jiping C. Levels and fingerprints of chlorinated aromatic hydrocarbons in fly ashes from the typical industrial thermal processes: Implication for the co-formation mechanism. *Chemosphere* 2019; (224): 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.117> (In Eng.)

9. Tugov A. N., Ryabov G. A., Shtegman A. V., Maidanik M. N. Development experience of modern made in Russia boiler installations.

*Power engineering: research, equipment, technology* 2018; 20(7–8): 87–98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-87-98> (In Russ.)

10. Hongting Ma, Na Du, Xueyin Lin, Chaofan Liu, Jingyu Zhang, Zhuangzhuang Miao. Inhibition of element sulfur and calcium oxide on the formation of PCDD/Fs during co-combustion experiment of municipal solid waste. *Science of the Total Environment* 2018; (633): 1263–1271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.282> (In Eng.)

11. Min Y., Liu C. J., Shi P. Y., Qin C. D., Feng Y. T., Liu B. C. Effects of the addition of municipal solid waste incineration fly ash on the behavior of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans in the iron ore sintering process. *Waste Manage* 2018; (77): 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.011> (In Eng.)

12. Chaudhari P., Ravi B., Bagaria P., Mashuga C. Improved partial inerting MIE test method for combustible dusts and its CFD validation. *Process Safety and Environmental Protection* 2019; (122): 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.009> (In Eng.)

13. Xie W., Lu Z., Ren Z., Goldin G.M. Dynamic adaptive acceleration of chemical kinetics with consistent error control. *Combustion and Flame* 2018; (197): 389–399. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2018.08.018> (In Eng.)

14. Xie W., Lu Z., Ren. Z. Rate-controlled constrained equilibrium for large hydrocarbon fuels with NTC. *Combustion Theory and Modelling* 2018; (23): 226–244. <https://doi.org/10.1080/13647830.2018.1513566> (In Eng.)

15. Zhou H., Li S., Ren Z., Rowinski D. H. Investigation of mixing model performance in transported PDF calculations of turbulent lean premixed jet flames through Lagrangian statistics and sensitivity analysis. *Combustion and Flame* 2017; (181): 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.03.011> (In Eng.)

16. Valeev M. R., Dyudina A. A., Fatikhov A. R., Ziganshin M. G. Simulation of combustion processes in modern heat generators of low and medium productivity. *Safety and Reliability of Power Industry* 2019; 12(2): 126–134. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-126-134> (In Russ.)

