

Аскарова А.С., Болегенова С.А.,
Бекмухамет А., Мукашева Г.К.

**Численное исследование
характеристик теплообмена
при горении твердого топлива
в пылевидном состоянии
в камере сгорания котла
БКЗ-420**

Askarova A.S., Bolegenova S.A.,
Bekmukhamet A., Mukasheva G.K.

**Numerical investigation of heat
transfer characteristics during
the combustion of solid fuel in
pulverized in the combustion
chamber of the boiler BKZ-420**

Аскарова Ә.С., Бөлегенова С.А.,
Бекмұхамет А., Мұқашева Г.К.

**БКЗ-420 қазандығының жану
камерасында тозаңды көмірлі
қатты отын жану процесінің
жылулық сипаттамаларын
сандық зерттеу**

Данная статья посвящена исследованию тепловых характеристик процесса при горении твердого топлива в пылевидном состоянии в камере сгорания котла БКЗ-420. Наибольшие изменения в распределении температур наблюдаются в центральной части камеры сгорания в области подачи топливной аэросмеси и воздуха через отверстия горелок. Проведение исследования тепловых характеристик является важным этапом моделирования процессов теплопереноса при сжигании пылеугольного топлива, которое позволяет определить температурные поля по всему объему топочной камеры и на выходе из неё. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию тепловых и концентрационных характеристик топочной камеры котла БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ и получены поля температуры. Предложены наилучшие конструкционные параметры топочной камеры котла БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ, на основе которой разработана оптимальная технология сжигания энергетического высокозольного топлива, позволяющая повысить износостойкость энергооборудования и снизить выбросы вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: Турбулентное горение, топливо, факел, аэродинамика течения, тепловые характеристики, распределение температуры.

This article is devoted to the study of thermal characteristics of the process when burning solid fuel pulverized in the combustion chamber of the boiler BKZ-420. The greatest changes in the temperature distribution observed in the central portion of the combustion chamber in the fuel supply and the air fuel mixture through the burner openings. Study thermal characteristics is an important step process modeling heat and mass transfer from the combustion of pulverized coal, which allows to determine the temperature field throughout the volume of the combustion chamber and outlet. Computational experiments on the thermal and concentration characteristics of the combustion chamber of the boiler BKZ-420 Almaty CHP and temperature fields are obtained. Offer the best structural parameters of the combustion chamber of the boiler BKZ-420 Almaty CHP on which to develop an optimal combustion technology of high-energy fuel, allowing to increase the wear resistance of power and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere.

Key words: Turbulent combustion, fuel, torch, aerodynamic flow, thermal characteristics, temperature distribution.

Берілген мақала БКЗ-420 қазандығының жану камерасында тозаңды көмірлі қатты отын жану процесінің жылулық сипаттамаларын зерттеуге бағытталған. Температуралық өрістер бойынша мәліметтер келтірілген. Температуралар үлестірілуінің ең ауқымды өзгерістері жану камерасының орталық облыстарында байқалады, яғни отынды аэроқоспа мен ауаны жанарғы саңылауларынан берілетін аумағында. Жылулық сипаттамаларға зерттеу жүргізу тозаңды көмірлі отынды жағу кезіндегі жылумассатасымалдану процесінің моделдеуде үлкен маңызға ие, онда температуралық өрісті жану камерасының толық көлемі бойынша және сонымен қатар жану қазандығының шығыс аймағында да анықтауға мүмкіндік береді. Алматылық ЖЭО БКЗ-420 жану қазандығының ішкі кеңістігінде жану өнімдерінің жылулық сипаттамаларын зерттеу бойынша есептеуіш эксперимент жүргізілді. Жану қазандығына қосымша ауаны үрлеу жылдамдығы мен әр түрлі шығысының құрамы үшін тозаң көмірлі отынды жағу барысында пайда болатын барлық тозаң-газды қалдықтардың температура өрістері алынды. Алматы ЖЭО 2-нің БКЗ-420 жану қазандығының қабырғаларында байқалатын аса қызып кету процесіне және зиянды заттардың атмосфераға бөлінуін төмендетуге байланысты Екібастұздық күлділігі жоғары қатты отынды жағудың тиімді технологиясы ұсынылды.

Түйін сөздер: Турбуленттік жану, отын, алау, жану камерасы, ағыс аэродинамикасы, жылулық сипаттамалар, температураның таралуы.

**ЧИСЛЕННОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛООБМЕНА ПРИ
ГОРЕНИИ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА
В ПЫЛЕВИДНОМ
СОСТОЯНИИ
В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ
КОТЛА БКЗ-420**

Введение

Процветание любого государства в большей степени зависит от энергетики страны, то есть от обеспеченности топливно-энергетическими ресурсами. По данным Beyond petroleum Statistical review of World Energy 2012 мировое потребление топлива возросло на 2,5 % в 2011 году, а потребление угля увеличилось на 5,4 % что сделало его самым быстрорастущим видом энергии среди ископаемого топлива. Мировой запас угля составляет 860 938 миллионов тонн, которого при нынешних темпах добычи достаточно на ближайшие 112 лет. Мировая добыча угля на конец 2011 года составила 7695,44 миллионов тонн, что составляет 3955,46 миллион тонн нефтяного эквивалента, а добыча угля в Казахстане – 115,93 миллион тонн (58,76 миллион тонн н.э.).

За последние 20 лет мировое энергопотребление возросло на 30 % и этот рост, по-видимому, продолжится в связи ростом потребностей бурно развивающихся стран азиатского региона. В развитых странах за тот же период сильно изменилась структура потребления – произошло замещение части угля более экологичным газом.

Однако, вследствие большого потребления и увеличения цен на такие природные ресурсы как нефть и природный газ, особое внимание уделяется твердому топливу – углю. Уголь является одним из самых распространенных и в Казахстане природных ископаемых. При этом его добыча осуществляется в основном открытым способом, поэтому данный вид твердого топлива – самое дешевое в нашей стране горючее, но оно является высокозольным.

Зола представляет собой смесь минералов, находящихся в свободном состоянии или связанных с топливом. Присутствие в топливе золы отрицательно сказывается на качестве топлива, т.к. она уменьшает количество теплоты в единице массы топлива. Мельчайшие твердые частицы золы захватываются потоком топочных газов, загрязняя конвективную поверхность нагрева, что приводит к уменьшению теплообмена.



Рисунок 1 – Потребление ископаемого топлива, млн. тонн н.э.

Сжигание пылеугольного топлива оказывает наибольшее экологическое воздействие на среду обитания: токсичные и парниковые газы, твердые частицы, сточные и фильтрационные воды, шлакоотвалы зола уноса, тепловые сбросы и многое другое. Кроме этого, развитие энергетического комплекса связано с масштабной трансформацией компонентов окружающей среды, негативные последствия которой могут проявляться длительное время. Угольные карьеры изменяют рельеф и формируют специфические почвенно-грунтовые условия отвалов, водохранилища ГЭС вызывают изменение сейсмичности, затопливают наиболее продуктивные долинские экосистемы, изменяют ландшафтную структуру регионов.

Незаменимым эффективным методом теоретического исследования течений химически реагирующих сред является численное моделирование. Этот подход в настоящее время интенсивно развивается во многих странах: строятся усовершенствованные модели, конструируются новые численные алгоритмы, проводятся разнообразные вычислительные эксперименты. Численное моделирование может быть использовано для предсказания и изучения поведения сложных физических систем. Для того чтобы дать количественно правильные предсказания, моделирование должно описать как отдельные процессы, действующие в системе, так и их взаимодействие. Математическая теория турбулентности до настоящего времени отсутствует. В последние десятилетия некоторое развитие получило прямое моделирование турбулентности на крупных вычислительных системах, аккуратная реализация которого, однако, сопряжена с трудно преодолимыми вычислительными затратами сейчас и в ближайшей перспективе.

К настоящему моменту разработаны разнообразные математические модели для расчёта

турбулентных течений, турбулентного горения и переноса теплового излучения. Более того, созданы мощные вычислительные программные комплексы (FLOREAN, Ansys Fluent и другие), в которых реализованы указанные математические модели. Наконец, возможность распараллеливания вычислений и быстрое развитие высокопроизводительных вычислительных систем позволяет эффективно производить детальные расчеты на сетках большой размерности. Наиболее важным вопросом является достоверность результатов расчётов и их соответствие экспериментальным данным. Таким образом, внимание данной работы сфокусировано на способности современных пакетов выполнять расчёт турбулентных пламён с требуемой точностью.

Для достижения этой цели предлагается рассмотреть модельную задачу – хорошо документированное струйное диффузионное пламя, для которого имеются достоверные и детальные результаты измерений основных физических величин. Сравнение с результатами измерений позволяет выявить модели турбулентности и горения, как рекомендуемые, так и полностью неприемлемые для данного класса задач. В качестве вычислительного инструмента в данной работе используется FLOREAN. Одними из интереснейших и полезных с точки зрения практического применения являются вопросы моделирования тепло-массопереноса при наличии физико-химических процессов в областях реальной геометрии. Таковыми областями являются камеры сгорания различных теплоэнергетических установок, двигатели внутреннего сгорания и т.п.

Моделирование теплопереноса при наличии физико-химических процессов

Для моделирования теплопереноса при наличии физико-химических процессов ис-

пользуются фундаментальные законы сохранения таких величин, как масса, импульс, энергия. Поскольку тепломассоперенос при наличии физико-химических превращений представляет собой взаимодействие турбулентных движений и химических процессов, то мы должны учитывать и закон сохранения компонентов реагирующей смеси, турбулентность, многофазность среды, выделение тепла за счет излучения нагретой среды и химических реакций.

Для написания всех уравнений с учетом перечисленных выше физических и химических явлений, составляющих математическую модель рассматриваемых сложных процессов тепломассопереноса в реагирующих средах, запишем в начале все эти уравнения в общем виде как закон сохранения некой субстанции \emptyset (масса, импульс, энергия, компонента смеси).

В дифференциальной форме уравнение неразрывности или закон сохранения массы записывается в виде:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_I + \underbrace{\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}}_{II} = 0, \quad (1)$$

где k_{eff} – эффективная теплопроводность, которая определяется суммой $k_l + k_t$ (ламинарная и турбулентная теплопроводность соответствен-

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h, \quad (3)$$

где первый член описывает нестационарность потока, второй член представляет собой конвективный перенос. Для несжимаемых жидкостей уравнение неразрывности записывается в виде:

Закон сохранения импульса или уравнение количества движения записывается следующим образом:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i}}_I + \underbrace{\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j}}_{II} = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{III} + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{IV} + \underbrace{\frac{\rho g_i}{\nu}}_V \quad (2)$$

Изменение энергии в реагирующих турбулентных течениях может быть обусловлено следующими процессами: поток полной энергии за счет конвекции; поток полной энергии за счет молекулярного теплопереноса; изменение энергии за счет работы сил давления на поверхности контрольной области; изменение энергии за счет работы сил трения на поверхности контрольного объема; изменение энергии за счет работы объемных сил; поглощение или выделение энергии в результате химических преобразований или за счет энергии теплового излучения.

С учетом вышеуказанных причин уравнение энергии в общем виде можно записать как:

но), J_j – диффузионный поток компонента j .

Закон сохранения для компонент реагирующей смеси.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{N}_\beta) = - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{N}_\beta u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\beta eff}} \frac{\partial \tilde{N}_\beta}{\partial \tilde{\sigma}_i} \right) + S_\beta \quad (4)$$

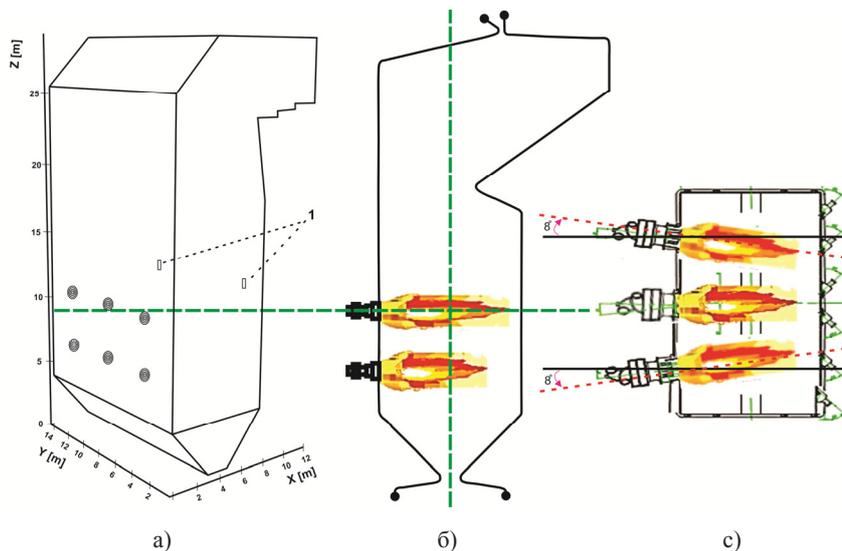
В качестве исследуемого объекта был выбрана топочная камера котла БКЗ-420, паропроизводительностью 420 т/ч, расположенный на Алматинской ТЭЦ-2. Котел Е-420-13,8-560 БТ (БКЗ-420-140-7) предназначен для работы на Экибастузском угле для выработки перегретого пара на тепловых электростанциях с теплофикационными турбинами на высокие параметры пара. В топочной камере предусмотрено твердое шлакоудаление. Шлакоудаление механизированное,

непрерывное с помощью шнековых транспортеров и дробилок. Топочная камера – призматическая, открытого типа, с размерами в плане по осям труб $14,46 \times 12,052 \times 29,102$ (м³). Топка экранирована цельносварными газоплотными испарительными стенками, выполненными из труб $\text{Ø}60 \times 6$ мм с вваренной полосой размером 20×6 мм (сталь 20). Шаг труб в панелях равен 80 мм.

Топочная камера котла оборудована шестью вихревыми двухпоточными пылеугольными

ми горелками, расположенными в два уровня по три горелки, на фронтальной стенке котла. Крайние горелки повернуты к центру топки на 8 градусов. Производительность одной горелки 12 т/ч по Экибастузскому углю. В топке сжигалась пыль низкосортного высокозоль-

ного Экибастузского угля с содержанием золы 40%, выходом летучих 24%, влажностью 5% и наивысшей теплотой сгорания 16750 кДж/кг. Тонина помола угля была равна $R_{90}=15\%$. Все численные расчеты были выполнены по вышеупомянутой методике.



(а) трехмерный 3D вид котла БК3-420 и его разбивка на контрольные объемы, 1-отверст (16x60 см); (б) горелки расположены в два ряда; (с) вид сверху на срезе $h = 10.75\text{m}$

Рисунок 2 – Общий вид промышленного котла БК3-420 Алматинской ТЭЦ-2

На фронтальной стенке топки котла установлены шесть вихревых двухпоточных пылеугольные горелок (рисунок 2) в два яруса (по три на ярус). Крайние горелки повернуты к центру топки на 8 градусов. На рисунке 2,а в противоположной стороне стенки области горелок второго яруса расположено отверстие для подачи дополнительного воздуха повернутые к центру на 45 градусов, и размеры которого 14x60см. Производительность одной горелки 12 т/ч по Экибастузскому углю. При проведении вычислительных экспериментов, на начальном этапе необходимо построить геометрию исследуемого объекта, а также получить его конечно-разностную сетку. Кроме того, в используемом программном комплексе нужно создать исходные файлы, в которых содержатся физические и геометрические данные исследуемого процесса, а также начальные и граничные условия для моделирования процесса тепломассопереноса в турбулентных высокотемпературных потоках.

В данном численном эксперименте рассматривался традиционный режим работы котлоа-

регата БК3-420-140-7С, паро производительностью 420 т/час.

Работа посвящена исследованию тепловых характеристик процесса при горении твердого топлива в пылевидном состоянии в камере сгорания котла БК3-420. На рисунках 3-8 приведены расчетные данные полей температуры. Мы видим, что наибольшие изменения в распределении температур наблюдаются в центральной части камеры сгорания в области подачи топливной аэрозоли и воздуха через отверстия горелок. Проведение исследования тепловых характеристик является важным этапом моделирования процессов тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива, которое позволяет определить температурные поля по всему объему топочной камеры и на выходе из нее.

На рисунке 3 представлено поле температуры в области расположения нижнего пояса горелок при массовом расходе воздуха 5кг/с и 10 кг/с. Для случая, когда расход воздуха через отверстия равен 5кг/с температура на про-

тивоположной горелкам стенке достигает значений 1740°C , а при расходе 10 кг/с – 1440°C . Это можно объяснить большими объемами дополнительного воздуха с низкой температурой

($T=340^{\circ}\text{C}$), подаваемого через отверстия в сечении $z=10.8\text{m}$, что и привело к уменьшению температуры стенки почти на 300°C и к ее защите от перегрева.

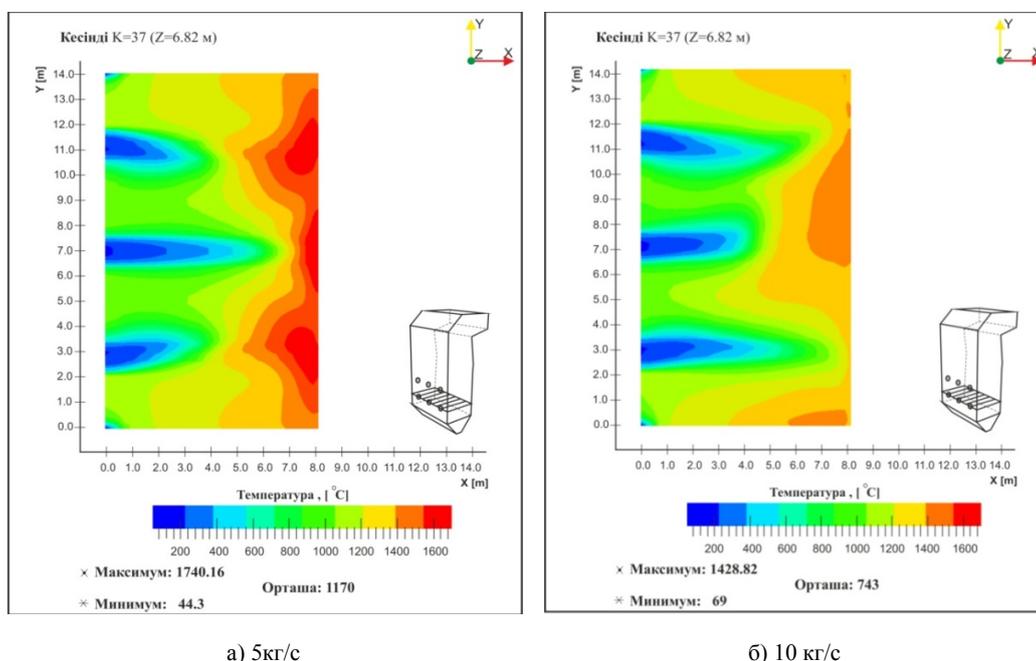


Рисунок 3 – Распределение температуры T в поперечном сечении камеры сгорания в зоне горелок нижнего яруса ($h=6,82 \text{ м}$)

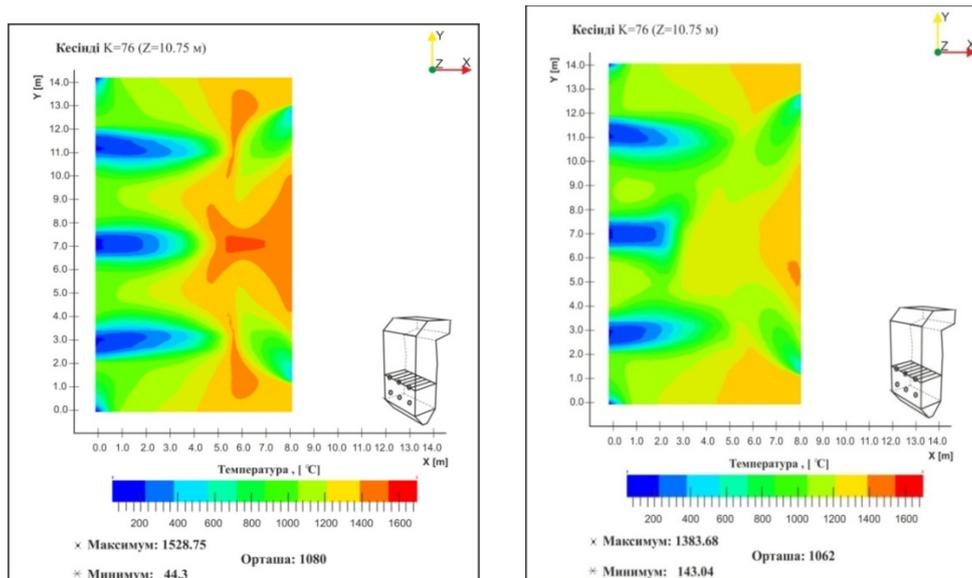
На 4 рисунке показано сравнительное распределение температур в области расположения верхних горелок. Из рисунков можно видеть, что максимальное значение температуры наблюдается в центре котла, в области смешения аэросмеси и дополнительного воздуха, направленного под углом в 45 градусов к стенке котла. Такая компоновка создает условие для образования дугообразного потока, который защищает от перегрева стенки и помогает уменьшить температуру обратного потока.

Мы видим, что для случая, когда расход воздуха через отверстия равен 5 кг/с максимальная температура на противоположной горелкам стенке достигает значений 1528.29°C , а при расходе 10 кг/с – она составляет 1383.68°C . Такое снижение температуры стенки топочной камеры также объясняется большим количеством дополнительного воздуха ($T=340^{\circ}\text{C}$), подаваемого через дополнительные отверстия на стенке, расположенной напротив горелочных устройств. Сказанное отчетливо наблюдается на трехмерных графиках распределения температуры в указанных сечениях в области верхнего и ниж-

него ярусов, где по температурной цветной шкале можно определить все значения температуры и их различие.

На рисунке 5 представлено трехмерное поле распределения температуры в двух продольных сечениях ($Y_1=2.95 \text{ m}$ и $Y_3=11.4775\text{m}$) камеры сгорания, расположенных в областях крайних горелок верхнего и нижнего ярусов. Мы видим, что при расходе дополнительного воздуха, равного 5 кг/с максимальная температура наблюдается у стенки, расположенной противоположно горелкам и равна 1740°C в области нижнего ярусов горелок ($Z=6.82\text{m}$). А при расходе воздуха 10 кг/с можно заметить, что значение температуры у стенки значительно снизилось примерно на 350°C .

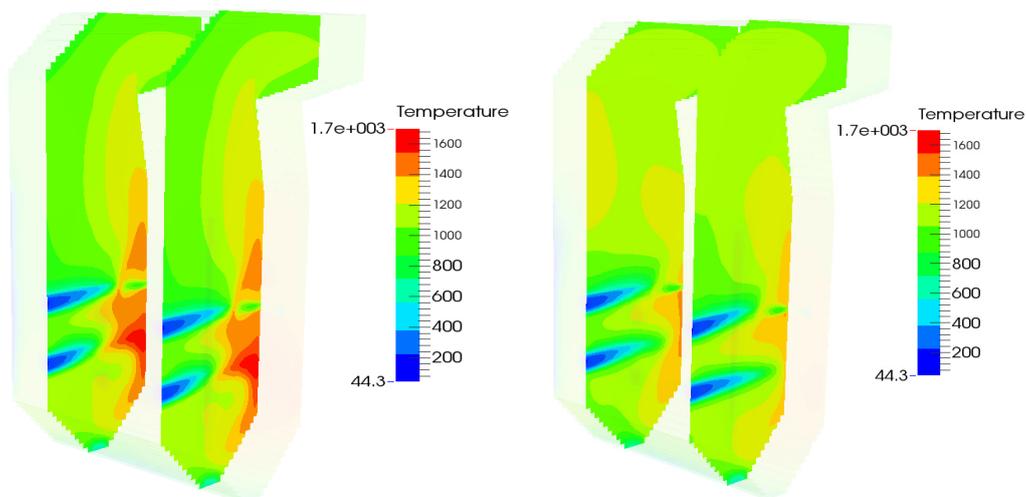
На рисунке 6 представлено распределение температуры в продольном сечении по оси X ($X=4.01\text{m}$). Из анализа рисунка видно, что при малом массовом расходе воздуха (5 кг/с) из противогорелок факел образуется в области между горелками (рисунок 6а), в то время как при большем расходе (10 кг/с) поле температуры (рисунок 6б) как бы вытягивается по высоте топочной камеры.



а) 5 кг/с

б) 10 кг/с

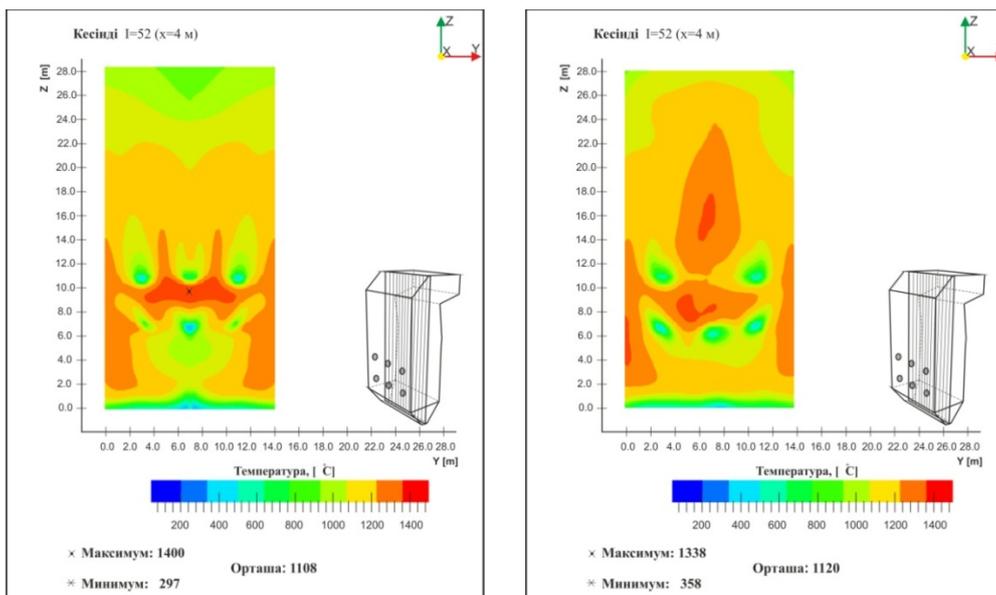
Рисунок 4 – Распределение температуры T в поперечном сечении камеры сгорания в зоне горелок верхнего яруса ($h=10,8$ м)



а) 5 кг/с

б) 10 кг/с

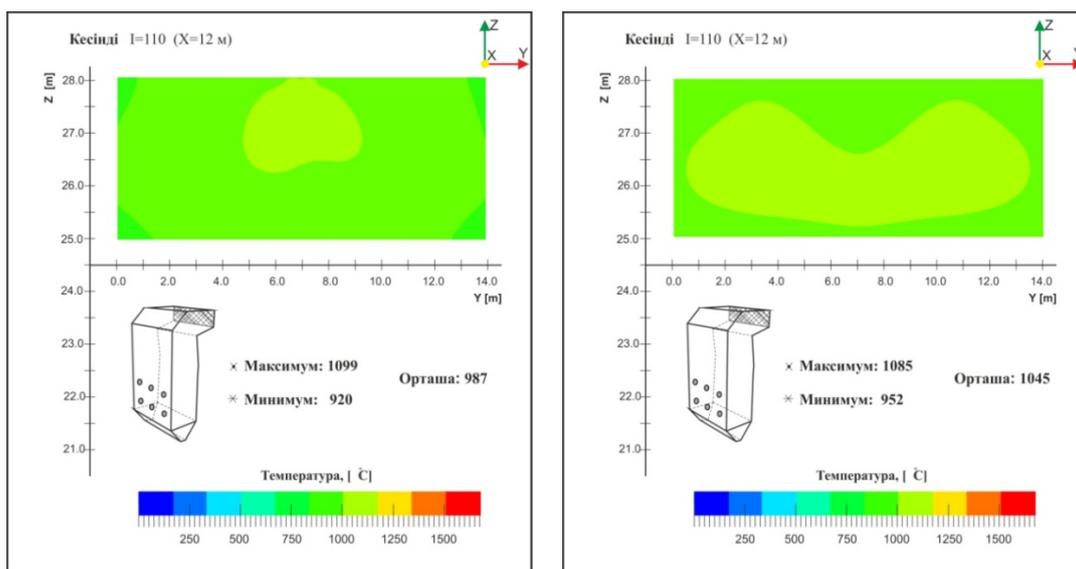
Рисунок 5 – Трехмерное распределение поля температуры в продольных сечениях $Y1=2.95$ m и $Y3=11.4775$ m камеры сгорания



а) 5кг/с

б) 10 кг/с

Рисунок 6 – Температурное поле в продольном сечении X=4.01m для различных значений массового расхода воздуха



а) 5кг/с

б) 10 кг/с

Рисунок 7 – Температурное поле на выходе из камеры сгорания (X=12 м)

На рисунке 7 показаны поля температуры на выходе из топочного пространства для двух значений расхода воздуха из дополнительных отверстий: 5 кг/с и 10 кг/с. Как можно видеть из рисунков, во втором случае (рисунок 7б) область высоких температур меньше, чем в первом случае (рисунок 7а).

Поскольку горелки и отверстия для дополнительного воздуха установлены на противоположных стенках и направлены навстречу друг к другу, то в центре топочной камеры, в зоне их соприкосновения потоки, как было сказано ранее, рассекаются. Часть потока уходит в зону холодной воронки, образуя два продольных вихря на высоте ниже 10,8 метров, а часть, посредством образующейся тяги, направляется к выходу. Далее, по мере продвижения к выходу из топоч-

ной камеры химические процессы ослабевают (рисунок 7), температура падает и на выходе ее среднее значение составляет $\sim 1045^{\circ}\text{C}$ для расхода 5 кг/с (рисунок 7а) и 987°C – для расхода 10 кг/с (рисунок 7б).

Сказанное выше подтверждается двухмерными графиками распределения температуры по высоте топочной камеры для двух разных массовых расходов дополнительного воздуха через отверстие, представленными на рисунке 8. Анализ рисунка показывает, что на высоте $z_1=6.82$ и $z_2=10.8$ метров расположены горелочные устройства, через которые подается холодная аэрозоль, наблюдаются минимумы в распределении температуры. На выходе камеры при массовом расходе воздуха 5 кг/с значение температуры выше по сравнению с подачей при 10 кг/с.

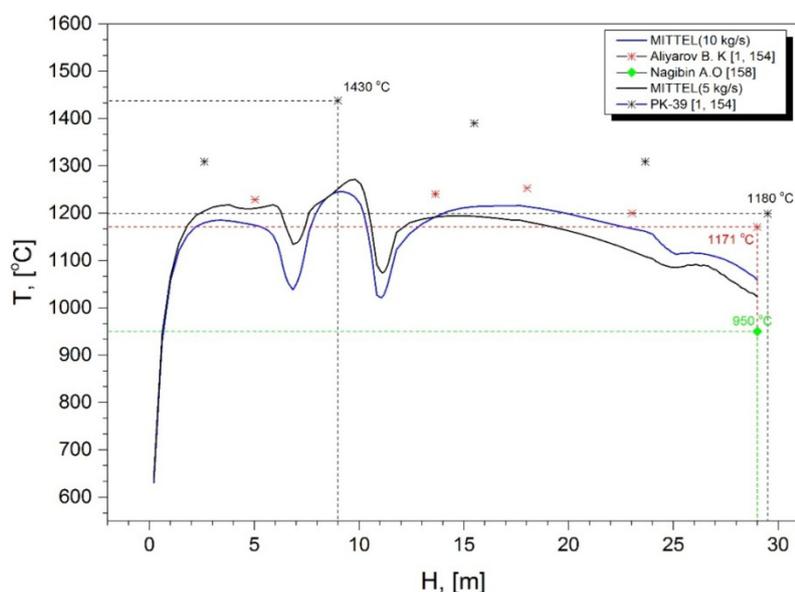


Рисунок 8 – Средняя температура по высоте топки котла

Заключение

Температура на выходе из топочной камеры подтверждается ее экспериментальным значением ($T=1171^{\circ}\text{C}$), полученным непосредственно на ТЭЦ, приведенным в работах и численно. Сопоставляя эти значения, можно заключить: проведенный вычислительный эксперимент по определению значений температуры в объ-

еме топочной камеры, с достаточной точностью согласуется с измеренными значениями температуры (рисунок 8). Это позволяет судить о достоверности полученных результатов и применимости используемой физической, математической и численной модели к дальнейшему исследованию тепловых и концентрационных характеристик топочной камеры БКЗ 420 Алма-тинской ТЭЦ-2.

References

- 1 Aliyarov B.K., Aliyarova M.B., Szhiganiye kazakhstanskikh ugley na TES i na krupnykh kotel'nykh., Almyty-2012. -130s.
- 2 Yun A.A., Krylov B.A.. Raschet i modelirovaniye turbulentykh techeniy s teploobmenom, smesheniyem, khimicheskimi reaktsiyami i dvukhfaznykh techeniy v programmnom komplekse Fastest-3D: Uchebnoye posobiye. – M.: Izd-vo MAI, 2007. – 116 s.: il. ISBN 978-5-7035-1854-0.
- 3 Ursul A.D., Ursul T.A., Tupalo V.G., Eyegel's A.A. Ustoychivoye razvitiye, bezopasnost', noosferogenez.-2008. -400 s.
- 4 Polezhayev YU.V., Vysokoeffektivnyye i ekonomicheski bezopasnyye parogazovyye ustanovki //Energiya. -2005. – №10. – 96 s.
- 5 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Voloshina I.E., Ryspayeva M.ZH. Komp'yuternoye modelirovaniye protsessa obrazovaniya produktov reaktsii pri szhiganii zhidkikh topliv//Trudy mezhdunarodnom nauchno- tekhnicheskome kongresse. – Krasnoyarsk, 2010. – 91-92 s.
- 6 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Bekmuhamet A. Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // Procedia Engineering. – 2012. – V.42. – P. 1250-1259.