

ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЭС МОЩНОСТЬЮ 4800 МВт НА УГЛЕ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

Д.В. Красинский, В.В. Саломатов, Х. Энхжаргал

Выполнено расчетное обоснование параметров проектируемой КЭС мощностью 4800 МВт на буром угле Шивэ-Овооского месторождения Монголии. В качестве основного энергетического оборудования для КЭС предложен энергоблок мощностью 800 МВт с использованием перспективного парогенератора с вихревой технологией сжигания распыленного угля. Представлены основные технико-экономические показатели проекта. В результате проведения численного 3-D моделирования аэродинамики и топочных процессов в предложенном парогенераторе с вихревой топкой получены детальные распределения полей скорости, температур, концентраций, тепловых потоков, а также его основные теплотехнические и экологические характеристики.

Ключевые слова: уголь, горение твердого топлива, энергоблок КЭС, парогенератор, вихревая топка, численное моделирование.

1 Основные конструктивные и режимные параметры проектируемого энергоблока КЭС

Создание мощной топливно-энергетической базы Монголии имеет стратегическое значение. В настоящей работе проводится расчетное обоснование параметров проектируемой конденсационной электрической станции (КЭС) мощностью 4800 МВт на угле Шивэ-Овооского месторождения Монголии. В рамках этой работы ставится задача на основе нового прогрессивного энергооборудования и более эффективных проектных решений добиться снижения стоимости и сроков строительства, трудозатрат на монтаж, а также повышения экологичности, улучшения условий эксплуатации и ремонта оборудования энергоблока. Эта задача решается за счет применения более совершенного, менее габаритного оборудования, упрощения технологических схем, улучшения компоновочных и конструктивных решений. В проекте для блока 800 МВт принимается оборудование, имеющее длительный опыт эксплуатации, высокие удельные показатели и долгосрочную надежность. Особое внимание уделено выбору типа парогенератора – это объясняется тем, что из основного оборудования, входящего в состав энергоблока, турбина и электрогенератор прошли достаточную эксплуатационную проверку, а парогенератор для углей Шивэ-Овооского месторождения создается впервые. С целью сопоставления технико-экономических и экологических показателей привлекаются известные проектные

данные действующего энергоблока мощностью 800 МВт Березовской ГРЭС-I с парогенератором П-67 на березовском угле Канско-Ачинского бассейна.

1.1 Основное оборудование энергоблока

В проекте для сопоставления рассмотрены два типа парогенераторов, характеристики которых приведены ниже.

а) Котел П-67 на сильношлакующихся углях Березовского месторождения КАБ, эксплуатирующийся на Березовской ГРЭС-I. Для него приняты: открытая тангенциальная камерная топка; низкотемпературное сжигание; сухое шлакоудаление; схема пылеприготовления с прямым вдуванием; размол топлива в мельницах-вентиляторах. Следует отметить, что парогенератор П-67 имеет очень большие габариты – это отразилось на металлоемкости котла, расходе металла на каркас главного корпуса и на его стоимости.

б) Парогенератор для энергоблока Шивэ-Овооской КЭС на буром Шивэ-Овооском угле (ШОУ) качественно отличается от функционирующего котла П-67:

- применением вихревой топки, состоящей из футерованной камеры горения с высоким тепловым напряжением и камеры охлаждения, насыщенной двухсветными экранами;
- жидким шлакоудалением;
- замкнутой системой пылеприготовления.

Основными элементами конструкции парогенератора с вихревой топкой [1] являются: вихревая камера сгорания с тангенциальным подводом струи аэросмеси, создающей вихревой факел с горизонтально расположенной

ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЭС МОЩНОСТЬЮ 4800 МВт НА УГЛЕ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

осью вращения, диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся выпускным газоходом (рисунок 1). Таким образом, в проекте предусматривается следующий тип парогенератора: парогенератор с вихревой самоопорный, секционированный с помощью горизонтальных цельносварных панелей, с сомкнутыми газоходами, с ширмоконвективными поверхностями нагрева. Заложенные в расчет этого парогенератора вышеуказанные исходные положения, а также конструктивные решения поверхностей нагрева, приводят к уменьшению габаритов, металлоемкости, а следовательно, стоимости парогенератора, сокращению расхода металла и снижению капзатрат на главный корпус. Характеристики рассмотренных парогенераторов представлены в таблице 1.

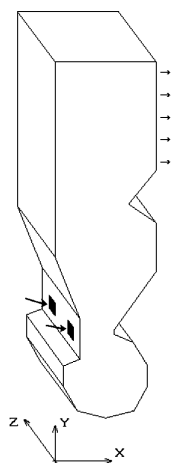


Рисунок 1 –
Схема вихревой
топки

Таблица 1 - Характеристики парогенераторов энергоблоков 800 МВт

Параметр	тип парогенератора	
	П-67	с вихревой топкой, самоопорный
Номинальная паро-производительность (т/ч): – по первичному пару, – по вторичному пару.	2650 2190	2650 2190
Давление первичного пара, ата	255	255
Температура первичного пара, °С	545	545
КПД парогенератора, %	91,89	93,02
Металлоемкость парогенератора, в т.ч. металл под давлением, т	19660 9360	9800 5280
Расход стали на котельное отделение (на один энергоблок), тыс.т	76,2	18,4
Удельный объем котельного отделения (на один энергоблок), м ³ /кВт	0,612	0,205

По проекту в блоке с парогенератором принята серийная турбоустановка К-800-240-5, установленная также на Березовской ГРЭС-1. Эта турбина одновальная, пятицилиндровая (ЦВД+ЦСД+3ЦНД), имеет 8 нерегулируемых отборов пара, используемых для подогрева питательной воды. Она обладает следующими характеристиками: номинальная мощность – 800 МВт, параметры пара – 240 ата, 540/540 °С, расход пара на турбину – 2540 т/ч.

1.2 Компоновка главного корпуса

Опыт проектирования парогенераторов большой единичной паропроизводительности показывает, что с ростом единичной мощности блока существенная доля капвложений в главный корпус приходится на строительную часть и, в основном, на котельное отделение. Учитывая, что тип котла и его компоновка в значительной мере определяют компоновку главного здания, для проектируемого блока Шивэ-Овооской КЭС выбрана ширина ячейки блока, равная 72 м. Последнее обеспечивает оптимальное размещение парогенератора, электрофильтров, системы пылеприготовления. Также используется типовая компоновка турбины К-800-240-5.

Для парогенератора П-67 с двухсветными экранами, сухим шлакоудалением, со схемой пылеприготовления с прямым вдуванием характерным для компоновки является:

- требование обеспечения максимального приближения мельниц-вентиляторов к горелкам приводит к необходимости (в целях оптимальной раздачи топлива по мельницам) создания двух бункерных этажерок с фронтальной и задней стенок парогенератора;

- подвеска парогенератора к каркасу котельного отделения жестко связывает схему каркаса;

- в каркас котельной включены четыре ряда колонн: два ряда колонн, приближенных к парогенератору (топке) с целью сокращения пролета хребтовых балок, а два других ряда колонн одновременно являются колоннами бункерных этажерок. Пространство между этими рядами колонн используется для размещения мельниц, обдувочных аппаратов и др.

Для компоновки парогенератора с вихревой топкой характерным является:

- замкнутая система пылеприготовления, а также однофронтальное расположение горелок, что позволяет компоновать оборудование пылеприготовления независимо от парогенератора (все оборудование в этом случае располагается перед фронтом парогенератора в одной бункерной этажерке);

- бункера пыли размещаются непосред-

ственно в самой котельной;

– парогенератор самоопорного типа располагается на своем каркасе и не влияет на схему каркаса котельного отделения, что значительно облегчает строительные конструкции.

Основные конструктивные параметры парогенератора с вихревой топкой, полученные методами физического и математического моделирования, имеют следующие значения: высота – 30.6 м, ширина по фронту – 64 м, по глубине – 24.6 м, число горелок – 32 шт., число двухсветных экранов – 15 шт., диаметр вихревой камеры сгорания $D_T=6.2$ м, угол наклона горелочной струи – 15° . Ширина горловины диффузора составляет $0,4D_T$. Углы раскрытия диффузора: 20° – переднего, 30° – заднего. Выполненные расчетные обоснования и проектные проработки показали бесспорное преимущество применения в пылеугольных энергоблоках 800 МВт парогенераторов с вихревой технологией сжигания.

1.3 Технико-экономические показатели

Экономическая эффективность принятых в проекте решений и рекомендуемого оборудования определена путем сравнения основных технико-экономических показателей по вариантам главных корпусов Шивэ-Овооской КЭС и Березовской ГРЭС-1. Анализировались капитальные вложения в главный корпус: металлоемкость и стоимость оборудования, расход строительных материалов на каркас; трудозатраты на строительство; эксплуатационные затраты (таблица 2).

Таблица 2. Основные технико-экономические проектные показатели для пылеугольной КЭС (6 ´ 800 МВт) на Шивэ-Овооском угле

Наименование показателя	Березовская ГРЭС-1	Шивэ-Овооская КЭС с вихревой топкой
Среднегодовая нагрузка блока, %	95,9	95,9
Число часов использования установленной мощности, час	6800	7037
Расход электроэнергии на собственные нужды, %	3,38	4,05
Удельный расход условного топлива, кг/кВт·ч	0,329	0,327
Удельные капитальные вложения в установленный кВт, руб/кВт	54000	46500
Себестоимость отпущенной электроэнергии, руб/кВт·ч	0,445	0,41

Из анализа технико-экономических показателей следует, что установка в блоке 800 МВт вместо парогенератора П-67 парогенератора с вихревой топкой позволит:

- сократить расход металла на парогенераторы на ~ 60000 т;
- уменьшить расход строительных материалов на главный корпус: железобетона на ~ 170500 м³, металла на ~58100 т;
- сократить годовой расход угля на ~7500 т.у.т./год.

2 Численное моделирование

В настоящее время проведение предпроектных исследований на основе методов численного моделирования является необходимым этапом при разработке новых (или модернизации существующих) аппаратов и технологий в теплотехнике. С целью расчетного обоснования интегральных теплотехнических и экологических характеристик проектируемого парогенератора с вихревой топкой и анализа распределений основных величин в объеме такой топки, проведено численное моделирование 3-D аэродинамики и всех основных топочных процессов при факельном сжигании ШОУ в исследуемой вихревой топке.

2.1 Математическая модель описания аэродинамики и процессов горения пылеугольного топлива

Применяемая для численного исследования физико-математическая модель пространственного турбулентного течения, процессов тепломассопереноса и горения твердого распыленного топлива в топочных устройствах ТЭС основана на смешанном эйлер-лагранжевом описании двухфазной среды, когда для несущего газа используется модель сплошной среды, а для дисперсной фазы – траекторная модель пробных частиц, движение которых вдоль их траекторий описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет легко учесть полидисперсность угольного топлива.

Такая математическая модель позволяет описать все основные взаимосвязи процессов переноса за счет турбулентной аэродинамики, межфазного взаимодействия, химического гетерогенного и газозафазного реагирования, лучистого теплообмена. Для газовой фазы дифференциальные уравнения пространственного переноса массы, импульса, энергии и концентраций представлены на основе континуального (Эйлера) описания в тензорном виде (с суммированием по повторяющимся индексам).

ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЭС МОЩНОСТЬЮ 4800 МВт НА УГЛЕ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

Уравнения в системе (1–7): (1)– неразрывности, (2)– количества движения ($i=1,2,3$), (3)– переноса энтальпии газовой смеси,

(4)– переноса концентраций компонент α газовой смеси, (5–6)– k - ϵ модели турбулентности, (7)– радиационного переноса.

$$\frac{\rho U_k}{\rho x_k} = \langle k^{coke} \rangle + \langle k^{volat} \rangle \quad (1)$$

$$\frac{\rho U_j U_i}{\rho x_j} = -\frac{\rho P}{\rho x_i} + \frac{\rho}{\rho x_j} \left[(m + m_t) \left(\frac{\rho U_i}{\rho x_j} + \frac{\rho U_j}{\rho x_i} - \frac{2}{3} \frac{\rho U_k}{\rho x_k} d_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k d_{ij} \right] - \rho g d_{2i} + \langle f_i \rangle \quad (2)$$

$$\frac{\rho U_k H}{\rho x_k} = \frac{\rho}{\rho x_k} \left(\left(\frac{l}{C_p} + \frac{m_t}{Pr_t} \right) \frac{\rho H}{\rho x_k} \right) - \text{div } q_{rad.g} + \langle J \rangle + H (\langle k^{coke} \rangle + \langle k^{volat} \rangle) \quad (3)$$

$$\frac{\rho U_k C_a}{\rho x_k} = \frac{\rho}{\rho x_k} \left(\left(r D_a + \frac{m_t}{Sc_t} \right) \frac{\rho C_a}{\rho x_k} \right) + r_a \quad (4)$$

$$\frac{\rho U_j k}{\rho x_j} = \frac{\rho}{\rho x_j} \left(\left(m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\rho k}{\rho x_j} \right) + m_t |S|^2 - r e \quad (5)$$

$$\frac{\rho U_j e}{\rho x_j} = \frac{\rho}{\rho x_j} \left(\left(m + \frac{m_t}{s_e} \right) \frac{\rho e}{\rho x_j} \right) + r C_1 e |S| - r C_2 \frac{e^2}{k + \sqrt{ne}} \quad (6)$$

$$a_g E_r = \frac{\rho}{\rho x_k} \left(\frac{1}{3V} \frac{\rho E_r}{\rho x_k} \right) + s_0 a_g T_g^4 - \langle S_{rad} \rangle \quad (7)$$

При этом предполагается, что течение в вихревой топке является стационарным, дозвуковым, турбулентным и имеет существенно-пространственный характер, обусловленный конструктивной схемой топки. Аэродинамика такого течения определяется осредненными по Рейнольдсу уравнениями неразрывности и количества движения, для замыкания которых выбрана так называемая «реализуемая» модификация k - ϵ модели турбулентности [2]. Эта модель за счет более точной формулировки членов уравнения переноса скорости диссипации турбулентности обеспечивает улучшенную предсказательную способность (по сравнению со «стандартной» k - ϵ моделью [3]), в том числе применимость для моделирования сложных турбулентных закрученных течений и/или течений со значительной кривизной линий тока (что характерно для исследуемой вихревой топки), и улучшенную вычислительную робастность. В этой модели достаточно задать только четыре константы: $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_2 = 1.9$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\epsilon = 1.2$.

При моделировании процессов тепло-массообмена и горения газовая фаза считается состоящей из следующих компонент $\alpha = \{O_2, CH_nO_m, CO, CO_2, H_2O, N_2\}$. Здесь CH_nO_m представляет собой обобщенную формулу углеводородов, выделяющихся из летучих в процессе их пиролиза. Состав m и n в CH_nO_m и их энергосодержание рассчитываются на основе характеристик и элементного состава заданного угля, откуда определяются молекулярный вес летучих и стехиометрические коэффициенты реакции горения летучих. Для Шивэ-Овооского бурого угля были получены следующие значения химической формулы летучих: $n=4.653$, $m=1.881$, молярная масса выделившихся летучих = 46.8 г/моль. Теплоемкость летучих в составе газовой смеси CH_nO_m определяется по кусочно-полиномиальной зависимости от температуры, коэффициенты этих полиномов были приняты как для метана CH_4 . Коэффициент молекулярной вязкости газовой смеси определяется также по степенной зависимости от температуры. Скорость газовой фазной реакции горения углеводородов CH_nO_m описывается на основе известной модели дробления турбулентных вихрей [4].

Для моделирования лучистого теплообмена используется $P-1$ приближение метода сферических гармоник для серой двухфазной среды. Поглощение лучистой энергии газодисперсной средой обусловлено поглощением и рассеянием излучения дисперсными частицами, а также поглощением трехатомными составляющими дымовых газов. Поэтому коэффициенты поглощения в газовой фазе определяются по известной модели

Для моделирования лучистого теплообмена используется $P-1$ приближение метода сферических гармоник для серой двухфазной среды. Поглощение лучистой энергии газодисперсной средой обусловлено поглощением и рассеянием излучения дисперсными частицами, а также поглощением трехатомными составляющими дымовых газов. Поэтому коэффициенты поглощения в газовой фазе определяются по известной модели

взвешенной суммы серых газов [5], а коэффициенты поглощения и рассеяния в дисперсной фазе определяются из приближения оптически крупных частиц [6]. В результате задача моделирования лучистого теплообмена сводится к решению дополнительного уравнения (7) переноса величины плотности энергии излучения [6].

Дисперсная фаза моделируется на основе Лагранжева описания движения, теплообмена и химического реагирования частиц твердого топлива. В качестве входных условий для дисперсной фазы в данной математической модели принимается, что с поверхности входных сечений испускаются представительные кластеры частиц твердого топлива. Для расчета параметров, характеризующих поведение представительной частицы, используется система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая процесс движения частицы и радиационно-конвективный теплообмен частицы с газовой фазой, где также учтены источники членов, описывающие межфазный тепломассообмен при гетерогенном реагировании. Учет влияния турбулентности несущего газа на движение частиц моделируется путем стохастических возмущений траекторий частиц.

Для каждого представительного кластера задаются: соответствующая поверхность, компоненты входной скорости для частиц, расход топлива через каждую поверхность, температура входящего в топку топлива, параметры распределения частиц по размерам. Для учета полидисперсности представительные кластеры частиц разбиваются на несколько десятков фракций по размерам, при этом массовая доля каждой фракции определяется с использованием известной двухпараметрической формулы Розина-Раммлера [6]. Были проведены два варианта расчетов с различной тониной помола: в варианте «А» величина массового остатка на сите 90 мкм принималась равной $R_{90}=12\%$, а в варианте «Б» – равной $R_{90}=15\%$. Коэффициент полидисперсности помола в обоих вариантах принимался равным 1.3. Минимальный размер частиц был ограничен значением 5 мкм, а максимальный размер – значением 250 мкм. Скорость горения коксового остатка и ее энергия активации задавались по литературным данным. При моделировании процессов тепломассообмена и гетерогенного горения для каждого представительного кластера угольных частиц учитываются стадии: – выхода летучих (описывается по модели постоянной скорости выхода летучих), – горения

коксового остатка (описывается в рамках диффузионно-кинетической теории горения твердого топлива), – инертного движения золы остатка до выхода частицы из расчетной области. В тепловом балансе угольной частицы учитываются конвективный и лучистый теплообмен и тепловыделение при горении коксового остатка. Температура частицы считается одинаковой внутри частицы, но отличающейся от температуры несущей газовой среды.

С целью предсказания уровня эмиссии оксидов азота в топке, в используемой численной модели дополнительно решаются дифференциальные уравнения пространственного переноса концентраций монооксида азота NO, а также промежуточных соединений (радикалы HCN, NH_3), учитываемых в общей кинетической схеме образования оксидов азота. Ввиду того, что концентрации этих веществ малы по сравнению с концентрациями основных компонент газовой смеси, и при этом энергетический вклад этих реакций также пренебрежимо мал по сравнению с тепловыми эффектами реакций горения топлива, общепринятым подходом является проведение расчета образования оксидов азота на этапе пост-процессинга, т.е. с использованием «замороженных» пространственных полей величин (скорости, температуры, концентраций O_2 , CH_nO_m , CO, CO_2 , H_2O , N_2 и т.д.), полученных на основном этапе расчета. В принятой схеме образования оксидов азота [7] при сжигании угля в вихревой топке учитываются следующие механизмы:

1) «термический» – окисление азота воздуха N_2 по расширенному механизму Я.Б.Зельдовича, важнейшую роль в котором играет диссоциация кислорода O_2 при повышенных температурах;

2) «быстрый» – реагирование азота воздуха N_2 с углеводородными радикалами по механизму Фенимора, которое может происходить в области выделения летучих;

3) «топливный» – выделение азота органической части топлива в газовую фазу (в процессе выхода летучих) в виде радикалов NH_3 и HCN, которые далее окисляются с образованием NO. В проведенных расчетах полагалось, что весь азот топлива (0.2 % на рабочую массу сырого угля) выделяется с летучими;

4) механизм с промежуточным образованием N_2O при окислении азота воздуха N_2 – может играть существенную роль при повышенном давлении, что, однако, не характерно для условий топочного процесса в вихревой топке.

Также в модели образования оксидов азота [7] учитываются и факторы, приводящие к уменьшению концентрации NO: – путем «reburn-механизма» при реагировании оксидов азота с углеводородными радикалами CH_i , – и за счет гетерогенной реакции поглощения NO на поверхности углеродных частиц.

Решение уравнений баланса массы, количества движения, энергии и концентраций для дисперсной и газовой фаз выполняется в ходе последовательных "глобальных" итераций для несущего газа и для дисперсной фазы, а взаимовлияние фаз осуществляется согласно алгоритму PSI-CELL (Particle-Source-In-Cell) [8], при котором на "лагранжевом" этапе в каждой ячейке сетки рассчитываются осредненные по ансамблю источники членов $\langle k^{coke} \rangle, \langle k^{volat} \rangle, \langle f \rangle, \langle J \rangle, \langle S_{rad} \rangle$ суммарного влияния всех прошедших через данную ячейку пробных частиц. Далее на "эйлеровом" этапе эти источники членов используются в правых частях уравнений (1–7). После сходимости итерационного процесса решение оказывается самосогласованным.

2.2 Постановка граничных условий

Проектируемый энергоблок 800 МВт имеет 16 секций (шириной 4 м каждая) по 2 горелки, разделенных двухсветными экранами. Также, согласно проекту, посередине каждой секции в камере охлаждения установлены ширмы для дополнительного теплоотвода. При численном моделировании, с учетом необходимости ограничения размера сетки, рассматривался объем половины секции, имеющий ширину 2 м по трансверсальной координате z и содержащий одну горелку. Таким образом, полагалось, что слева (по координате z) вычислительный объем полусекции вихревой топки ограничен в сечении $z=0$ стенкой в виде двухсветного экрана (при этом в камере сгорания эта стенка считается футерованной), а справа в сечении $z=2$ м – плоскостью симметрии S_{xy} секции. При этом в той части камеры охлаждения, где установлена ширма, граничные условия зеркальной симметрии заменяются условиями на твердой стенке (в сечении $z=2$ м) в виде теплопринимающего экрана ширмы. Расположение горелки внутри полусекции по трансверсальной координате z является симметричным, так что ось симметрии горелки находится в сечении $z=1$ м, соответственно левая стенка горелки находится в сечении $z=0.65$ м, а правая – в сечении $z=1.35$ м. Угол наклона каналов горелки по отношению к горизонту

(плоскости XZ) составляет 15° (рисунок 1).

Построенная для конечнообъемной дискретизации уравнений расчетная неструктурированная сетка состоит из 227302 гексаэдрических ячеек, ее вид на граничной поверхности моделируемого объема топки представлен на рисунке 2 (где для увеличения показана только область вихревой камеры и диффузорная часть топки).

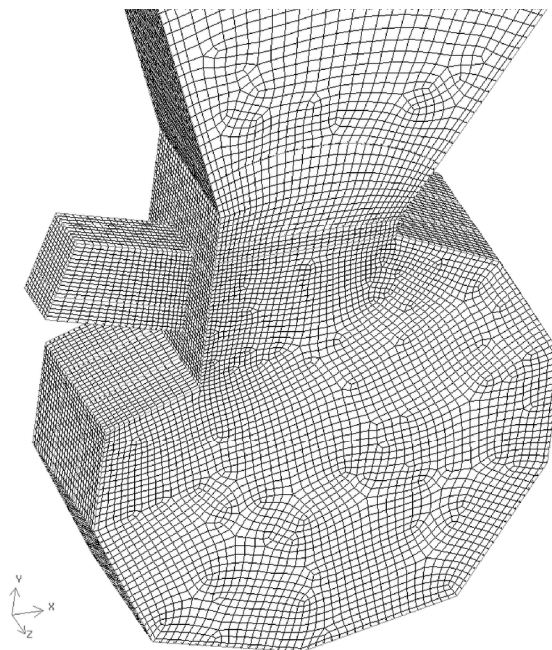


Рисунок 2 – Вид расчетной сетки на поверхности вихревой топки (для увеличения показана нижняя часть топки)

Горелка разделена (по высоте) на два канала: канал 1 подачи аэросмеси и расположенный над ним канал 2 подачи вторичного сухого воздуха. Сухой воздух считается состоящим на 21% из кислорода O_2 и на 79% из азота N_2 по объему. Также предполагается, что влага при подсушивании угля в мельнице полностью выходит из топлива в виде водяного пара, вся масса которого подается в канал 1 первичного воздуха, в котором смешивается с сухим воздухом, т.е. через канал 1 в топку подается аэросмесь – влажный первичный воздух с распыленным в нем углем. Расход подсушенного Шивэ-Овооского угля (его свойства приведены в [9]) на моделируемый объем полусекции вихревой топки был принят равным 3 кг/с, а коэффициент избытка воздуха в топке – равным 1,15. Остальные значения параметров во входных сечениях каналов горелки приведены в таблице 3.

Для компонент скорости на стенках задаются граничные условия прилипания, при

этом для моделирования турбулентности в пристеночной области используется метод пристеночных функций [3, 7], в т.ч. с учетом шероховатости стенок. При задании граничных условий как лучистого, так и конвективного теплообмена на поверхности экранов и ширмы топki используется интегральный коэффициент теплопередачи α_w стенок топki (от поверхности золовых отложений до пароводяной смеси). Значения этого коэффициента, заданные на различных экранных поверхностях вихревой топki, приведены в Таблице 4. При этом температура пароводяной смеси в трубах задавалась равной 390°C, а степень черноты экранов – равной 0,8.

Таблица 3 - Расчетные параметры каналов горелочного устройства

Параметр	Канал 1 - первичного воздуха	Канал 2 - вторичного воздуха
ширина канала, м	0.7	
высота амбразуры канала (в сечении YZ), м	0.36	0.84
массовый расход сухого воздуха, кг/с	9.5886	14.3829
массовый расход водяного пара, кг/с	1.4175	0
Температура потока, °C	180	320
плотность газа, кг/м ³	0.7201	0.5927
скорость потока, м/с	62.7910	42.7225

Таблица 4 - Заданные на экранных поверхностях значения коэффициента теплопередачи

Наименование и местоположение поверхности	α_w , Вт/(м ² ·К)
ширма (в камере охлаждения в сечении z=2 м)	250
двухсветный экран (в камере охлаждения в сечении z=0)	200
остальные экранные поверхности (фронтальные, тыловые, потолочные в камере охлаждения)	150
футерованные стенки (в камере сгорания)	10

При таком способе задания граничных условий значения температур поверхности экранов и тепловых потоков на них, а также коэффициент тепловой эффективности экранов, определяются в процессе численного решения. В качестве граничных условий для величины плотности энергии излучения на тепловоспринимающих поверхностях ставятся известные условия Маршака.

2.3 Численное моделирование процессов сжигания ШОУ в вихревой топке

Структура течения в виде векторного поля осредненной скорости в сечении XY топ-

ки по центру горелки показана на рисунке 3 (для увеличения показана вихревая камера сгорания и диффузорная часть топki). Видны следующие особенности аэродинамической картины в исследуемой вихревой топке. Истекающая из горелки струя, подпиремая снизу закрученным потоком вихревой камеры, присоединяется к противоположной стенке и далее распространяется вниз как пристенная струя вдоль вогнутой поверхности камеры. Поток выходит из вихревой камеры сгорания в виде струи в плоскости симметрии S_{xy} между двумя соплами, а также вблизи торцевой стенки – т.е. структура течения в диффузорной части топki носит «перчаточный» характер. В области над горелкой присутствуют возвратные течения и рециркуляционные зоны. Вблизи центра вихревой камеры четко выражена область вихревого ядра, положение которой зависит от координаты z, что может указывать на наличие прецессии вихревого ядра. Также это свидетельствует о том, что закрученный поток в камере сгорания имеет сложную пространственную структуру.

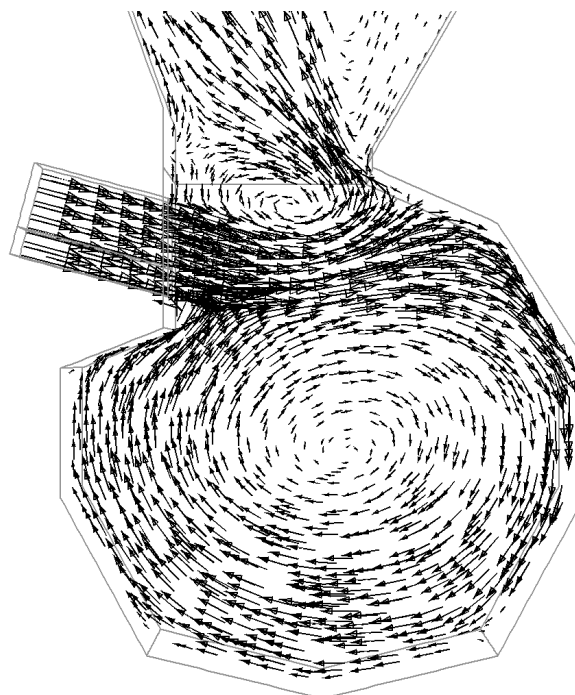


Рисунок 3 – Векторное поле скорости в сечении по центру горелки (z=1 м)

На рисунках 4–5 приведены профили значений температур и концентраций для варианта Б по высоте топki, осредненных по горизонтальным сечениям. Кроме того, штриховой линией на рисунке 4 показаны максимальные значения температуры по высоте

ПРЕДПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЭС МОЩНОСТЬЮ 4800 МВТ НА УГЛЕ ШИВЭ-ОВООСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОНГОЛИИ

топки. Следует отметить, что картины полей и профили основных величин в вариантах А и Б расчетов достаточно близки между собой. Основные параметры в выходном сечении вихревой топки для вариантов А и Б помола угля приведены в таблице 5.

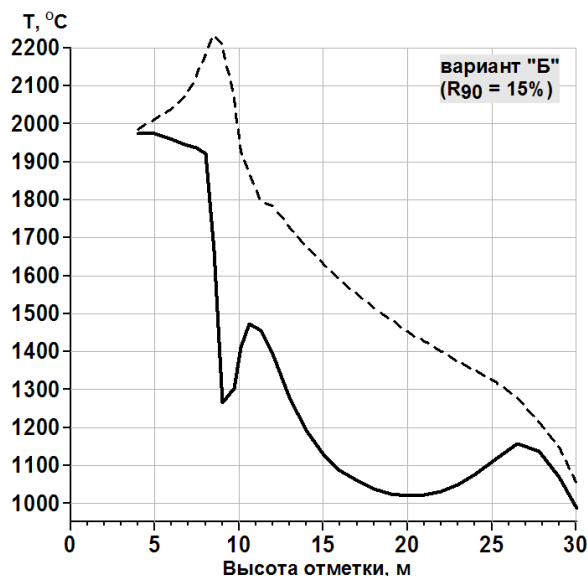


Рисунок 4 – Профили распределений по высоте топки температуры (вариант Б); сплошная линия – значения, осредненные по горизонтальным сечениям, штриховая линия – максимальные значения по горизонтальным сечениям, $^{\circ}\text{C}$

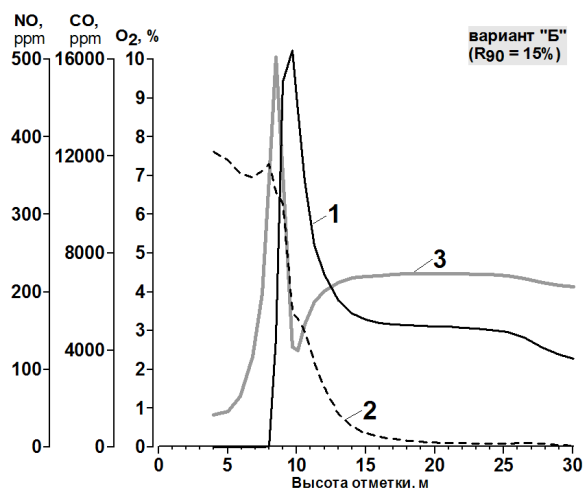


Рисунок 5 – Профили распределений по высоте топки объемных концентраций O_2 (кривая 1), CO (кривая 2), NO (кривая 3), осредненных по горизонтальным сечениям (вариант Б)

Разогрев входной струи пылеугольного факела сопровождается интенсивным процессом выхода летучих, поле концентрации которых показано на рисунке 6. Сгорание летучих в газовой фазе обуславливает интенсивный прогрев и зажигание коксовых частиц,

в результате чего выделяется монооксид углерода CO . Из анализа результатов расчетов видно, что максимум концентрации CO достигается ниже по течению пристенной факельной струи, чем зона максимальной концентрации летучих. Газофазное выгорание CO происходит и завершается в камере охлаждения, так что в выходном сечении топки концентрация CO составляет менее 71 ppm по объему (таблица 5).

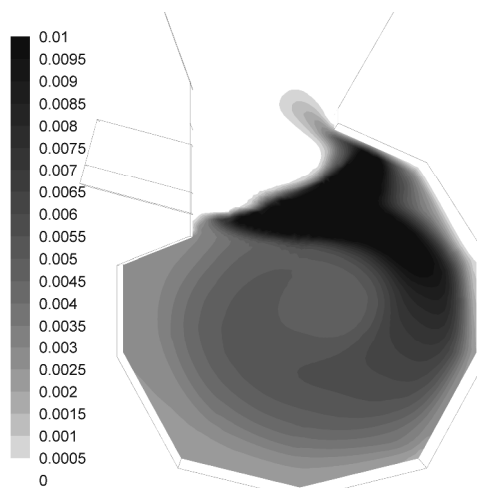


Рисунок 6 – Изоконтуры объемных долей летучих в сечении по центру горелки ($z=1$ м) в вихревой камере сгорания

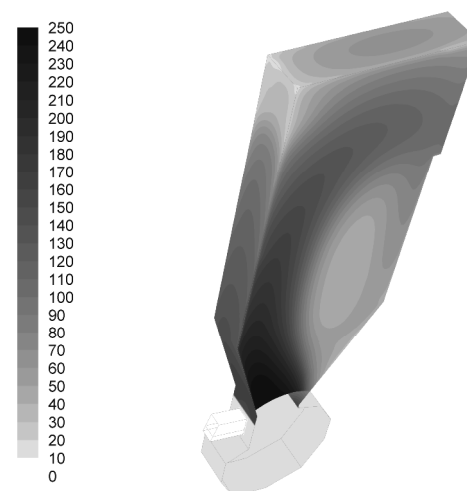


Рисунок 7 – Тепловые потоки на стенках (вид на ширмовый экран), kW/m^2

Распределение результирующих тепловых потоков на тепловоспринимающих поверхностях топки показано на рисунке 7, откуда видно, что максимальные значения воспринятых тепловых потоков приходятся на нижнюю часть ширмы (в сечении $z=2$ м). Поле теплового потока на поверхности ширмы отслеживает поле температуры внутри камеры

охлаждения. Охлаждение дымовых газов по высоте топki происходит достаточно эффективно: максимальное локальное значение температуры в выходном сечении составило в обоих вариантах менее 1100°C (таблица 5) – такой уровень температур на выходе из топki обычно укладывается в заданные технические требования.

Таблица 5 - Параметры в сечении на выходе из вихревой топki

Наименование параметра	Вариант А R ₉₀ =12 %	Вариант Б R ₉₀ =15 %
температура (максимальное значение) T _{max} , °C	1089.65	1099.32
температура (осредненное значение) T _{av} , °C	1044.69	1046.07
концентрация O ₂ по объему, %	2.633	2.651
концентрация CO по объему, ppm	56.03	70.95
коэффициент q ₄ потерь тепла от механической неполноты сгорания, %	1.203	1.524
концентрация NO по объему, ppm	233.1	215.7
концентрация NO ₂ (с пересчетом на 6% содержание O ₂), мг/м ³	390.3	361.4

Заключение

На основе численного моделирования 3-D аэротермохимической структуры реагирующего двухфазного турбулентного потока в перспективном парогенераторе с вихревой технологией сжигания распыленного угля выполнено расчетное обоснование параметров проектируемой КЭС мощностью 4800 МВт на буром угле Шивэ-Овооского месторождения Монголии. Получены детальные распределения полей скорости, температур, концентраций, тепловых потоков в различных сечениях исследуемой вихревой топki, а также ее основные теплотехнические и экологические характеристики. В расчетах использовался CFD-пакет FLUENT версии 6.3, установленный на суперкомпьютерном кластере НКС-160 (ССКЦ СО РАН, Новосибирск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топki парогенератора // ИФЖ – 2012, Т. 85, № 2, с.266-276.

2. T.-H. Shih, W.W. Liou, A.Shabbir, Z.Yang, and J. Zhu A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation // Computers&Fluids – 1995, vol.24 (3), pp. 227-238.

3. Launder B.E. and Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. – London (England): Academic Press, 1972.

4. Magnussen B.F. The Eddy Dissipation Concept. – IEA, 1989.

5. Смит Т.Ф., Шэнь З.Ф., Фридман Д.Н. Вычисление коэффициентов для модели взвешенной суммы серых газов // Теплопередача. – 1982. – Т. 104, № 4. – С. 25-32.

6. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива – М.:Наука, 1994, 320 с.

7. FLUENT 6.3 User's Guide // Fluent Inc., 2006.

8. Crowe C.T., Sharma M.P., Stock D.E. The Particle-Source-In-Cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows // ASME Journal of Fluids Engineering – 1977, vol. 99, No.2, pp.325-332.

9. Х.Энхжаргал, С.Батмунх, А.С.Заворин, В.В. Саломатов, А.Ю.Долгих Некоторые результаты исследования угля Шивэ-Овооского месторождения Монголии с целью его энергетического использования // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В.Е.Нагорякова. – Новосибирск:изд-во НГТУ, 2009, Вып.14, с.125-132.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 10-08-01093-а, 11-08-92202-монг-а, 12-08-90706-моб_ст) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Красинский Д.В.¹, к.т.н.

Саломатов В.В.^{1,2}, д.т.н., проф.,

e-mail: yvs@itp.nsc.ru

Энхжаргал Х.¹, докторант

¹ ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

² ФГБОУ ВПО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2