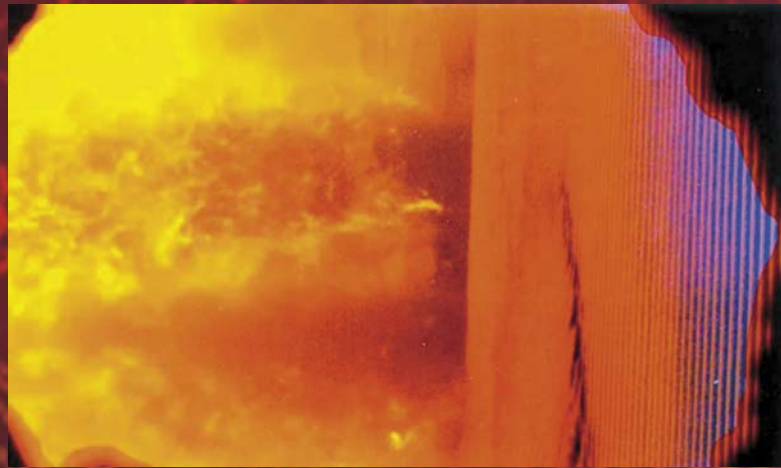


УГОЛЬНАЯ ТОПКА – ДЕЛО ТОНКОЕ



В условиях роста цен на нефть и газ наиболее выгодным топливом для производства электроэнергии становится уголь. Современные энергоблоки теплоэлектростанций достигают мощности 1 000 МВт, а сами процессы сжигания угля в котлах настолько сложны, что учесть все детали на стадии проектирования практически невозможно. Точно рассчитать необходимые параметры топочных процессов и найти способы повысить эффективность работы энергоблоков позволяют компьютерные модели

Ключевые слова: топочные процессы, компьютерное моделирование, шлакообразование.

Key words: burning processes, computer modeling, slag formation

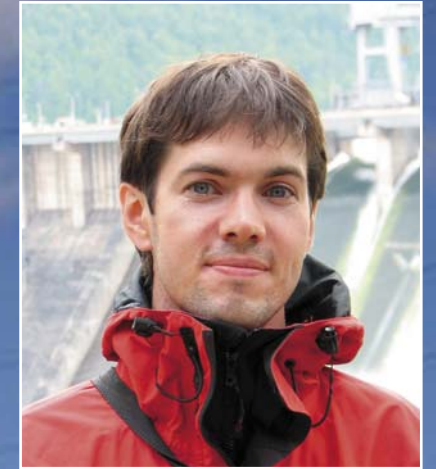
© А. А. Дектерев, Е. С. Тэпфер, М. Ю. Чернецкий, 2012



ДЕКТЕРЕВ Александр Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплофизики Сибирского федерального университета (Красноярск), старший научный сотрудник Института теплофизики СО РАН (г. Новосибирск). Автор и соавтор более 100 научных работ



ТЭПФЕР Елена Сергеевна – кандидат технических наук, научный сотрудник Института теплофизики СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 35 научных работ



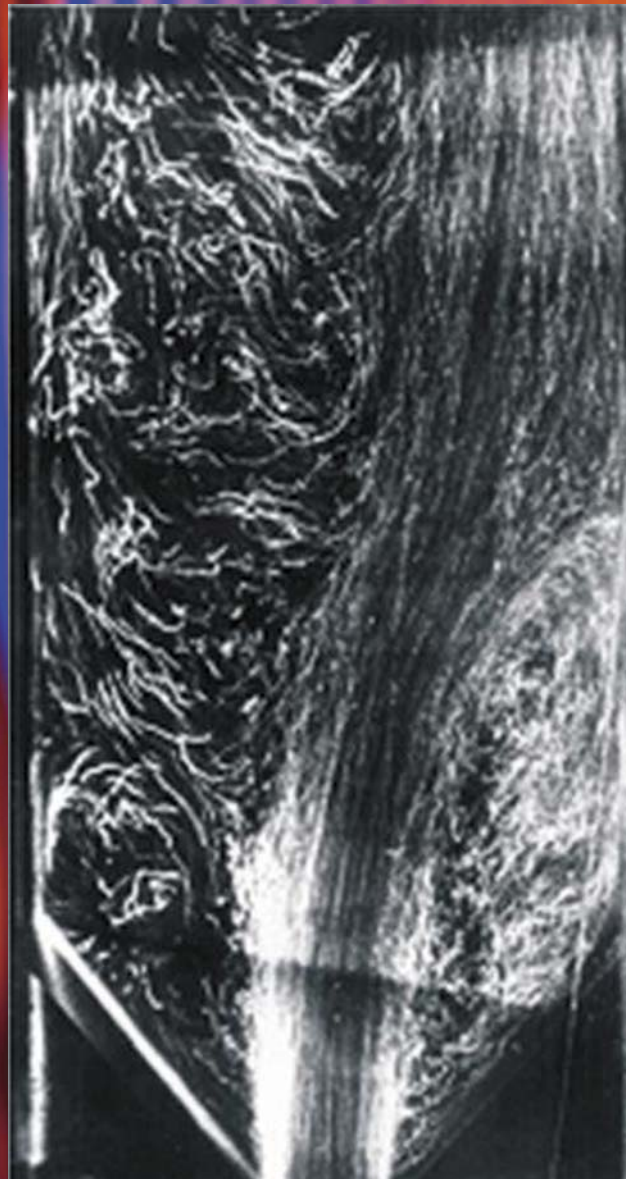
ЧЕРНЕЦКИЙ Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института теплофизики СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 35 научных работ



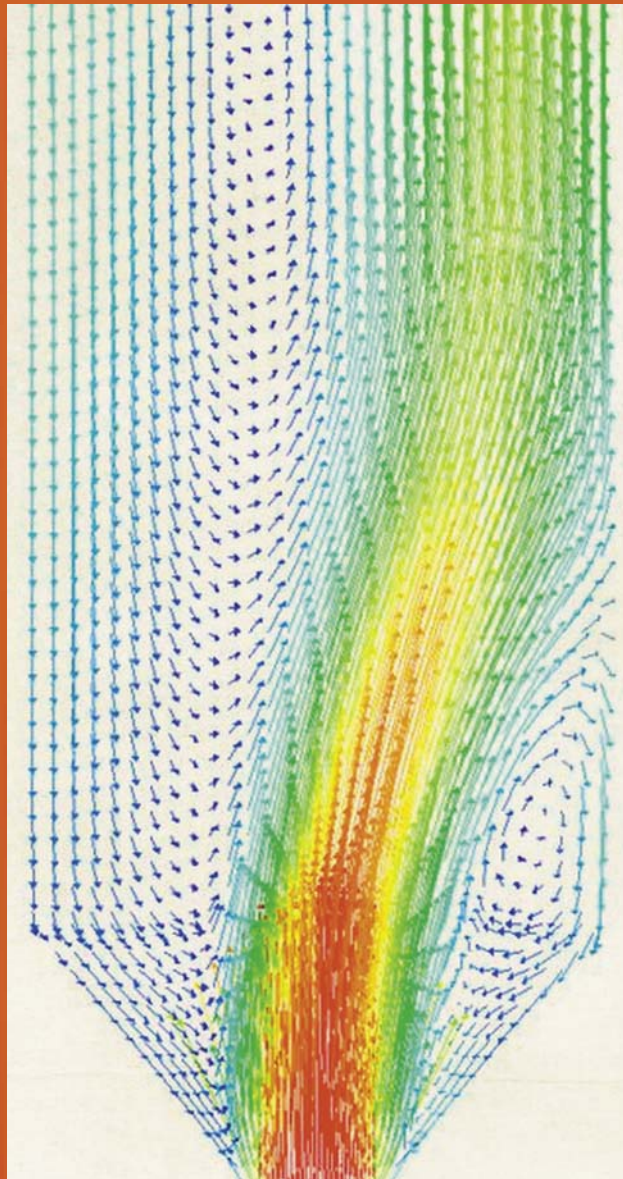
На Березовской ГРЭС (г. Шарыпово, Красноярский край) установлены два угольных котла П-67 проектной мощностью 800 МВт каждый. Станция использует бурый уголь Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна, который поступает на ГРЭС по транспортеру длиной 14 км



Согласно проекту в нижней части топочной камеры котла П-67 – так называемой холодной воронке – должны скапливаться твердые частицы шлака, которые затем удаляются шнековым транспортером. Но во время эксплуатации на стенках холодной воронки могут образовываться шлаковые отложения, которые нарушают работу шнека

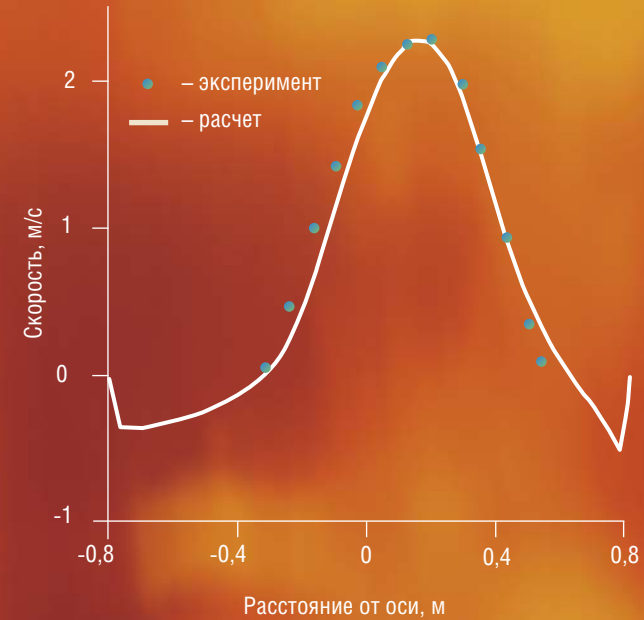


Визуализация течения в модели фонтанно-вихревой топки

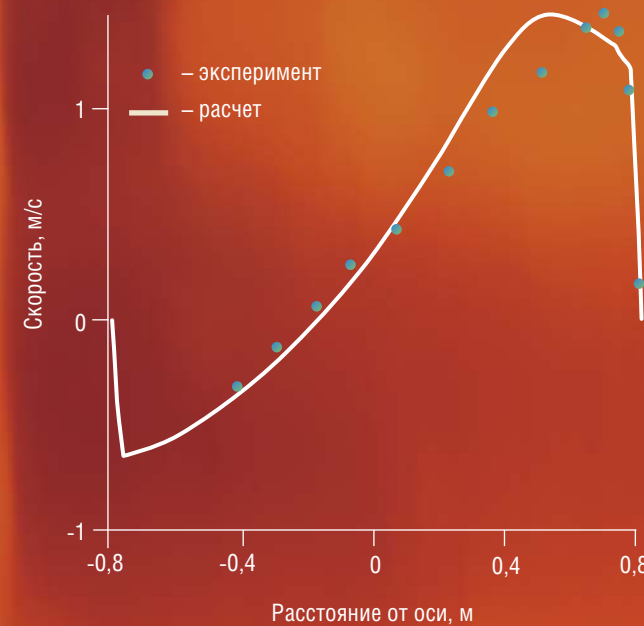


Расчетное поле скоростей в модели фонтанно-вихревой топки

Профиль скорости на высоте топки 110 мм



Профиль скорости на высоте топки 325 мм



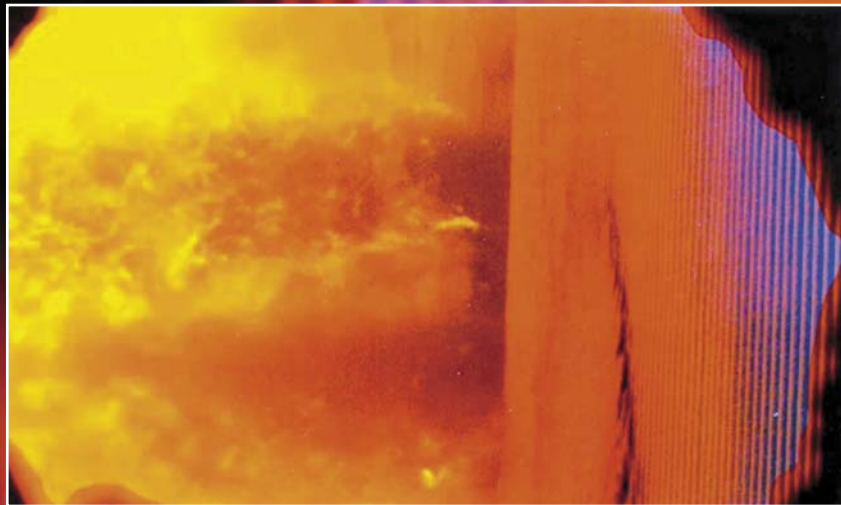
На современных энергостанциях уголь сжигается в факеле в виде пыли тонкого помола, которая вдувается в топку потоком воздуха через специальные горелки. Сама топка представляет собой высокую, несколько десятков метров, башню, внутри которой установлены специальные теплообменники для нагревания («перегрева») пара, подогрева воды или воздуха. Такой способ сжигания угля весьма перспективен, поскольку позволяет сравнительно легко управлять процессом горения.

В советское время основным научным подходом при создании энергетических котлов служило сжигание топлива в экспериментальных условиях. Но таким способом нельзя выявить всех особенностей процессов горения угля, которые проявятся во время штатной, длительной эксплуатации топочных котлов. В том числе определить, как скажется качество топлива на процессах шлакования, т.е. образования связанных отложений на поверхностях нагрева котельной топки.

Для тестирования вычислительной модели, описывающей движение газов в топке, исследовался турбулентный поток в вертикальной призматической фонтанно-вихревой топочной камере с двухскатной воронкой. Топливная пылевоздушная смесь подавалась в камеру через прямооточное прямоугольное сопло снизу, образуя вертикальный фонтанирующий факел.

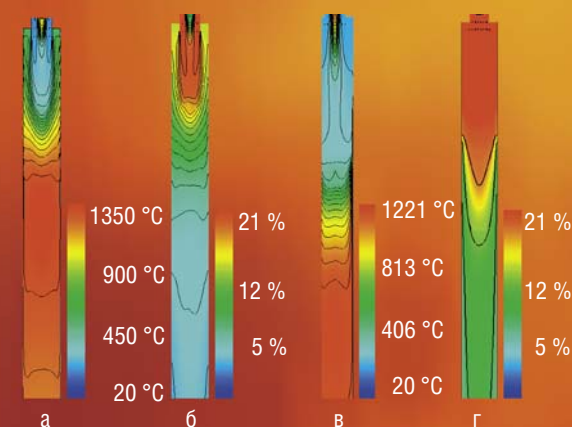
Экспериментальное исследование топочной камеры проводилось в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе на гидравлическом стенде в изотермических условиях, где аэродинамика реальной горячей смеси угля и газов моделировалась с помощью течения жидкости. Визуализация потока осуществлялась мелкими воздушными пузырьками при боковом освещении их «световым ножом». Уже первые испытания показали, что истекающая из прямоугольного сопла струя устойчиво присоединяется за счет эффекта Коанда к одной из стенок. На базе этого эксперимента было проведено компьютерное моделирование с использованием пакета программ «SigmaFlow». Выбранная модель изотермического движения газов с учетом турбулентности потока и правильно сформулированных граничных условий позволила достичь хорошего соответствия экспериментальным измерениям

Сравнение профилей скорости газовых потоков на разной высоте фонтанно-вихревой топочной камеры, рассчитанных с помощью пакета программ «SigmaFlow», с данными экспериментов показало их хорошее соответствие



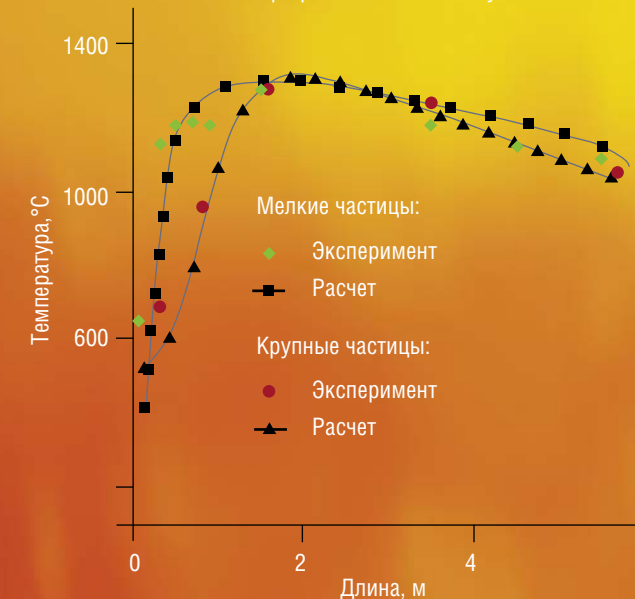
Факел горячей пылеугольной смеси на выходе из горелки. Так как в топке газы разогреваются до высоких температур, при моделировании топочных процессов важно учесть теплообмен. В модели, созданной сибирскими специалистами, учитывается преимущественно радиационный перенос энергии между частицами угля, газом и стенами топки. Именно такой выбор позволяет адекватно описывать процессы, происходящие при горении пылеугольной смеси

Распределение температуры и кислорода в камере сгорания

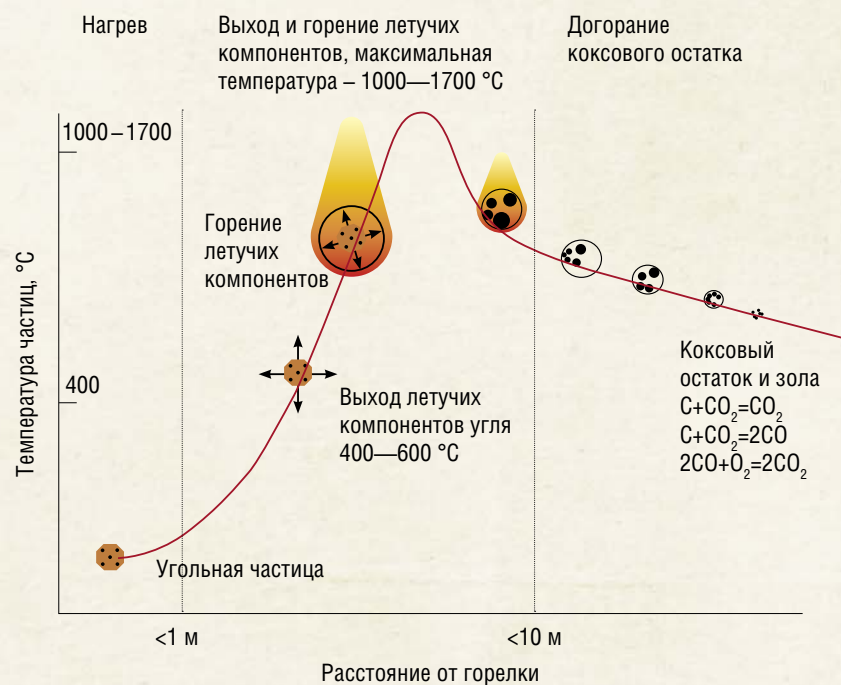


- а) Температура при $\alpha=1,14$
- б) Концентрация кислорода при $\alpha=1,14$
- в) Температура при $\alpha=1,72$
- г) Концентрация кислорода при $\alpha=1,72$

Температура вдоль камеры сгорания при различном помоле угля



Сгорание угольных частиц происходит в несколько этапов. Сначала частица нагревается, и когда ее температура превысит 400 °С, начинается выделение летучих низкомолекулярных органических соединений, находящихся в составе каменного угля. Они начинают гореть и температура резко повышается. После сгорания всех выделившихся летучих соединений происходит догорание коксового остатка – частичек угля, преимущественно содержащих углерод. Поскольку частицы угля движутся вместе с факелом, берущим начало в сопле горелки, все эти этапы разнесены не только во времени, но и идут на разном удалении от горелки



Для верификации компьютерной модели горения угля были выбраны результаты сжигания бурого ирша-бородинского угля на огневом стенде. Расчеты показали, что уменьшение размера угольных частиц приводит к более раннему воспламенению угольной пыли, а увеличение коэффициента избытка воздуха α – к снижению температуры в топочной камере и уменьшению темпа роста температур по длине факела. При этом имеющиеся экспериментальные измерения хорошо совпали с результатами расчетов

Слишком горячо

В проектировании и технологической доводке котлов П-67 на Березовской ГРЭС, самых больших и мощных в России, принимали участие многие научно-исследовательские институты и машиностроительные заводы, в частности, Подольский машиностроительный завод им. С. Орджоникидзе.

Первый блок ГРЭС был запущен в 1988 г., второй – через три года. Уже через несколько лет работы котлов выяснилось, что, несмотря на все усилия проектировщиков, эксплуатационные характеристики топочных котлов оказались ниже проектных. Причина заключалась в том, что на топочных экранах происходил рост прочных шлаковых отложений.

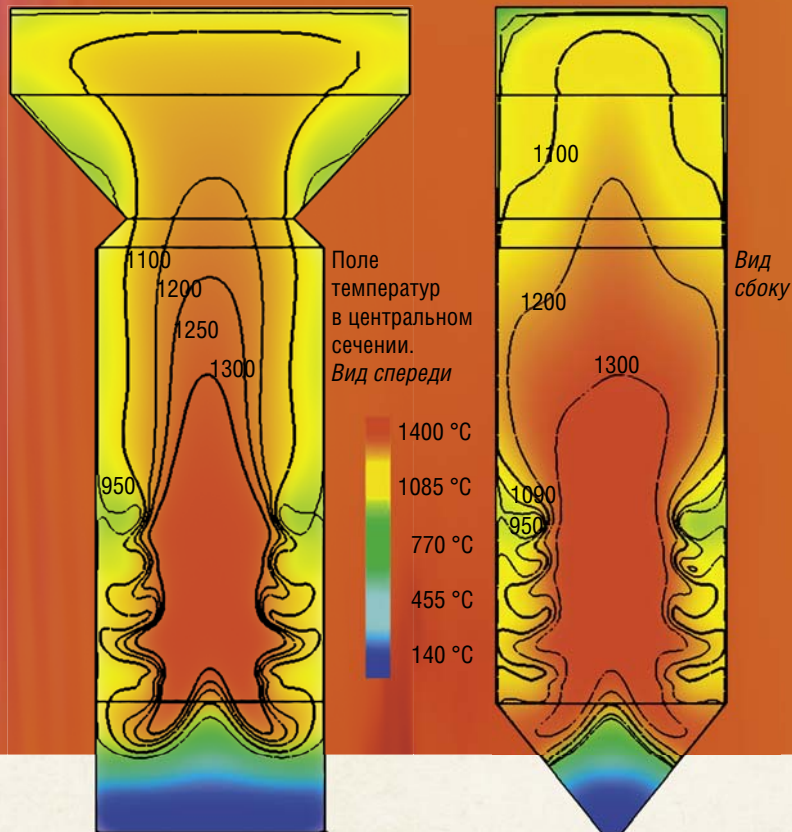
Дело в том, что при сгорании углей получается большое количество золы, способной образовывать шлаковые отложения. Если температура частиц золы будет выше температуры плавления золы, то расплавленный шлак осядет на стенках топки и поверхностях теплообменников, затвердеет и будет мешать работе

Коэффициент избытка воздуха α – отношение объема воздуха, подаваемого в топку, к тому объему, который необходим для полного сгорания находящегося в топке топлива. Например для сгорания 1 кг березовского угля нужно около 4,3 м³ воздуха. Если в пылеугольной смеси содержится 1 кг угля на 8,6 м³ воздуха, то коэффициент избытка воздуха будет $\alpha=2$

котла. Однако если создать температурные условия, при которых зола останется твердой, то основная ее масса попадет в холодную воронку и золу можно будет удалить механически. Например, при помощи шнеков или транспортеров, как это и было задумано для котла П-67.

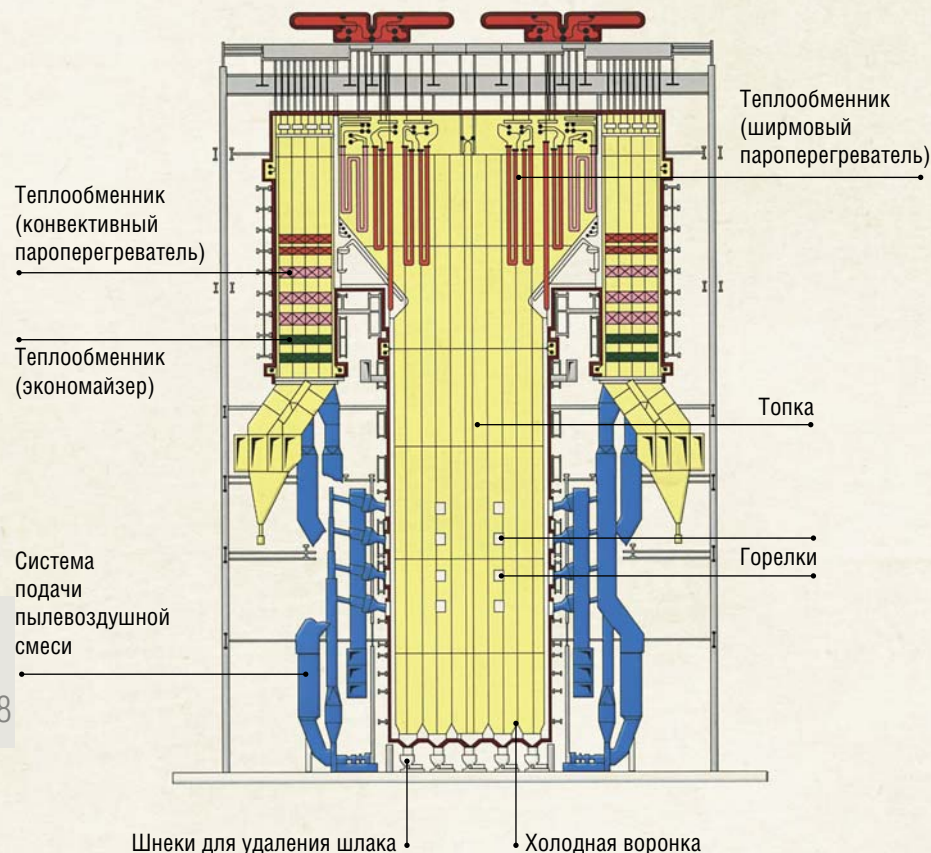
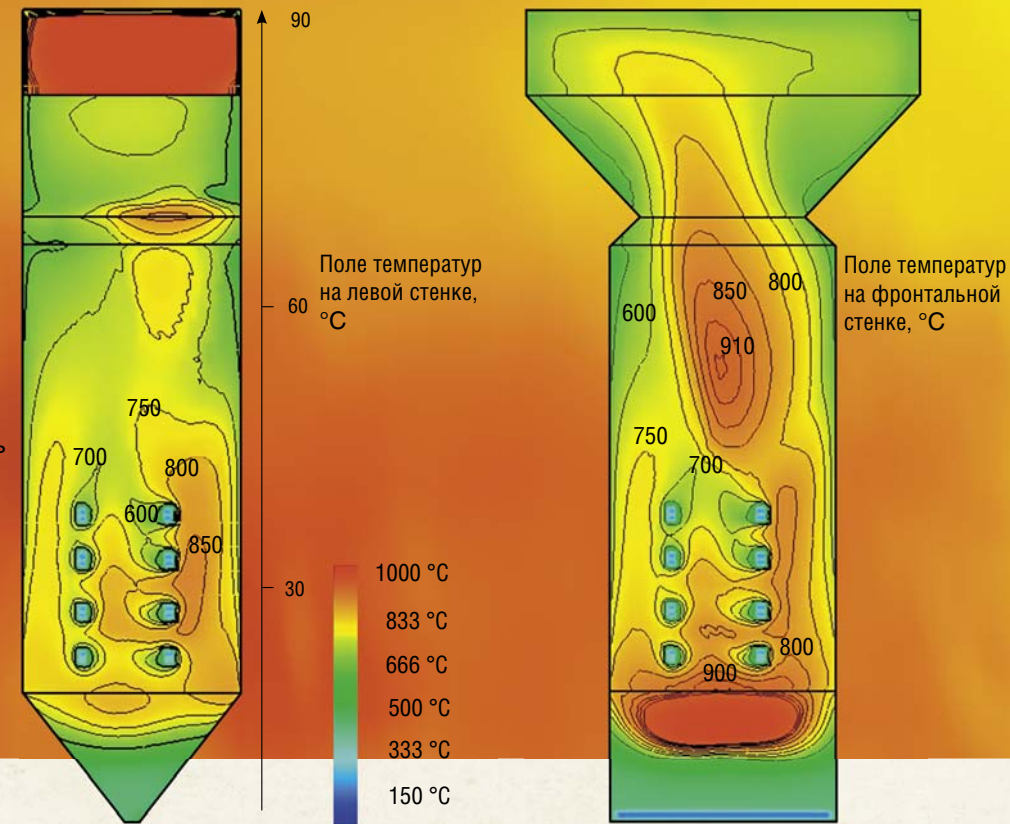
Однако выяснилось, что при достижении номинальной мощности во время эксплуатации котлов показатели интенсивности теплообмена в топке были ниже проектных, наблюдалось прогрессирующее шлакование топочной камеры, сопровождающееся ростом максимальной температуры газов на выходе, которая превышала проектные 1032°С более чем на 100°С. Образовавшиеся глыбы шлака при падении повреждали детали конструкции холодной воронки – нижней части топки под горелками, предназначенной для сбора и удаления твердых частиц шлака, а локальное шлакование ее скатов приводило к вынужденным остановкам котлов.

В угольной топке котла П-67 наиболее крупные (более 300—400 мкм) фракции угольной пыли под действием силы тяжести и в результате наклона горелок начинают выпадать вниз, имея при этом тангенциальную составляющую скорости. С учетом большого времени выгорания они достигают скатов холодной воронки, все еще продолжая гореть. В результате в области стенок холодной воронки температура повышается. Газовый поток с горящими частицами движется по касательной вдоль середины левой и правой стены холодной воронки, постепенно поднимаясь к углам топочной камеры. Догорая, частицы с достаточно высокой температурой формируют шлаковые отложения в форме дуги, тянущейся до верхней части угла холодной воронки. В дальнейшем по углам топочной камеры происходит только подъемное движение газов, у которых тангенциальная составляющая скорости отсутствует. Поэтому по углам топочной камеры не происходит интенсивного шлакования, несмотря на значительное присутствие летучей золы



Измерить температуру, скорость газа и пр. в почти стометровом пламени мощностью 800 МВт обычными средствами достаточно трудно. Современные программы, однако, позволяют рассчитать необходимые параметры, значительно облегчая задачу исследователям и проектировщикам. Создать такую программу – дело не одного десятка лет, нужно учесть все происходящие в топке процессы и тщательно проверить ее работоспособность

Слева - поле температур в центральном сечении котла П-67
справа - поле температур на стенках котла П-67
Распределение температур в котле рассчитано с помощью пакета «SigmaFlow»



Пылеугольный котел П-67 – самый большой энергетический котел, производимый в России. Он потребляет примерно 160 тонн угля в час, по мощности (800 МВт) он превосходит гидроагрегаты современных ГЭС. Котел оснащен высокотехнологичным оборудованием – шаровыми мельницами, измельчающими уголь в пыль размером 100 мкм, системами контроля температуры, фильтрами для очистки уходящих газов. Чтобы использовать выделяющееся при горении угля тепло, в котле предусмотрено несколько ступеней теплообменников. Каждый элемент котла насыщен научными идеями из различных областей – теплофизики, теории горения, химии и др.

Поэтому на основании данных балансовых испытаний было предложено понизить рабочую мощность котлов, в результате чего в 2000 г. энергоблоки были перемаркированы с мощности 800 МВт на 700 МВт. Стало ясно, что необходимо искать новые методы, которые помогут устранить недоработки проекта и выйти на проектную мощность.

Компьютер в помощь

Только через десять лет после ввода в действие Березовской ГРЭС появился новый мощный инструмент для изучения процессов, происходящих в топочной камере. Речь идет о математическом моделировании, позволяющем изучить аэродинамику топки, теплообмен, процессы образования оксидов азота и шлакования для различных режимов эксплуатации и вариантов реконструкции топочно-горелочного устройства. Разработкой такой компьютерной модели занялись специалисты Института теплофизики СО РАН (Новосибирск) и Сибирского федерального университета (Красноярск).

При создании методики численного моделирования топки было необходимо выбрать из большого числа существующих моделей физических процессов тот минимальный набор, который позволил бы достоверно описать интересные явления и проверить

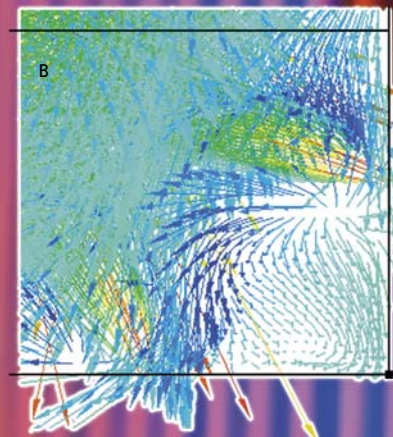
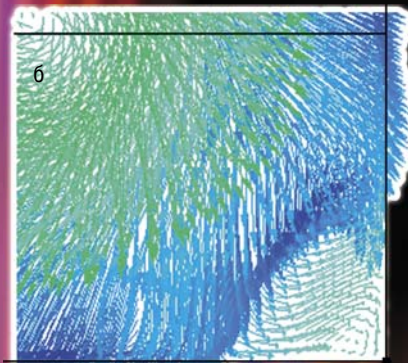
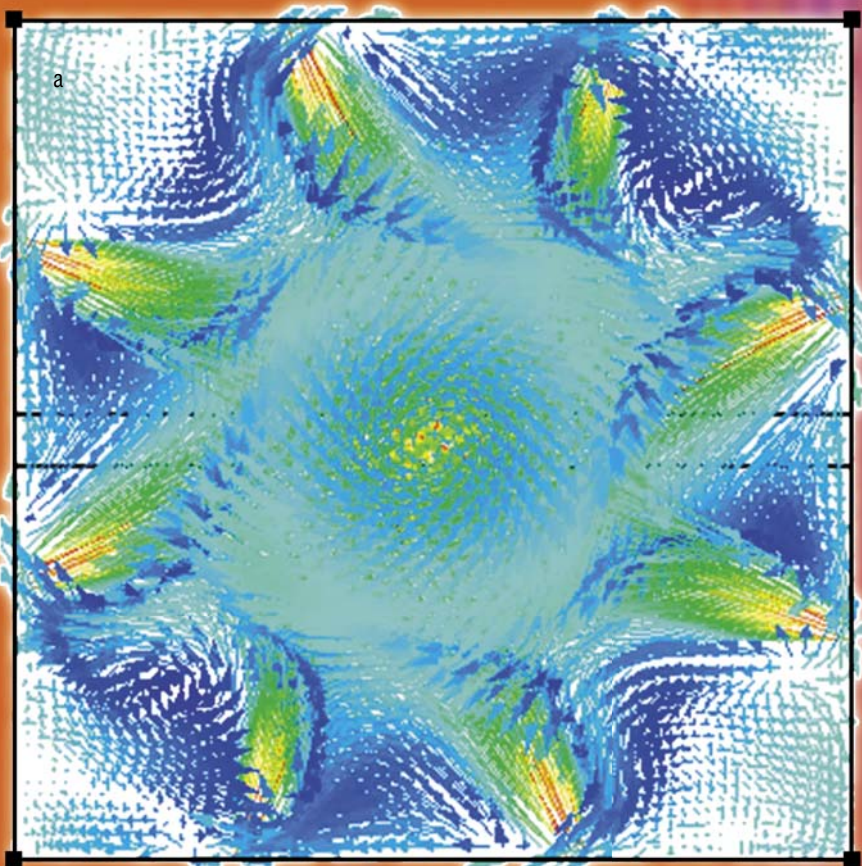
адекватность выбранных методик расчета, сравнив их с экспериментом. Ведь процесс шлакования далеко не прост: он является своего рода результирующей всех процессов, происходящих в топочной камере, от аэродинамических до тепловых. Также на него влияют и свойства минеральной части топлива.

Поэтому разработка самой концепции математического моделирования шлакования началась лишь два десятилетия назад, когда появились мощные вычислительные ресурсы, позволившие рассматривать все вышеперечисленные процессы в совокупности.

В конечном итоге на свет появился программный продукт «SigmaFlow», который позволил с высокой точностью провести численные исследования и определить наконец причины образования шлаковых отложений в топке котла П-67.

Было установлено, что аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере обладает высокой неравномерностью: крупномасштабный центральный вихрь инициирует вторичные вихри в углах топочной камеры, которые приводят к набросу потока на стенку топки, температура которой начинает повышаться. На этой перегретой поверхности образуются шлаковые отложения.

Отложение шлака происходит также около горелок, особенно по нечетным вертикальным рядам.



Векторное поле скорости газов (пламени) в топке котла П-67 рассчитано с помощью пакета «SigmaFlow»:

- а) восемь горелок первого яруса создают вихревое течение, улучшающее условия горения пылеугольной смеси;
- б) в углу топки образуется мертвая зона, в которой вихри менее интенсивны, чем в центре;
- в) между ярусами горелок есть зоны, в которых происходит наброс потока на стенку камеры котла

Основная причина этого явления – осаждение мелкой фракции золы, частицы которой вовлекаются в движение вторичными вихрями в углах топочной камеры. Обладая достаточно высокой температурой, они достигают экрана, где и образуют шлаковые отложения.

Еще одно место интенсивного шлакования находится на фронтальной и задней стенках котла выше зоны активного горения – на высоте 45–65 м. На этом уровне центральный вихрь, раскручиваясь, быстро теряет осевую симметрию и приобретает овальную форму, вытянутую к фронтальной и задней стенкам. В результате там образуются области с высокой температурой, и расплавленные частицы золы «набрасываются» на стенки газовым потоком.

Шлаку – нет!

На основе численного моделирования и результатов ряда других исследовательских работ было предложено несколько способов решения проблемы шлакования. Было рассмотрено несколько вариантов топки: с организацией нижнего дутья с подводом воздуха в холодную воронку; с концентрической ориентацией горелок; с комбинацией нижнего дутья и концентрического сжигания; организацией воздушного дутья выше зоны активного горения и т. д.

Результаты численных исследований показали, что максимальный эффект по снижению шлакования поверхностей нагрева относительно «базового» варианта достигается при использовании блоков воздуш-

Отложения шлака на фронтальном экране котла № 1 Березовской ГРЭС. Слева внизу – результаты моделирования, справа внизу – фотография котла изнутри. Видно, что результаты расчетов хорошо отражают реальную картину. Программа, рассчитывающая процессы шлакообразования в энергетическом котле, – мощный инструмент, позволяющий без проведения трудоемких экспериментов оптимизировать работу энергетического агрегата

ных завес и нижнего дутья; а максимальный эффект по снижению выбросов NO_x – двух ярусов сопел дутья, расположенных на высотах 45 и 65 м.

В результате для реконструкции котла был выбран вариант топки с нижним воздушным дутьем. Расчетным путем были также проанализированы разные способы подвода воздуха в холодную воронку, и из них выбран оптимальный, способствующий равномерной подаче воздуха в топочную камеру.

Кроме того, с помощью численного моделирования было исследовано влияние степени помола угольной пыли на эффективность топочного процесса. Согласно расчетам, загрузка нижних ярусов горелок более грубой пылью снижала содержание золы в верхней части котла. При этом повышался провал частиц угля в холодную воронку, однако этому при нижнем дутье препятствовал поток воздуха, идущий снизу вверх. А за счет подвода дополнительного кислорода оказалось возможным снизить содержание несгоревшего углерода в частицах.

Один из энергетических блоков Березовской ГРЭС был реконструирован в 2010 г. Его дальнейшая эксплуатация показала, что он может длительное время нести максимальную нагрузку на уровне проектной, т. е. 800 МВт.

На примере Березовской ГРЭС мы видим ту огромную бесспорную пользу, которую может принести применение современных методов математического моделирования при проектировании крупных технологических объектов. И дело здесь не только в оптимизации эксплуатационных параметров, но и в значительной экономии средств на разработку: ведь гораздо дешевле просчитать интересные процессы, чем проводить натурные эксперименты.

Дело за малым – важно, что бы этими возможностями воспользовались производители энергетических котлов, гидротурбин, атомных станций и других крупных, высокотехнологичных и нередко представляющих экологическую угрозу объектов нашего промышленно-энергетического комплекса.

Литература

Белый В.В и др. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт газа // Теплофизика и аэромеханика, 2007. Т. 14. № 2. С. 299–312.

Backreedy R.I. et al. Modelling pulverised coal combustion using a detailed coal combustion model, Combustion Science and Technology. 2006. № 178(4). P. 763–787.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. контракт № 16.516.11.6036)

