

УДК. 621.565.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ ПГУ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Ременюк А.В., Микула В.А., Рыжков А.Ф., Махаев А.Д.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

В настоящее время одним из перспективных направлений в энергетике является ПГУ на твердом топливе. Специалистами предприятия «УралОРГРЭС» и УрФУ была разработана схема гибридной ПГУ на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива [1]. Эта схема включает в себя: высокоскоростной пиролиз угля в поточных аппаратах; подогрев циклового воздуха после компрессора в воздухонагревателе за счет сжигания полукокса до максимально возможной температуры; ввод полукокса при температуре процесса пиролиза непосредственно в топочное устройство; догрев циклового воздуха до расчетной температуры цикла путем сжигания пиролизного газа непосредственно в воздушном потоке перед вводом его в проточную часть газовой турбины.

Одним из ключевых элементов этой схемы является высокотемпературный воздухонагреватель (ВВЗН). Он позволяет эффективно передавать тепло, выделяющееся при сжигании, «чистым» рабочим средам для перспективных турбин, работающих при температуре 1750К, а также воздуху и другим газам, используемым в перспективных процессах [2].

Ставится задача нагреть воздух перед ГТУ до 1000-1300К за счет теплоты, выделяющейся при сжигании твердого топлива (полукокс или уголь); выбор оптимальной конструкции ВВЗН под эту задачу был сделан на основе литературного обзора. При выборе конструкционного материала учитывалось, что керамические материалы (имеющие самый высокий уровень максимальной температуры) не обеспечивают газоплотности конструкции даже при небольших избыточных давлениях, поэтому остановились на сталях.

Наибольшей жаростойкостью обладают стали, легированные хромом, при содержании его 25—30% максимальная температура для жаропрочных сталей достигает 1270—1370К. Для защиты оборудования из углеродистых и легированных сталей от окисления и коррозии при высоких температурах, а также от действия горячих агрессивных сред успешно применяют силикатные эмалевые покрытия. Применение эмалей, разработанных ГНЦ РФ ОАО «Уральский институт металлов», позволят работать трубам при температуре до 1470К [3]. В результате, для дальнейших расчетов ВВЗН было принято ограничение по максимальной температуре материала – не более 1270К.

Для достижения требуемой температуры подогрева воздуха (1000-1300К) в воздухонагреватель должен иметь 2 секции: конвективную и радиационную. Использование более компактных регенеративных или пластинчатых конструкций для конвективной секции неприемлемо, прежде всего, потому, что в продуктах сгорания присутствуют частицы золы, а указанные конструкции плохо приспособлены для очистки. В результате, для конвективной секции выбрана рекуперативная конструкция из стальных труб.

В радиационной части принята классическая конструкция с экранными трубами. Совершенствование радиационной части ВВЗН может осуществляться благодаря использованию эффективных способов интенсификации теплообмена. Одним из способов является использование вставок внутри труб для увеличения внутренней поверхности теплообмена [4], что позволяет повысить температуру подогреваемого воздуха и удельное тепловосприятие ВВЗН, а также уменьшить температуру стенок и термические напряжения [5]. Использование вставок в радиационной части ВВЗН, используемого в схеме ПГУ, должно сделать его более компактным. Кроме того, можно ожидать уменьшения металлоемкости. Толщина стенки наружной трубы рассчитывается на разницу давлений воздуха и продуктов сгорания в десятки бар, а внутренняя вставка окружена с обеих сторон воздухом с одним давлением, и создавая дополнительную внутреннюю поверхность теплообмена, она может иметь минимальную толщину.

Для оптимизации конструкции радиационной части ВВЗН было проведено поисковое исследование (в пакете ANSYS) в области теплообмена в трубах со вставками. Для моделирования среди множества возможностей программы было выбрано приложение ANSYS CFX, так как оно позволяет произвести расчеты и анализ гидрогазодинамических процессов, многофазных потоков, химической кинетики, горения и радиационного теплообмена.

В исследовании проведено моделирование теплообмена в коаксиальных трубах (рис. 1). Рабочей средой в обеих трубах является воздух. Газы отдают теплоту стенкам излучением и конвекцией, внешняя труба переизлучает теплоту на внутреннюю трубу, а воздух, омывая внешнюю трубу с внутренней стороны и внутреннюю трубу с обеих сторон, получает теплоту конвекцией.

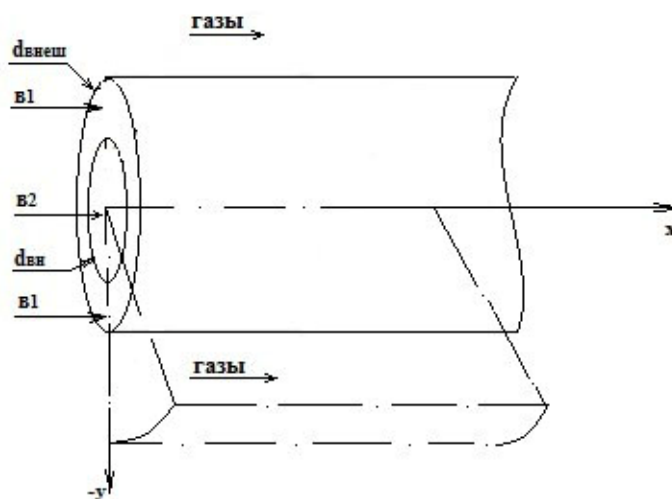


Рис. 1. Геометрическая модель: в1, в2 – воздух в наружной трубе, воздух во внутренней трубе; dвн, dвнеш – диаметр внутренней трубы, диаметр наружной трубы

Конструктивными характеристиками геометрической модели являются:

- диаметр внешней трубы – 83 мм, принят из условия обеспечения принятой скорости воздуха на входе (18 м/с);
- диаметр вставки (внутренняя труба) – 51 мм, принят из условия равенства расходов воздуха во внутренней трубе и в зазоре между трубами;

- материал стенки обеих труб – сталь;
- толщина стенки обеих труб – 3.5 мм¹⁾;
- ширина потока продуктов сгорания – 120 мм;
- длина излучающего слоя – 2000 мм

Важной процедурой первого этапа является построение сетки. Для уменьшения размерности задачи рассматривается процесс теплообмена в сегменте в 5° для одной трубы. В связи с этим был выбран метод контрольного объема. Сетка ортогональная, блочная. В процессе исследования сравнивались три сетки с разным количеством элементов. Количество элементов первой сетки составляет 5400, второй сетки – 21600. Третья сетка имеет такое же количество элементов, как и вторая (21600), но на пограничном слое сделана более частой (в 1,5 раза). Полученные результаты на второй и третьей сетках отличаются в пределах заданной погрешности ($\pm 30\text{K}$), следовательно, дальнейшее увеличение плотности сетки, не влияя на решение задачи

Для расчета излучения использовались модель P1 [6] и модель серого газа. Для моделирования конвективного теплообмена использовалась k- ϵ модель турбулентности. Был задан следующий массовый состав газов: $\text{CO}_2=0.12$, $\text{H}_2\text{O}=0.112$, $\text{N}_2=0.768$. На входе задавался установившийся профиль скоростей, а на выходе – нулевое избыточное давление. Схема движения сред в воздухонагревателе прямоточная, газы (продукты сгорания) на входе имеют температуру $T=1673\text{K}$ и скорость 1 м/с, а воздух – 723K и 18 м/с ($\text{Re}_v=17623$, режим течения – турбулентный). Температуры продуктов сгорания и воздуха взяты в соответствии с результатами инженерных расчетов ВВЗН, приведенных ниже, скорости приняты в соответствии с [7].

Моделирование выполнено для двух вариантов: труба со вставкой и без нее, результаты расчетов представлены на рис. 2–4.

Как видно из рис. 2, при использовании вставки средняя температура воздуха на выходе составляет 1150K, что на 105K выше температуры воздуха на выходе из трубы без вставки (1045K). Температура продуктов сгорания на выходе элемента воздухонагревателя при использовании вставки снижается на 90K по сравнению с вариантом без вставки (рис. 3)

При использовании одной вставки температура стенок внутренней и внешней труб на входе и выходе сред отличается на 40–50 K (рис. 4). Это может означать, что можно развивать систему вставок, т.е. внутри имеющейся вставки можно размещать еще вставки. Увеличение количества вставок может позволить увеличить внутреннюю поверхность теплообмена, температуру подогреваемого воздуха и уменьшить температуру стенки внешней трубы, что возможно позволит повысить температуру продуктов сгорания на входе ВВЗН и приблизить коэффициент избытка воздуха (в факеле, при сжигании твердого топлива) к оптимальному уровню, определяемому только полным выгоранием топлива. Следствием будет снижение объема продуктов сгорания и затрат электроэнергии на тягодутьевом оборудовании воздухонагревателя.

¹⁾при проектировании материал и толщина стенки будут приняты на основе расчета на прочность.

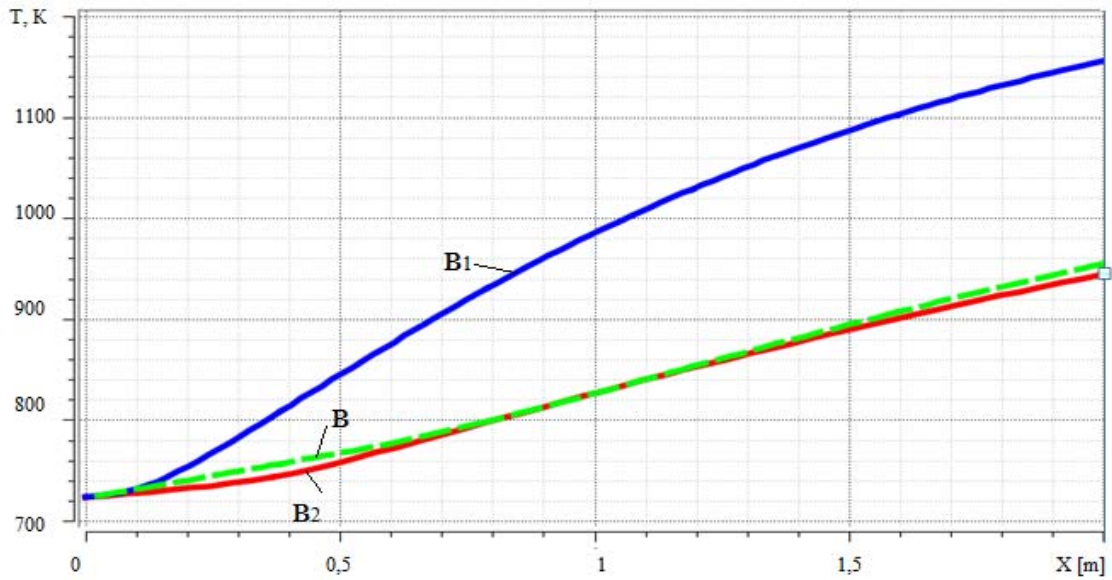


Рис. 2. Распределение температур воздуха по длине канала: труба со вставкой B_1 – между наружной и внутренней трубами, B_2 – во внутренней трубе; B – в трубе без вставки.

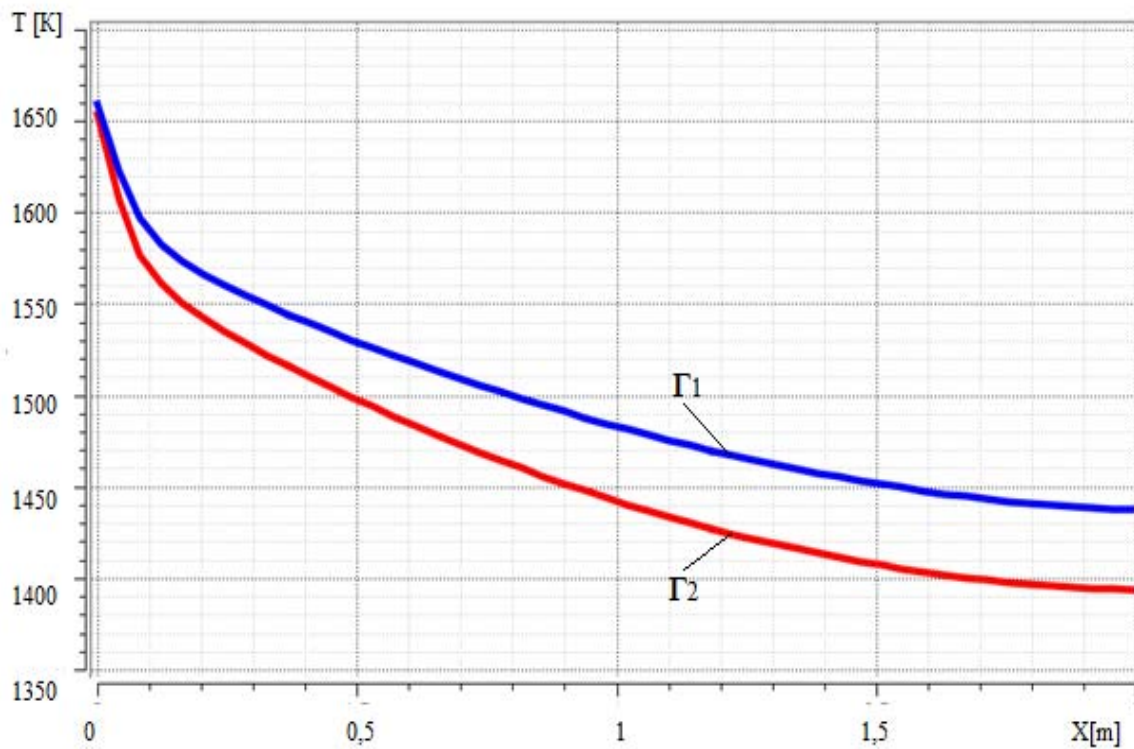


Рис. 3. Распределение температур продуктов сгорания по длине радиационного элемента ВВЗН: Γ_1 – с трубами без вставок, Γ_2 – с трубами со вставками.

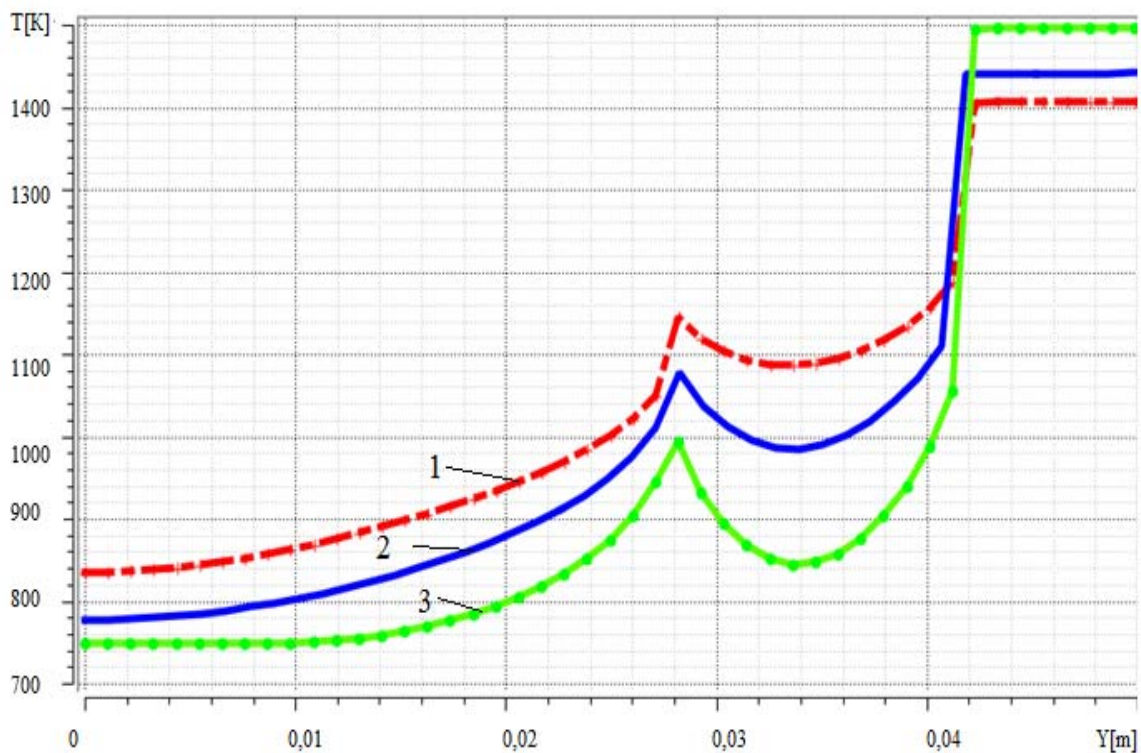


Рис. 4. Распределение температур сред в модели трубы со вставкой в радиальном направлении: 1 – $X=0.5\text{ м}$, 2 – $X=1\text{ м}$, 3 – $X=1.5\text{ м}$

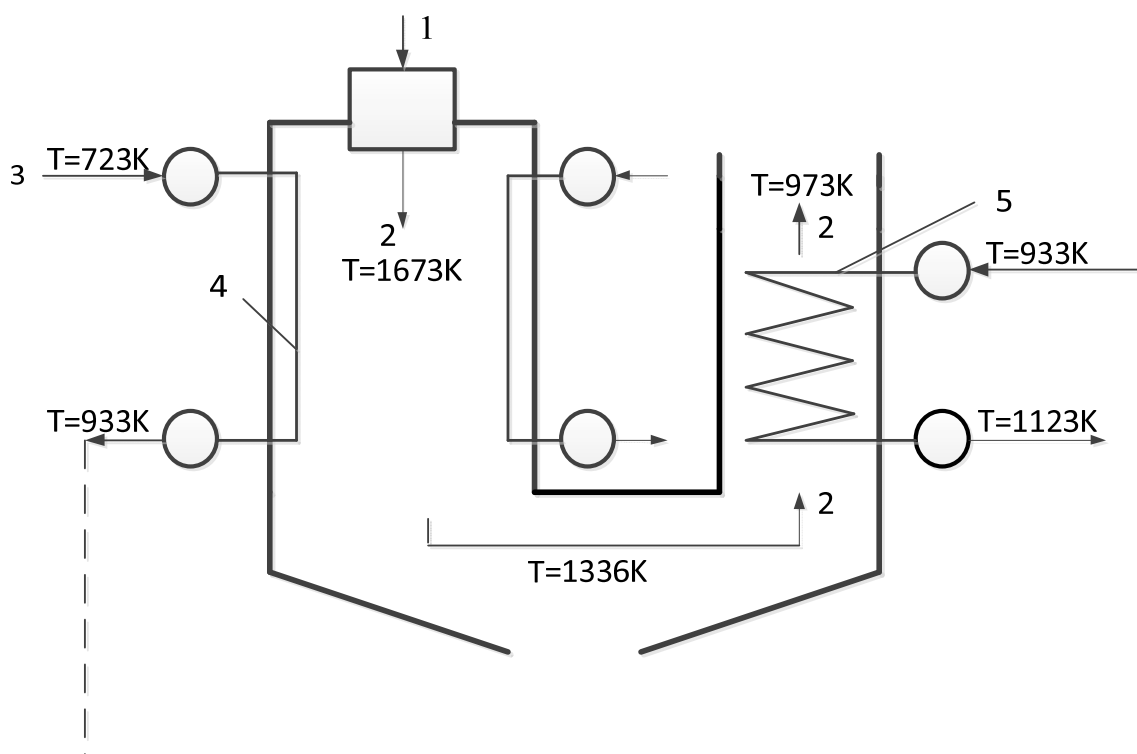


Рис. 5. Расчетная схема высокотемпературного воздухонагревателя: 1 – поток кокса и воздуха на горение; 2 – поток продуктов сгорания; 3 – поток воздуха на нагрев; 4 – радиационная секция ВВЗН; 5 – конвективная секция ВВЗН.

Из результатов поискового моделирования можно сделать следующие выводы и сформулировать задачи на дальнейшие исследования:

1. Необходимо провести моделирование на вставках иной формы, например, крестообразных [5], с целью выбора оптимальной формы, возможно, это окажется более эффективным способом увеличения внутренней поверхности теплообмена при минимальном росте сопротивления воздушного канала.
2. На завершающей стадии в модели необходимо будет учесть параметры реальной энергоустановки (габариты, мощность, давление воздуха и др.).

Поскольку принятое при моделировании представление заметно отличается от реальной конструкции радиационной части ВЗНН, а полученные результаты можно рассматривать как качественные оценки, поэтому далее производились инженерные расчеты.

Инженерные расчеты ВВЗН производились для гибридной схемы ПГУ на твердом топливе мощностью 32 МВт. В качестве прототипа для ВВЗН принята схема [8] воздушного котла для газотурбинной установки, работающего на угольной пыли. Цикловой воздух последовательно проходит через радиационную и конвективную секции рис. 5.

Исходными параметрами для расчета служили величины представленные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Единицы измерения	Численное значение
Температура воздуха на входе /выходе ВВЗН	К	723/1123
Массовый расход воздуха	кг/с	39
Скорость воздуха на входе в радиационную и конвективную секции	м/с	18
Давление воздуха в радиационной/конвективной секциях	атм	20/18
Температура газа на выходе конвективной секции	К	973

Расчет проводился в несколько стадий по следующему алгоритму:

1. Проводился конструктивный тепловой расчет ВВЗН (без использования вставок) [7], который состоял в совместном решении уравнений теплового баланса и теплопередачи и производился методом последовательных приближений. Задаваясь температурой продуктов сгорания на входе ВВЗН, определяли: температуры стенок труб на входе и выходе каждой секции ВВЗН; геометрические характеристики и площади поверхностей нагрева.

2. Проводился расчет радиационной секции ВВЗН со вставками по [9], используя геометрические характеристики, полученные на 1 стадии расчета. Одним из результатов этого расчета была средняя температура стенки наружной трубы, если использование вставок не позволяло снизить температуру стенки ниже 1273К, то задавались более низкой температурой продуктов сгорания на входе ВВЗН и корректировалась 1-я стадия расчета.

Полученные результаты инженерных расчетов по температурам воздуха и продуктов сгорания представлены на рис. 5, остальные в табл. 2.

Таблица 2

Параметры	Обозначения	Без вставки	Со вставкой*	
Ширина и глубина радиационной секции	м	3,5	3,5	
Диаметр внешней трубы	мм	83/76	83/76	
Диаметр внутренней трубы (вставки)	мм	-	56/51	
Длина внешних труб	м	14	12	
Количество труб в радиационной секции	шт	156	156	
Необходимая поверхность нагрева	м ²	534	464	
Число Рейнольдса для воздуха	Re	17623	17623	
Температура стенки внешних труб	на входе	К	1369	1219
	на выходе	К	1131	981
	средняя	К	1250	1101

Примечание: *В качестве вставки использовалась внутренняя труба

Таким образом, использование вставок в трубах радиационной секции позволило достигнуть следующих эффектов:

- снижение температуры стенки внешней трубы на 150К, при этом максимальная температура стенки (на входе радиационной секции) составляет 1219К, что ниже допустимого уровня;
- Теплоотдача с воздушной стороны увеличивается в 1,28 раз, и эффективный коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны достиг 50 Вт/(м²*°С);
- при передачи одинакового количества теплоты от продуктов сгорания к воздуху, поверхность теплообмена снижается с 534м² до 464м².

Литература

1. Инновационные технологии в энергетике / под общ. ред. Н.В. Ключковой. – Иваново: Научная мысль. 2011. С – 228.
2. Гринбаум М. Программа исследований, разработок и демонстраций новых технологий по экологически чистому использованию угля // Электрические станции. 2002. №1.
3. Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития производства нового поколения силикатно-эмалевых покрытий для защиты металлоизделий от коррозии и износа». Екатеринбург. Изд.: УрО РАН. 2007.
4. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) Теплоэнергетика. 2012. №1.
5. Сорока Б.С., Згурский В. А., Воробьев Н.В. Численный анализ характеристик высокотемпературного трубчатого рекуператора с внутренними вторичными излучателями как теплообменного аппарата. /Сборник научных статей «Современная наука». 2011.№2(7).
6. Modest. M. Radiative heat transfer. Second edition. San Diego, ed Academic Press. 2003.
7. Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М.: Metallurgia, 1975.
8. Щварц В.А. Конструкции газотурбинных установок. М. «Машиностроение», 1970.
9. А. А. Щукин. Экономия топлива в черной металлургии. Metallurgia, 1973.