680

ISSN 0136-3549 0320-3360

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI

TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

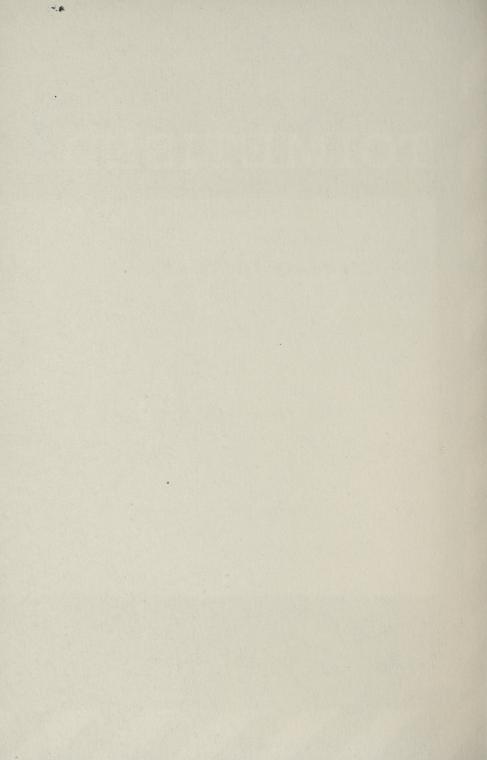
TRANSACTIONS OF TALLINN TECHNICAL UNIVERSITY

ПРОБЛЕМЫ РАБОТЫ

КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ





680

ALUSTATUD 1937

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

TRANSACTIONS OF TALLINN TECHNICAL UNIVERSITY

УДК 621.18:620.19

ПРОБЛЕМЫ РАБОТЫ

КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Теплоэнергетика XXXV

TALLINN 1988

Содержание

I.	Ниспуу Л.М., Таллермо Х.И. Воэможные направления развития энергетики Эстонии на ближайшие 20-50 лет	3
2.	Мислуу Л.М. Обсуждение вариантов развития энергети- ки Эстонии	II
3.	Пику Т.К., Рипс А.Х. О математическом описании гра- нулометрического состава мельничного продукта при грубом измельчении горючего сланца в центробежно- отражательной мельнице	26
4.	Энник Х.А., Пиху Т.К., Рипс А.Х. Возможности аппро- ксимации экспериментальных данных ситового анализа гранулометрического состава сыпучих материалов с помощью распределений Вейбулла, Розина-Раммлера	34
5.	Отс А.А., Арро Х.Х., Прикк А.В. Проблемы загрязнения, очистки и износа поверхностей нагрева котловутилизаторов МГД-электростанций	41
6.	Пайст А.А. Использование кипящего слоя для сжигания низкосортных топлив в КНР	57
7.	Ингерманн К.И., Сийрде А.Э. К расчету теплообмена в топках котлов.	72
8.	Вийлманн И.Р., Тийкма Т.Б. Некоторые теплофизиче- ские и радиационные характеристики сталей и окалины	83
9.	Отс А.А., Таллермо Х.И., Лайд Я.П., Рандманн Р.Э., Сийрде А.Э., Абрам Я.Б., Сийг Э.М. Температурный режим вторичного пароперегревателя пылесланцевого котла TI-IOI	90

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ Труды ТПИ № 680

ПРОБЛЕМЫ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ Теплоэнергетика ХХХУ

На русском языке
Отв. редактор В. Ратник
Техн. редактор М. Тамме
Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 14.12.88
Подписано к печати 08.01.89
МВ- 00716
Формат 60х90/16
Печ. л. 6,0 + 0,25 приложение
Уч.-изд. л. 5,8
Тираж 400
Зак. № 15
Цена 1 руб.
Таллинский политехпический институт,
200108, Таллин, Эхитаяте теэ, 5

Ротапринт ТПИ, 200008, Таллин, ул. Коскла, 2/9



TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TALLINHCKOFO HOJUNTEXHUYECKOFO UHCTUTYTA

удк 620.9

Л. М. Ниспуу, Х.И. Таллермо

ВСЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ЭСТОНИИ НА БЛИКАЙШИЕ 20-50 ЛЕТ

Энергетика является существенной частью экономики суверенной Эстонии. Стоимость основных фондов только одного Эстонглавэнерго превышает миллиард рублей, в то время как основные фонды всей промышленности республики составляют 5,3 миллиарда рублей [I]. Независимость Эстонской энергетики при одновременной лихвидации надвигающегося экологического кризиса, прекращении иммиграции, сохранении запасов сланца и создании предпосылок для нормального развития энергетики в Эстонии невозможно без сооружения на нашей территории в первой половине следующего столетия современных радиационно-безопасных атомных энергетических установок.

Моторесурс энергетического оборудования Прибалтийской ГРЭС (энергоблоки IOO MBT) за ближайшие годы исчезает и его необходимо заменить новыми, более современными. Но главное требование при этом — максимальное использование золы и шлаков в народном хозяйстве (строительство и сельское хозяйство) и оснащение котлов эффективными средствами очистки дымовых газов от SO₂ и летучей золы.

В данное время мы видим следующие этапы возможного развития энергетики в Эстонии:

- I. Разработка и испытание новых установок для мокрой очистки газов от SO_2 и золы котлов TN-67 и TN-IOI в 1989 1994 годы.
- 2. Остановление проектирования котла ТПЕ-218 для реконструирования части Прибалтийской ГРЭС (вместо котлов ТП--17). Мощность первой очереди реконструированной части составляет 4х210 МВт, а общая мощность 1200 МВт.

Разработка проекта нового котла, обеспечивающего номинальную нагрузку энергоблоков.

Котлы должны быть оснащены двухступенчатым золоулавливанием в циклонах и пятипольных электрофильтрах до поступления газов в систему влажной очистки от SO_2 , использованием воды из систем остаточного гидрозолоудаления. На этой станции предусматривается максимальная утилизация золы применением специального пневмозолоудаления из-под котлов и золоуловителей. Предусматривается просторное размещение котлов и другого оборудования в корпусах и на территории электростанции, позволяющее обновить морально устаревшее оборудование и их части при экономической целесообразности этого до истечения 25-30-летнего срока эксплуатации. Строительство проводится в 1994-2000 годы.

3. Обновление энергетического оборудования ТЭЦ Кохтла-Ярве и Ахтме. Суммарная мощность этих двух станций I50 МВт. Придание нового назначения старому главному корпусу Прибалтийской ГРЭС. Строительно-монтажные работы провести в ближайщее время.

Эстонская и Прибалтийская ГРЭС обеспечивают снабжение республики электроэнергией до 2005-2010 г. К этому времени должна быть построена новая станция вместо Эстонской ГРЭС. Вопрос решается по двум вариантам.

4. Вариант А. Прсектирование и сооружение радиационнобезопасной АЭС с электрической мощностью 3000 МВт вместо амортизированной сланцевой Эстонской ГРЭС. Эта Эстонская АЭС предназначена для сокращения добычи сланцев в 2005 -2010 годы более чем на 50 % и после 25-летней эксплуатации реконструированной части Прибалтийской ГРЭС мощностью 1200 МВт, т.е. примерно в 2020-2025 годы добычу сланцев для производства электроэнергии полностью прекращают. Эстонская АЭС предназначена также для использования имеющихся высоковольтных линий электропередачи для продажи электроэнергми по выгодной цене соседним энергосистемам и в Финляндию

х например, производство для сельского хозяйства сухой пылевидной сланцевой золы из материала старых золоотвалов.

за валюту. В Эстонии существенно расширяют потребление электроэнергии, особенно в нечное время. Проектирование и сооружение в 2000-2006 годы.

Вариант Б. Проектирование и сооружение новой пылесланцевой Эстонской ГРЭС мощностью 2000 МВт вместо амортизированной Эстонской ГРЭС. Эта стания должна быть полупиковая. При проектировании и строительстве учитывается опыт плуатации реконструированной Прибалтийской ГРЭС на 1200 МВт. Предусмотрена максимальная утилизация золы и постепенное сокращение продажи электроэнергии в соседние энергосистемы с полным прекращением ее к 2010 году. Возможно, что в риод от 2010 до 2020 гг. будет дефицит местной электроэнергии, что может привести к построению третьей сланцевой ГРЭС. Загрязнение природы добычей и энергетическим потреблением сланца продолжается примерно до 2035, а может быть даже до 2045 года, т.е. до амортизации последней сланцевой электростанции второго поколения. Третье поколение сланцевых электростанций противоречит здравому разуму и безопасные атомные или термоядерные электростанции должны перенять электрическую нагрузку лишь на 20-25 лет позднее, чем при варианте А. Эти 20-25 лет причиняют нашей природе, составу населения, запасам горючих сланцев и экономике республики огромный ущерб. Сланцевую Эстонскую ГРЭС второго поколения сооружали бы в 2000-2006 году.

- 5. На базе опыта Европейских стран сооружают СевероЭстонскую комбинированную АЭС с высокотемпературными реакторами электрической мощностью примерно 1000 МВт и тепловой мощностью 4500 МВт. Тепловая мощность используется в
 отапливаемый сезон в основном, например, для пароводяной
 конверсии метана в общереспубликанскую замкнутую систему
 теплоснабжения с холодными теплоносителями и в неотапливаемый сезон в основном для производства водорода в систему
 снабжения автомашин водородным топливом и для аккумулирования энергии в виде ведорода [3; 4; 5; 6]. Сооружение в
 2010-1016 годы.
- 6. На базе опыта сооружения и эксплуатации Северо-Эстонской комбинированной АЭС сооружают Южно-Эстонскую комбинированную АЭС с электрической мощностью 1000 МВт и тепловой мощностью 6000 МВт для снабжения электричеством, теп-

лотой и водородом Ожной Эстонии и в коммерческих целях города Пскова и северных районов Латвии. Сооружают трубопроводы для передачи колодных теплоносителей и водорода между Северо-Эстонской, Ожно-Эстонской и возможной Латвийской комбинированными АЭС. Сооружение комбинированной АЭС в 2014-2020 годы.

- 7. На базе опыта Европейских стран и Советского Союза проектируем и сооружаем вместо амортизированной Эстонской АЭС первого поколения новую, возможно термоядерную электростанцию мощностью 5000 МВт. Сооружение 2018—2025 годы.
- 8. Вируская сланцевая ГРЭС мощностью 2500 МВт около Силламя» и 2-3 крупные шахты для ее топливоснабжения суммарной добычей около 19 миллионов тонн товарных сланцев в год не должны быть сооружены из-за скорого истощения запасов. Совместная эксплуатация Эстонского и Ленинградского месторождений обеспечивает выдачу высококалорийного товарного сланца в объеме 50-53 млн. т в год в течение 20-25 лет нормально и до 30 лет неестественными приемами развития. После этих 25-30 лет суммарная добыча становится менее 50 млн. т в год и уменьшается до 10 млн. т уровня за следующие 35 лет. 10%-ный остаток запасов (z = 1,29) наступит на Эстонском месторождении около 2035 года и на Ленинградском месторождении 5 лет позднее [7].
- 9. Для обновления и сооружения крупных энергетических объектов предусматривается два потока непрерывных строительно-монтажных работ для коллектива 3000—4000 рабочих (Эстонэнергострой): первый поток.

1989-1994 реконструкция газоочистки и др. котлов ТП-67 и ТП-101;

1994-2000 реконструкция Прибалтийской ГРЭС на 1200 МВт;

1996-2002 реконструкция ТЭЦ в Кохтла-Ярве и в Ахтме и придание нового назначения старым корпусам Прибелтийской ГРЭС:

2000-2006 сооружение Эстонской АЭС на 3000 МВт;

второй поток, для последовательного сооружения сланцевых электростанций третьего поколения или новых безопасных АЭС;

2010-2016 сооружение Северо-Эстенской комбинированной АЭС;
2014-2020 сооружение Южне-Эстонской комбинированной АЭС;
2018-2025 сооружение Эстонской АЭС второго поколения, возможно термоядерной на 5000 МВт.

10. Соответствие суммарной мощности электроэнергетики Эстонии объемам электропротребления в Эстонии и объемам поставки электроэнергии в соседние энергосистамы и в Финляндию, при экономической целесообразности продолжения традициенного экспорта энергии, обеспечивается уточненными сроками пуска новых энергоблоков и выгода амортизированных энергоблоков из эксплуатации, а также целесообразностью сжигания все более низкокачественных сланцев и экологической ситуации над территориями шахт, которые становятся все более глубокими.

II. Обеспечение рабочей силой эксплуатационной и ремонтной служб электростанции, крупных строительно-монтажных объёктов и шахт можно реализовать без иммиграции рабочих, если организуем избыток рабочей силы на Северо-Востоке нии и по всей Эстонии. Это можно сделать, например, путем изменения структуры промышленности Эстонии, путем ежегодного 10-процентного сокращения допустимого максимального числа рабочих на малорентабельных предприятиях или на предприятиях, которые работают на привозном сырье (материалах), поставляют продукцию на большие расстояния от республики и в которых работает более 50 процентов некоренного населения. Ликвидации или превращению в малые предприятия другого профиля подлежат все предприятия, которые функционируют иммиграционными насосами, т.е. регулярно организованно иммигрируют рабочих и через несколько лет эти рабочие, как правило, переходят в другие более привлекательные местные предприя-RNT

В результате усовершенствования энергетики освобождается значительное число рабочих для перехода на новые рабочие места. При переходе на новые методы выработки энергии сланцедобывающие предприятия почти на 80-90 % ликвидируются. На АЭС обслуживающего и ремонтного персонала на единицу мощности будет меньше, чем на пылесланцевых электростанциях. В условиях технического прогресса численность обслуживающего персонала на всех энергетических установках десятилетиями сокращается, но увеличивается стоимость оборудования. Комбинированные предприятия с новой технологией для совместной выработки электроэнергии, тепла для дальнего теплоснабжения и автомобильного топлива в Северной и Южной Эстонии позволяют ликвидировать множество малых котельных. Все это облегчает проблему с рабочей силой в перспективе.

12. В ближайшие I-2 года следует ликвидировать возможности несогласованной работы поставщиков (совместно с обогатителями) и потребителей горючего сланца, что приводит к диктату поставщиков сланца, непродуманному или неэкономному сланцепотреблению. Например, в недавнем прошлом в течение многих лет на складах было до IO миллионов тонн сланца под угрозой самовозгорания. В настоящее время на складах поставщиков избытки дорогого обогащенного кускового сланца классов 25-I25 мм и более I25 мм. Ранее обогащенный сланец для термической переработки и т.д. был дефицитным, но сейчас поставляют его на электростанции для пылевидного сжигания.

Литература

- I. Народное хозяйство Эстонской ССР в 1986 году. Статистический ежегодник. Таллин: Ээсти Раамат. 1987. 352 с.
- 2. От с А.А. Энергетическое использование эстонских горючих сланцев. Проблемы парового котла // Горючие сланцы. 1988. Т. 5. № 1. С. 1-14.
- 3. Емельянов И.Я., Батуров Б.Б., Ко-рытников В.П., Корякин В.И. и др. Техникоэкономические аспекты осуществления централизованного теплоснабжения от атомных котельных // Атомная энергия. 1979. Т. 46, вып. І. С. 3-9.
- 4. Черняев В.А., Галактинов И.В., Голобушкина М.К. Дальнее теплоснабжение от ядерных энергоисточников // Атомная техника за рубежом. 1978. № 5. С. 12-18.
- 5. Фильков В.М. Научные исследования США в области энергетики // Теплоэнергетика. 1975. № 5.

- 6. Дэвинс Д. Водородная экономика. Энергия, 1985. С. 120-124.
- 7. Эпик И.П., Кйспуу Л.М., Рейнсалу Э.Я. Изменение запасов твердых топлив и варианты законченных циклов выработки запаса сланца // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 546. С. 25-43.

L. Õispuu, H. Tallermo

Possible Development of Estonian Energetics in the Next 20-50 Years

Abstract

The problems of the development of Estonian energetics on the basis of oil-shale power stations are discussed in the paper. It is shown that the Baltic thermal power station requires reconstruction. The steam boilers of the station must be equipped with liquid cleaning apparatuses for removing fly-ash and SO₂ from combustion gases, slag and ash can be used in building and agriculture.

To supply the republic with power up to the year 2025 the building of both oil shale thermal stations and safe atomic power stations is recommended.

L. Õispuu, H. Tallermo

Eesti energeetika võimalik areng lähema 20-50 aasta jooksul

Kokkuvõte

Siin analüüsitakse Eesti energeetika arengu probleeme põlevkivil töötavate elektrijaamade baasil. Näidatakse, et on vaja rekonstrueerida Balti Soojuselektrijaam, seadistada katlad märgpuhastusseadmetega SO₂ ja lendtuha püüdmiseks suitsugaasist, šlakki ja tuhka aga kasutada ehituses ja põllumajanduses.

Vabariigi varustamiseks elektrienergiaga kuni 2025. aastani nähakse ette nii soojus- kui ka ohutute aatomelektrijaamade ehitamist.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 620.9

Л.М. Ниспуу

ОБСУЖДЕНИЕ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ЭСТОНИИ

Энергетика или топливно-энергетический комплекс региона охватывает получение, передачу, преобразование и использование различных видов энергии и энергетических ресурсов. В составе энергетики функционируют системы топливодобывающих предприятий, теплоэнергетики, производства-передачираспределения электроэнергии, системы газоснабжения, снабжения жидкими топливами, системы местного и централизованного теплоснабжения, система теплофикации от теплоэлектроцентралей и ядерно-энергетическая система. Все вышеперечисленные системы, кроме ядерной, функционируют в Эстонии, но не все они рассмотрены ниже.

Теплоэнергетики обычно подробно изучают и знают расход топлива на электростанциях и теплоэлектроцентралях для производства электроэнергии, но не знают более существенного суммарного расхода топлива и других энергоресурсов местное и централизованное теплоснабжение, на теплофикацию от теплоэлектроцентралей. В современных развитых странах, где отсутствуют экспорт или импорт электро- и теплоэнергии, в общем объеме топливопотребления на нужды теплоснабжения расходуется 30-40 % топливных ресурсов, т.е. ~I.5 больше, чем на производство электроэнергии [I]. При в электроэнергетике в основном расходуют низкокачественные твердые топлива, а нужды теплоснабжения удовлетворяют главным образом за счет высококачественного газомазутного топлива. Примерно такая же, вероятно, нормальная обстановка была бы в Эстонии, если бы мы не должны поставлять 54,5 % (в 1986 г.) электроэнергии другим союзным республикам [2] и не вынуждены были бы в теплоснабжении проводить усиленный неразумный обратный переход от привозного высококачественного газомазутного топлива на привозное не очень качественное твердое топливо и на местное торфяное и древесное топливс.

Обновление или увеличение мощностей и развитие структуры электроэнергетики на территории Эстонской ССР зависит главным образом от ведомственных интересов нескольких союзных министерств, где точки зрения республиканских научно-исследовательских институтов, плановых органов, экономистов, горняков, теплоэнергетиков и электроэнергетиков принимаются во внимание только при катастрофических ситуациях и лишь в течение нескольких последних месяцев. В теплоснаблении Эстонии также явно чувствуется недостаток в республиканском межведомственном координирующем центре для направления развития систем местного и централизованного теплоснабжения.

Ход перестройки привел нас к убеждению, что для оживления экономической жизни страны, для резкого подъема козяйственной активности специалистов на местах крайне необходимым является проведение последовательной децентрализации управления всей экономической жизни и в том числе энергетикой. Основным принципом управления энергетикой и всей экономической жизни в нашей стране должна стать тетность территориального управления над ведомственным тем, чтобы население республики было полномочным хозяйном национального богатства, производимого на ее территории. Обмен между республиками поставками топлива или электроэнергии, материалами, проектами должен учитывать цену органического топлива в недрах, цену земли и воды, ущерб от загрязнения биосферы электростанциями и горнодобывающими предприятиями, различную стоимость электроэнергии в пиковые часы и в ночное время, т.е. обмен (торговля) в энергетике должен быть эквивалентным и взаимовыгодным.

Республиканские ученые и специалисты недовольны монопольными правами общесоюзных министерств и ущемлением экономической суверенности советских социалистических республик. В результате вздомственного хозяйствования на крохотной густонаселенной территории Эстонии почти 30 лет экстенсивно развивают сланцевую энергетику на базе неудержимой иммиграции рабочей силы. Предельно допустимые концентрации загрязнения окружающей среды в Эстонии много-

кратно превышены. В то же время в европейских странах действуют существенно более строгие нормы защиты биосферы. В настоящее время увеличение поставки электроэнергии от сланцевых электростанций другим союзным республикам не дает Эстонской ССР экономической выгоды, а, насборот, увеличивает ее долги, увеличивает организованную иммиграцию, ухудшает опасную кризисную экологическую ситуацию на Северо-Востоке Эстонии, увеличивает заболеваемость и смертность населения [2, 3, 4].

Энергетики вынуждены составлять свои перспективные направления развития минимальным сроком до 30 лет, а иногда даже до 50 лет. Срок службы горнодобывающего предприятия принимается 40 лет, проектирование и строительство длится оксло 10 лет.

Долгие сроки от исследовательских разработок до пуска электростанции, примерно 8-18 лет, и долгие сроки эксплуатации сооруженного оборудования не соответствуют современному темпу технического прогресса. В результате этого моральная амортизация наступает задолго до физической амортизации, иногда уже при пуске электростанции. Целесообрано было бы проектировать такие котлы, турбины и помещения электростанций, в которые закладываются возможности для дальнейшего постепенного и частичного технического обновления оборудования, например, средствами и во время регулярного капитального ремонта.

Ниже использованы некоторые мысли коллег X. Таллермо, В. Кезрова; X. Арро, Р. Роотамма, Агу Отса и высказывания на дискуссиях кафедры теплоэнергетики совместно с сотрудниками научно-исследовательской лаборатории.

Снабжение потребителей Эстонской ССР электроэнергией в будущем может быть осуществлено по следующим вариантам:

- I) от местных сланцевых электростанций;
- 2) от местных электростанций на привозном органическом топливе;
- 3) от местной радиационно-безопасной атомной электростанции (желательно ст нерадиоактивной термоядерной станции);
- 4) от атомных (в основном) электростанций соседних энергосистем.

Критерии для оценки предпочтительности реализации в Эстонии вышеперечисленных вариантов электроснабжения составляют следующий ряд значимости:

- а) вероятность технической возможности и ресурсной обеспеченности;
 - б) потребность в иммиграции рабочих;
 - в) улучшение экологической обстановки;
 - г) экономичность для республиканского хозрасчета;
 - д) увеличение бытовых и производственных удобств.

Ниже в таблицах под критерием оценки а) количество очков означает следующее:

- + 20 вероятность реализации варианта I,0;
- + 15 вероятность реализации варианта 0,8...0,9;
- + 10 вероятность реализации варианта 0,7;
- + 5 вероятность реализации варианта 0,4...0,6.

Под критерием оценки б):

- + 16 отрицательная иммиграция рабочих (ремиграция), например, сланцевые ТЭС и шахты ликвидируются;
- + 8 иммиграция рабочих отсутствует, строят договорные и местные рабочие;
- 8 умеренная иммиграция рабочих только для строительства электростанций;
- I6 иммиграция рабочих для строительства электростанций и шахт.

Под критерием оценки в):

- + 12 экологически практически безопасный вариант;
- + 6 существенно улучшает экологию;
- 6 незначительное улучшение экологии;
- I2 экологическая ситуация практически не улучшается.

Под критерием оценки г):

- + 8 отличная экономичность варианта;
- + 6 хорошая экономичность варианта;
- + 4 удовлетворительная экономичность варианта;
- + 2 плохая экономичность варианта.

Под критерием оценки д):

- + 4 существенное увеличение удобств;
- + 3 заметное увеличение удобств;
- + 2 малое увеличение удобств;
- + І нет увеличения удобств.

Таблица I Оценка предпочтительности вариантов электроснабжения в настоящее время

Номер вари- анта	К	ритери	и оценк	THIE	док поч- льно-		
Savege Spin 8	a	δ	В	ટ	g	CTN S OU- KOB	Mec-
I	20	-16	-I2	6	I	-I	IУ
2	15	-8	-6	4	2	7	Ш
3	IO	-8	6	6	3	17	П
4	5	16	I2	2	4	39	I

Таблица 2

Оценка предпочтительности вариантов электроснабжения через 25-30 лет

Номер вари-	К	ритерии	оценки	i di on	2017100	Порядок предпоч	
анта	a	δ	В	2	9	очков	место
I	20	-8	-6	6	I	13	IУ
2	IO	8	-6	4	2	18	DEA III
3	15	-8	6	8	4	25	П
4	5	16	12	2	3	38	I

Проведенный выше ориентировочный анализ является дискуссионным и нуждается в уточнениях, но при трех-четырех системах очков (одна из которых в табл. I и 2) отдается предпочтение электроснабжению из соседних энергосистем без местных электростанций или электроснабжению от местной радиационно-безопасной атомной электростанции. Во всех системах очков результаты оценки подтвердили необходимость отказа от сланцевой энергетики, что было неожиданностью и для автора. Объясняется это высокой значимостью критерия иммиграции (от +16 до -16 очков в табл. I и 2) и экологического критерия (от +12 до -12). Вез этих критериев было бы наиболее предпочтительным электроснабжение от местных сланцевых слектростанций и на последнем месте электроснабжение от соседних энергосистем.

В современной демографической и экологической ситуациях Эстонии было бы целесообразно перейти от сланцевой электроэнергетики на другие варианты электроснабжения. Ведомственным интересам это не соответствует и нас вынуждают заменять амортизированные мощности на пылесланцевых электростанциях. Новые котлы работают 25-30 лет и на такой же период в будущее отодвигается отказ от сланцевой энергетики. У местных энергетиков останутся лишь возможности содействовать тому, чтобы не было существенного расширения сланце-энергетических мощностей, чтобы строительно-монтажные работы проводились без остаточной иммиграции рабочих и чтобы загрязнение природы соответствовало европейским предписаниям.

Загрязнение природы электростанциями

Ведомственным интересам, наверное, соответствовало бы, если правительство Эстонской ССР сделало заявку на проектирование и дало согласие на постройку около Нарвы или Силламяэ вместо амортизируемой Эстонской ГРЭС рациационнобезопасной атомной электростанции. Но общественное мнение в Эстонии против АЭС, особенно после аварии на Чернобыльской АЭС. Наша общественность не доверяет надежности имеютехники, поэтому переубедить ее в поддержку АЭС можно лишь после перехода на полный республиканский хозрасчет и на действительно суверенную экономику и политику. Только в таких условиях можно использовать данные содержания в сланцевом топливе рапиоактивных элементов и радиоактивных изотопов для агитации против сланцевой энергетики и в пользу АЭС. В сланцевом топливе Прибалтийской ГРЭС в одной тонне сланца содержится урана 2,9 г, тория 3,4 г и слаборадиоактивных изстопов 71 Lu 176, 62 Sm147, 60 Nd 150, 60Nd⁴⁴⁴, 57Ld¹³⁸, 37Rb⁸⁷, 19 K⁴⁰ суммарно I6,246 г на тонну горючего сланца [5, 6, 7]. Кроме этого сланцевое топливо содержит в ничтожных, но расчетами вполне определяемых количествах продукты естественных радиоактивных рядов (семейств) урана 238, 235 и тория 232 в виде долгоживущих и короткоживущих изотопов с периодами полураспада от доли секунд до 2,85 х хIO⁵ лет. Естественные радиоактивные газы в виде коротноживущих изотопов радона и продукты их радиоактивного распада в виде долгоживущих радисактивных аэрозолей выделяются в атмосферу главным образом у сланцевых шахт и разрезова
а также у складов сланцев и на золоотвалах.

За период с 1919 до 1987 г. в результате добычи потребления сланца на поверхностные слои земли и в водоемы Северо-Востока Эстонии в составе золы рассеяно урана и тория суммарно 4520 тонн и вышеперечисленных слаборадиоактивных изотопов II 694 тонны. Ежегодно поднимают совместно с горючим сланцем из векового малоомываемого состояния глубине 15-70 метров на поверхность земли дополнительные 156 тонн радиоактивных элементов и 406 тонн слаборадиоактивных изотопов. Их измельчают в пыль, в топочном процессе они преимущественно переходят в более водорастворимые соединения. Затем они выбрасываются водой и ветром интенсивно омываемые места. Это возрастающее, рассеянное и в воде растворенное, частично на золоотвалах складированное радиоактивное "богатство" останется в биосфере Северо-Востока Эстонии не на 10 или 100 лет, а более чем на 100 000 000 лет (период полураспада) и естественным радиоактивным распадом постоянно отравляет окружающую природу. Расчеты сделаны на основе [5.11].

Через сланцевые электростанции совместно со сланцевым топливом проходит изотопа урана атомным весом 235 в количестве, которое составляет 23 % от "сжигаемого" на АЭС этого ядерного топлива при одинаковой выработке электроэнертии, и сопровождающего изотопа урана атомным весом 238 в количестве 60 %. Эти проценты получены расчетным путем на основе следующих исходных данных: 2,9 г урана в одной тонне сланца; в уране содержится изотопа 235 лишь 0,715 %; на АЭС для выработки I МВт. сутки электроэнергии "сжигают" (расщепляют) 3 грамма урана 235; в ядерном топливе реактора I,8 % урана 235.

На сланцевой электростанции не прекращается медленный естественный радиоактивный распад всех радиоактивных изотопов урана и других элементов и их кратковременное нагревание в топке до I400-I500 °С не ускоряет этого распада. В результате выгорания органического вещества и сохранения неорганического концентрация радиоактивных изотопов в золе повышается более чем в два раза по сравнению с горючим слан-

цем. Сравнительно скромная концентрация радиоактивных изотопов в достаточно водорастворимой сланцевой золе, а также в отходах сланцепереработки и -добычи оказывают вредное воздействие на людей, главным образом, через биогенную миграцию (микроорганизмы, растения, рыбы и животные) и пищу, посредством воды, радиоактивных аэрозолей и газов в составе воздуха. Происходит аккумуляция радиоактивных изотопов во многих органах биогенной цепи, в людях, в активной части биосферы на Северо-Востоке Эстонии, ее можно выразить в тоннах в год и в граммах на квадратный метр. В результате этого в последние 20-30 лет жители названного региона находятся под постоянно повышающимся внутренним и ионизирующим излучением и это излучение сохраняется миллионы лет после истощения запасов сланцев. Под воздействием ионизирующего (особенно внутреннего) излучения, пускаемого радиоактивными изотопами, происходят изменения в жизнедеятельности и структуре живых организмов. Последствия суммарной экологической ситуации региона на частоту заболеваемости, на среднюю продолжительность жизни мужчин и женщин и т.п. в постаточной степени опубликованы.

На атомных электростанциях дополнительно к естественному распаду происходит интенсивная цепная реакция деления ядер изотопа урана 235. Эта реакция в реакторе и полученные радиоактивные продукты способны за короткий срок прекратить жизнедеятельность человека или существенно деформировать ее, но только в том случае, если защитные устройства реактора неисправные, происходит маловероятная авария или неправильное хранение радиоактивных продуктов. Следовательно, при нормальной работе АЭС не является радиационно-опасной.

Две крупные сланцевые электростанции при сжигании суммарно 23 млн. тонн сланца за год через трубы выбрасывают в атмосферу I38 000 - 207 000 тонн SO₂ (степень связывания серы 0,8 или 0,7), 23 000 тонн NO₂ (I кг NO₂ на тонну сланца), порядка 2I0 000 тонн золы (2%), примерно такое же кыличество аэрозолей, до 8 тонн паров ртути и 2I,6 млн. тонн двуокиси углерода. Кроме вышеперечисленного, топки электростанций потребляют для сжигания 23 млн. тонн сланца, I7,2 млн. тонн кислорода из состава воздуха. Все это и еще несколько млн. тонн избыточного воздуха кратковременно на-

гревают максимально до 1500 °С. Из-за низкой теплоты сгорания (~8800 кДж/кг) и высокой зольности - 45 % на рабочую массу - на сланцевых электростанциях образуется золы в 6 раз больше на единицу выработанной энергии, чем на угольных электростанциях при 21 000 кДж/кг и 20 % золы. При этом в выбрасываемой через трубы сланцевой золе содержится во много раз больше ядовитых и опасных для здоровья людей веществ, чем в среднем в золе [5; 4], особенно хлора, брома, свинца, стронция, циркония, цинка, мышьяка и др. Помимо традиционных компонентов через трубы пылесланцевых ТЭС выбрасывают в атмосферу в составе золы известное количество радиоактивных элементов, слаборадиоактивных изотопов, паров ртути и аэрозоли. Аэрозолями являются неулавливаемые обычными фильтрами частицы золы с размерами менее 3-8 мкм. На основе экспериментальных данных И. Эпика и Х. Тааль в [8] приведены данные, что в условиях энергетических топок до 2,5 % от золы сланцев может перейти в парогазовую фазу в виде невосстанавливаемых потерь. Балансы макрокомпонентов и микроэлементов, рассчитанные на основе данных их содержания в сланце и золах котла TII-67 [5; 6], подтверждают вышесказанное, - не вся масса многих макрокомпонентов и микроэлементов сланца переходит в улавливаемую золу, с размерами частиц более 3-8 мкм. Обратным балансом определен ориентировочный вещественный аэрозолей пылесланцевых электростанций.

На АЭС каждый грамм ядерного топлива на строгом учете и через трубы выбрасывают в атмосферу лишь вентиляционный воздух, содержащий весьма малое количество радиовктивных газов. В основном это "благородные" гази: аргон, ксенон и криптон. Ксенон и криптон являются осколками деления ядер урана в реакторе и проникают в воздух через случайные негерметичности. Выбросы угольных ТЭС тоже содержат радиоактивные частицы урана и тория, и общая радиоактивность отходов угольных ТЭС, как правило, превышает общую радиоактивность вентиляционных выбросов АЭС [9]. АЭС работает без вредных выбросов золы, сернистых газов, окислов азота, паров ртути и аэрозоли. Опасными в работе АЭС являются аварийные ситуации и неправильное хранение радиоактивных отходов. Оборудование АЭС годами усовершенствуется. Последствия маловероятных аварий локализу-

отся надежными конструкциями реакторов и контейнментами или защитными куполами, оболочками, то есть внутри этих герметичных защитных оболочек, без радиоактивных выбросов в окружающую среду. Именно так было на АЭС Три Майл Айленд в США в 1979 году [10]. Выбрасываемые АЭС радиоактивные газы не усваиваются ни животными, ни растениями и в этом смысле потенциально безвредны, пишут в [9]. Загрязнение атмосферы радиоактивным $_{36}$ Кг 85 не является локальным, а распределяется по всей тропосфере до высот 8-10 км и,следовательно, исходит также от соседних АЭС.

Может быть теперь снова подумаем и откажемся от сланцевой энергетики в пользу АЭС? Радиационно-безопасную A3C нужно построить не с дешевыми графито-водяными реакторами канального типа, как на Чернобыльской, Ленинградской, налинской и других АЭС, а с водо-водяными реакторами пусного типа, как в США, во Франции, в ГДР, а также Ha некоторых АЭС в СССР. Корпусные реакторы сооружают в CILIA и в других странах в защитные железобетонные оболочки (B контейнменты), т.е. с дополнительными барьерами радиационной безопасности. Возможно, что именно такие АЭС построены в Латвийской ССР. Новые АЭС намечены еще в Белорусской ССР около границы со Псковской областью, в Kaрельской АССР недалеко от границы с Финляндией и на Кольском полуострове. В то же время на Ингналинской АЭС уже несколько пожаров и жители всей Прибалтики не расширения этой электростанции или сооружения подобных новых АЭС. Последнюю АЭС первоначально хотели построить берегу озера Выртсьярв.

Топливные ресурсы

Если откажемся от скорой постройки АЭС, то надолго ли хватит горючих сланцев? Запасов Эстонского месторождения без периферийных участков при добыче 30 млн. тони товарных сланцев в год хватит на полвека — до 2040 года. Здесь коэффициент выхода товарного сланца из запасов имеет современное значение 0,5...0,6. Максимальной продолжительностью вариант последовательно совмещенной эксплуатации действительных запасов Эстонского месторождения, прогнозных запасов его периферийных участков и Тапаского место-

рождения с производительностью на уровне 31-37 млн. т теварного сланца в год продолжается в течение полутора века — до 2140 года. После названного года годовая добыча сокращается до 5 млн. т в 2160 году. Одновременно происходит постепенное уменьшение низшей теплоты сгорания рабочего состояния сланца до уровня 7,27-7,52 (1740-1800) МДж/кг (ККАЛ), т.е. количество тепла в Дж/год уменьшается на тонну натурального сланца. Этот второй вариант законченного цикла выработки ресурсов влияет на нашу природу несколько раз губительнее, чем рекомендуемая Министерством по производству минеральных удобрений СССР добыча фосфоритов в Раквереском районе.

Третий вариант для существенного расширения производст ва энергии в целях продажи при совместной эксплуатации Эстонского и Ленинградского месторождений обеспечивает выдачу высококалорийного товарного сланца в объеме 50-53 млн, т в год в течение 20-25 лет нормально и до 30 лет неестественным направлением развития. После этого срока добыча становится менее 50 млн. т в год и уменьшается до IO млн. т уровня за 35 лет. IO%-ный остаток запасов наступит на Эстонском месторождении в 2030 годах и на Ленинградском месторождении примерно пять лет позднее, [III].

Необходимо приложить все усилия, чтобы энергетическая ситуация начала или середины 2I-го века не заставила нас приступить к эксплуатации низкокачественных запасов Тапаского месторождения. Эти запасы сланца расположены между Вяйке-Маарья и Кехра в среднем на глубине I30 метров, т.е. под древними сельскохозяйственными районами Эстонии и под возвышенностью Пандивере.

С цилью сокращения пстребности в нефтяном топливе следует составить не только пятилетние планы, но и координировать изменение структуры нашей промышленности на начало следующего столетия. Кардинальными методами и в широком масштабе нужно перепрофилировать или ликвидировать предприятия, функционирование которых в большой степени обуславливает покупку нефти или нефтепродуктов. Дефицит нефти будет очень серьезным уже к 2000 году, предупреждает Т. Маде в "Ноорте Хяэль" за 18 августа 1988 года.

Заключение

В концепции хозяйственного расчета Эстонской ССР (тезисы) рабочей группы при Институте экономики АН ЭССР написано следующее: "Энергетика должна обеспечивать прежде всего снабжение республики электро— и теплоэнергией, а также экономически выгодную продажу энергии за пределы республики. Расширение производства энергии в целях продажи возможно только в условиях соблюдения требований охраны природы и оптимального использования земли и полезных ископаемых. Важнейшим ограничителем развития энергетики является экологическая безопасность" ("Советская Эстония", 30 сентября 1988 г.).

Эта концепция опубликована после написания нами основного содержания данной статьи, но соответствует нашим рассуждениям. Электроэнергетика Эстонии с большой вероятностью базируется на местных горючих сланцах в течение срока эксплуатации второго; возможно и третьего поколения сланцевых электростанций. Учитывая сграниченность запасов сланцев, суммарная мощность сланцевых электростанций следующих поколений в течение ближайших 30, возможно и 50 лет должна быть на нынешнем уровне. Это означает, что экономически выгодная продажа энергии за пределы республики прекратится в начале следующего столетия.

Сооружение АЭС на графито-водяном реакторе канального типа на территории Эстонии вместо сланцевых ТЭС нецелесообразно, так как территория и население Эстонии слишком малы, чтобы пережить маловероятную, но все же возможную аварию.

С точки зрения загрязнения природы эстонский сланец - даже без учета содержания тяжелых металлов и большого ко-личества аэрозолей - является наиболее вредным топливом в СССР и обуславливает медленное, но надежное отравление людей. Поэтому оборудование на сланцевых электростанциях второго, возможно и третьего поколения, особенно котлы и устройства очистки выбрасываемых газов сгорания должны быть исключительно эффективные и надежные в работе. Сланцевую золу нужно полностью поставлять различным потребителям, чтобы рассеивать ее вредные компоненты до малых концентраций без длительного хранения на золоотвалах омываемых водой.

Для сокращения вредности сланцевых электростанций в топках кетлов должны быть минимальне допустимые температуры (образуется меньше NO_X и вэрозолей) и в устройствах очистки газов не менее трех ступеней: циклоны, 5-польные электрофильтры или материатые фильтры и оборудование очистки газов от SO_2 , вероятно мокрым методом. Чрезвычайно существенным является то, что выбранные в настоящее время технологии и оборудование электростанций должны работать 25 – 30 лет, должны в будущем удовлетворять нашим возрастающим требованиям в условиях сжигания сланцев более низкого качества чем сейчас.

С большой вероятностью можно сказать, что через 30-50 лет для эстонских энергетиков будут доступными новые безопасные методы выработки электроэнергии и теплоэнергии и топлива для автомашин. Желательно, чтобы это было раньше полного сжигания запасов наших горючих сланцев и раньше многократного удорожания дефицитных нефтепродуктов вследствие истощения запасов.

Литература

- І. Емельянов И.Я., Ватуров Б.Б., Корытников В.П., Корякин В.И., Черняев В.А., Ковылянский Я.А., Галактионов И.В. Технико-экономические аспекты осуществления централизованного теплоснабжения от атомных котельных // Атомная энергия. Т. 46, вып. І, январь 1979. С. 3-9.
- 2. Тапупере 0., Отс А., Валдма М. Проблемы развития энергетики в Эстонии // Советская Эстония. 1987 г. 14 апр.
- 3. Хыдреярв Х., Калласте Т., Вийтак А. Загрязненность воздуха в Вирумаа и последствия этого. Связи с энергетикой // Рахва Хяэль. 1988. 8 мая (на эстонском языке).
- 4. Арро А., Липпмаа Э., Саар Я., Луйга П., Раукас А., Мытус М., Йоост Э. Куда идешь энергохозяйство? Компромисс за счет природы недопустим / Посредничали И. Рохтметс и Р. Вескимя // Хоризонт. 1988, № 6. С. I-8 (на эстонском языке).

- 5. Пец Л.И., Ваганов П.А., Кнот И., Халдна Ю.Л., Швенке Г., Шнир К., ЮгаР.Я. Микроэлементы в золах сланца-кукерсита Прибалтийской ГРЭС // Горючие сланцы. 1985. Т. 2, № 4. С. 379—390.
- 6. Пец Л.И., Ваганов П.А., Шнир К. Лантаноиды в золах сланца-кукерсита Прибалтийской ГРЭС // Горючие сланцы. 1986. Т. 3, № 4. С. 419-425.
- 7. Handbook of Chemistry and Physics. 57-th Edition. 1976-1977. Table of the Isotopes. P. B 270-B 354.
- 8. Отс А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. М.: Энергия, 1977. 312 с.
- 9. А н а н ь е в Е.П. Атомные установки в энергетике. М.: Атомиздат, 1978. 189 с.
- IO, Постоянный прогресс на АЭС ТМІ-2. Бюллетень международного агенства по атомной энергии. 1985. Т. 27, № 4, С. 19-26.
- II. Эпик И.П., Ыйспуу Л.М., Рейнсалу Э.Я. Изменение запасов твердых топлив и варианты законченных циклов выработки запаса сланца. // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983. № 546. С. 25-43.

L. Öispuu

Eesti energeetika arengu variantide arutelu

Kokkuvõte

Artiklis esitatakse energeetika võimaliku arengu variandid perestroika tingimustes, samuti tutvustatakse rahvamajanduse elektriga varustamise tulevikuprintsiipe. Eri variantide põhjendamiseks on esitatud kuus kriteeriumi koos nende variantide realiseerimise tõenäosusega.

See on esimene katse arvestada elektriga varustamise skeemi valikul tööjõu immigratsiooni, keskkonna ökoloogilise seisundi parandamist, vabariigi majanduse õkonoomikat jne. Skeemi analuus näitab, et on vaja loobuda põlevkivielektrijaamadest.

Options for the Development of Estonian Energetics

Abstract

The article deals with the options for the development of Estonian energetics under the conditions of perestroika and with the principles of power supply in the future.

Six criteria are given to serve as a basis for the options of power supply. The possibility of the real-ization of each option is also dealt with.

It is the first attempt to connect the scheme of power supply with the immigration of labour power, with the improvement of the ecological situation, with national economy etc. The analysis of the scheme has shown that oil—shale power stations must be rejected.

THE TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TALJUHCKOFO HOJUTEXHUYECKOFO UHCTUTYTA

УДК 622.732:662.67

Т.К. Пиху, А.Х. Рипс

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕЛЬНИЧНОГО ПРОДУКТА ПРИ ГРУБОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА В ЦЕНТРОВЕЖНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Для описания гранулометрического распределения продуктов помола в статистике пыли широко применяются логарифмически-нормальное распределение и распределение Розина-Раммлера [1]. Во многих отраслях техники в математической статистике применяется распределение Вейбулла [2].

В данной статье рассматриваются возможности распределений Розина-Раммлера и Вейбулла для анпроксимации гранулометрического состава продуктов грубого измельчения в центробежно-отражательной мельнице.

Функция распределения Вейбулла выражается уравнением:

$$D(x_i) = 1 - e^{-\beta(x_i - x_{min})^{\alpha}},$$
 (I)

где $D(x_i)$ - полный проход через сито размером x_i , в долях единицы;

х тіп, с, в - параметры распределения;

Х; - соответствующий размер сита, мм;

X min - минимальное значение размера сита, мм.

(Нами принято иное обозначение параметров распределения по сравнению с источником [2])

Вычисление параметров α и β по методу наименьших квадратов производится по дополнительной функции распределения, которое выражается уравнением:

$$R(x_i) = e^{-\beta(x_i - x_{min})^{\alpha}}, \qquad (2)$$

где $R(x_i)$ - полный остаток на сите размером x_i , в долях единицы.

Отметим, что если минимальное значение размера сита равняется нулю ($x_{min} = 0$), распределение, выраженное уравнением (I), превращается в закон распределения Розина-Раммлера.

Параметры распределения α и β , как было отмечено выше, можно определить методом наименьших квадратов по уравнениям:

$$\beta = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{N} G_{i} Y_{i} \cdot \sum_{i=1}^{N} G_{i} \mathcal{X}_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{N} G_{i} \mathcal{X}_{i} Y_{i} \cdot \sum_{i=1}^{N} G_{i} \mathcal{X}_{i}}{G_{i}^{N} G_{i} \mathcal{X}_{i}^{2} - \left(\sum_{i=1}^{N} G_{i} \mathcal{X}_{i}\right)^{2}}\right], \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{N} G_{i} \mathcal{Y}_{i} - \ln \beta G}{\sum_{i=1}^{N} G_{i} \mathcal{X}_{i}}, \qquad (4)$$

$$\mathfrak{X}_{i} = \ln(x_{i} - x_{min}), \tag{5}$$

$$y_i = ln ln \left[\frac{1}{R(x_i)} \right],$$
 (6)

$$G = \sum_{i=1}^{N} G_{i}, \qquad (3)$$

$$G_{i} = (x_{mqx} - x_{i})^{\tau}, \tag{8}$$

где Сі - функция математического веса;

т - вещественное число;

 x_{max} - размер сита, определяющий верхний предел максимальной фракций, мм.

Мерой приближения экспериментальных данных к теоретическим распределениям (I, 2) с расчетными параметрами с и β является корреляционная оценка Θ , вычисляемая из соотношения:

 $\theta = \frac{\sigma_{y_T}}{\sigma_{y_9}}, \qquad (9)$

где $\sigma_{\rm ут}$ - стандартное отклонение двухкратно логарифмированной обратной величины функции дополнения распределения Вейбулла, и при $x_{\rm min}$ = 0 функции Розина-Раммлера;

отуз. - стандартное отклонение двухкратно логарифмированной обратной величины экспериментальных данных.

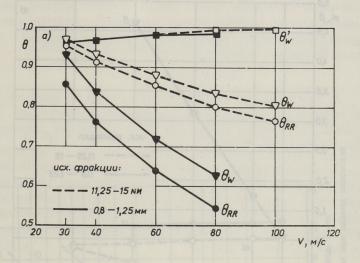
Опыты с монофракциями горючего сланца в интервале крупностей исходных фракций 0.8 < x < 15 мм и при скоростях удара 30 < v < 100 м/с на лабораторной центробежно-отражательной мельнице, были проведены согласно методике, приведенной в работе [3]. По данным ситовых анализов были рассчитаны оценки параметров распределения α и β (уравнения (3) и (4)).

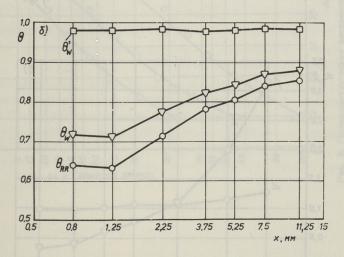
По соотношению (9) были определены корреляционные оценки для распределений Розина-Раммлера (Θ_{RR}), Вейбулла (Θ_W) и для распределения Вейбулла с функцией математического веса (Θ_W). Зависимости корреляционных оценок от скорости удара V и от нижнего размера исходной фракции × приведены на рис. I. Видно, что более высокая стабильная оценка корреляции (Θ > 0,97) экспериментальных данных с расчетными (теоретическими) обеспечивается распределением Вейбулла с функцией математического веса $G_i = (x_{max} - x_i)^{\frac{1}{2}}$. При том, корреляционная оценка практически не зависит от размера исходной фракции (рис. I, б) и незначительно зависит от скорости удара (рис. I, а).

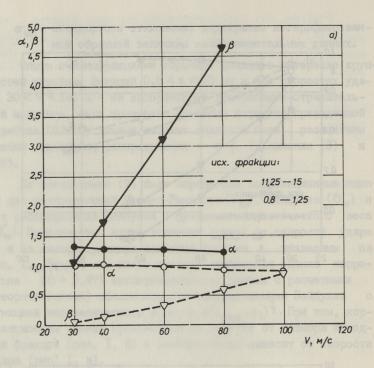
На рис. 2 представлены параметры распределения ∞ и $_4\beta$, определяемые функцией математического веса $G_i=(x_{mqx}-x_i)^2$, в зависимости от скорости удара и размера исходной фракции. Параметр ∞ , как показатель формы кривой, мало зависит от скорости удара и от размера исходной фракции, и зависимость в обоих случаях можно аппроксимировать прямой линией с несущественным наклоном в сторону повышения скорости удара и размера исходной фракции. Параметр β с повышением скорости возрастает, а с увеличением размера фракции уменьшается.

На рис. З на двойной логарифмической координатной сетке приведено гранулометрическое распределение частиц продукта помола исходной фракции II,25-I5 мм в зависимости от скорости удара. Максимальное расхождение опытных данных с расчетными наблюдается при малых скоростях в сторону увеличения размера частиц.

Подробное теоретическое обоснование использованного математического метода приводится в статье "Возможности ап-







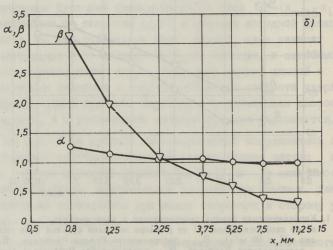
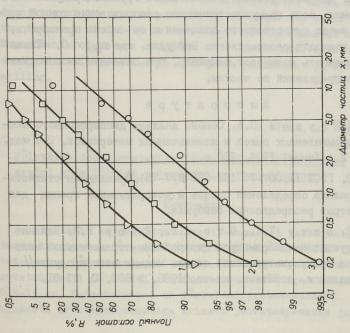


Рис. 2. Параметры распределения в зависимости:

а) от скорости удара,

б) от размера исходной фракции (при скорости V = 60 м/с).



Рис, 3, Гранулометритеское распределение тастил при разных скоростях удара: (двойная погарифмическая система координат) 1 - 100 м/с; 2 - 60 м/с; 3 - 30 м/с.

проксимации экспериментальных данных ситового анализа гранулометрического состава сыпучих материалов с помощью распределений Вейбулла, Розина-Раммлера", опубликованной в данном сборнике.

Выводы

- I. Распределение частиц горючего сланца по размерам, при измельчении монофракций в центробежно-отражательной мельнице, описывается уравнением (2) с расчетными параметрами распределения ∞ и β .
- 2. Для исследования относительно грубого продукта измельчения, если гранулометрическое распределение тонкой части не имеет существенного значения и ею можно пренебречь, более подходит распределение Вейбулла, где $x_{min} >> 0$. Такая необходимость возникает, например, при описании многомодальных распределений по частям.

Литература

I.К с у з о в П.А. Основы анализа дисперсионного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 2-е изд., испр. Л.: Химия, 1974. 280 с.

- 2. ГОСТ II.007-75 (СТ СЭВ 877-78). Прикладная статистика: Правила определения оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла.
- 3. Пиху Т.К., Отс А.А., Раюр К.Э. Влияние конструкционных параметров центробежно-отражательной мельницы на гранулометрический состав мельничного продукта // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1985. № 600. С. 21-31.

Mathematical Description of the Granulometric Composition of the Coarse-Grained Mill Product of Oil Shale in the Centrifugal Impact Mill

Abstract

This paper deals with the possibilities of the application of the Rosin-Rammler and Weibull distributions in the approximation of granulometric composition of the coarse-grained mill product in the centrifugal impact mill. Mono-fractions of the milled product of Estonian oil shale (in the interval of 0.8-15 mm) were used as experimental material Experimental data are compared with theoretical data based on the distribution law at different refinement levels of milling.

T. Pihu, A. Rips

Põlevkivi jämejahvatamisel tsentrifugaalpõrkeveskis saadud aine lõimise matemaatiline kirjeldamine

Kokkuvõte

Artiklis kirjeldatakse Rosin-Rammleri ja Weibulli jaotuste kasutamise võimalusi tsentrifugaalpõrkeveskis jahvatatud aine lõimise kirjeldamisel. Katsematerjalina on kasutatud Eesti põlevkivi monofraktsioone mõõduga vahemikus 0,8-15 mm. Katsetulemusi on võrreldud jaotusseadusel põhinevate arvutustulemustega erineva jahvatuspeenuse juures.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TAJJANICKOFO HOJANTEXHAYECKOFO MICTATYTA

УДК 622.732:658.562.012.7

Х.Я. Энник, Т.К. Пиху, А.Х. Рипс

ВОЗМОЖНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СИТОВОГО АНАЛИЗА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕЙБУЛЛА, РОЗИНА-РАММЛЕРА

І. Постановка вопреса

Изучение и измерение гранулометрического состава сыпучего материала, математическая обработка данных и т.д. относятся к области теории вероятностей и математической статистики.

Лучшим (информативным) способом обобщения результатов измерения грансостава является их представление удобной и достаточно простой формой функции распределения вероятностей или их плотностей. При известных значениях параметров распределения получим максимум возможной информации по грансоставу данного материала. Поэтому с методического аспекта важно вывести удобную, оптимальную функцию распределения и найти достоверный метод расчета значений параметров распределения по опытным данным.

В настоящем рассматривается один из аспектов данной проблемы — возможность использования распределения Вейбулла для аппроксимации опытных данных по грансоставу. Представим здесь необходимые формулы. Вычисления целесообразно провести на ЭВМ или на программируемых микрокалькуляторах.

 Φ ункция распределения плотности вероятностей Вейбулла (дифференциальная функция) имеет ряд преимуществ по сравнению, например, с нормальным законом распределения Гаусса:

 Возможно формальное описание изменения асимметрии (право- и левосторонней растянутости или асимметричности) и эксцесса (островершинности) кривой распределения плот-

Как известно, при нормальном распределении асимметрии нет ($A_{\rm C}=0$), т.е. кривая распределения является симметричной относительно ожидаемой средней величины аргумента; а экспесс равен нулю ($E_{\rm K}{=}0$, где $E_{\rm K}{=}\frac{\mu_{\rm H}}{\sigma^{\rm H}}{-}3$), эдесь $\mu_{\rm H}{-}$ центральный момент четвертого порядка, σ — стандартное отклонение.

- 2) Возможно найти оценку минимального значения величины куска (зерна) продукта помола (просева) т.е. минимальную величину аргумента x_{\min} . В противном случае задается наименьшее отверстие сита x_{\min} , с которого начинается отсчет измерения аргумента.
- 3) Распределение Вейбулла довольно простое для расчетов.

Распределение Вейбулла имеет и недостатки. Например, асимметрия и эксцесс зависят только от параметра α . Это значит, что при определенном значении эксцесса E_{κ} , однозначно эпределено и значение асимметрии A_{c} . В практике это часто не так, псэтому нужно найти удовлетворяющие, но не точные параметры распределения, прибегая к математическим методам приближения.

В некоторых случаях распределение Вейбулла использовать нецелесообразно, поэтому всегда до приступления к решению новой задачи требуется специальный подход к проблеме.

Несмотря на некоторые недостатки закон распределения Вейбулла находит широкое применение в технике, науке, биологии и т.д.

2. Распределение Вейбулла. ГОСТ II.007.75 [1, 2]

Случайная величина является распределенной по закону Вейбулла, если его функция распределения имеет следующий вид:

 $F(x) = 1 - e^{-\beta(x - x_{min})^{\alpha}}, \qquad (I)$

где x - аргумент; α , β , x_{min} - параметры распределения (константы);

жтіп - минимальное значение в совокупности аргументов, показатель сдвига на оси абсцисс;

 показатель формы кривой, характеризующий асимметрию и эксцесс распределения;

в - показатель системы единиц, масштаба.

Функция плотности распределения вероятностей Вейбулла (дифференциальная функция) выражается следующей формулой:

$$F(x) = p(x) = \alpha \beta (x - x_{min})^{\alpha - 1} e^{-\beta (x - x_{min})^{\alpha}},$$
 (2)

Если минимальное значение аргумента x_{min} равняется нулю (x_{min} =0), то это распределение превращается в известный закон распределения Розина-Раммлера. Последнее распределение имеет несколько ограниченные возможности по сравнению с законом распределения Вейбулла.

3. Метод наименьших квадратов [2, 4, 5, 6]

Сглаживание эмпирических функций (графиков-полигонов, гистограмм экспериментов) полных остатков ситового анализа с использованием принципа наименьших квадратов производится по формуле

 $y = \Phi(x) = e^{-\beta(x - x_{min})^{\alpha}}, \tag{3}$

где $\Phi(x)$ - полный остаток в долях единицы на сите с размером стороны ячейки x,

 $\Phi(x) = 1 - F(x),$

где F(x) - функция распределения Вейбулла (I).

Методом наименьших квадратов определяются параметры ∞ и β . Двойным логарифмированием преобразуем формулу (3) в линейную форму в виде

$$y = a + bx, \tag{4}$$

rge
$$4 = \ln \ln \left(\frac{1}{\phi(x)}\right)$$
, $a = \ln \beta$, $b = \alpha$, $x = \ln (x - x_{min})$.

После решения двух нормальных уравнений получены для оценок ∞ и β следующие формулы:

$$\alpha_{i} = \frac{\sum_{k=1}^{N} \ln(x_{k} - x_{min}) \sum_{k=1}^{N} \ln(x_{k} - x_{min}) \ln(x_{k} - x_{min}) \ln(x_{k} - x_{min})}{\left[\sum_{k=1}^{N} \ln(x_{k} - x_{min})^{2} - N \sum_{k=1}^{N} \left[\ln(x_{k} - x_{min})\right]^{2}},$$
(5)

$$\beta = \exp\left[\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} \ln \ln\left(\frac{1}{y_i}\right) - \alpha \sum_{i=1}^{N} \ln(x_i - x_{min})\right)\right],$$
 (6)

где $y_i = \Phi(x_i)$ - эмпирические (опытные) значения ординаты;

 x_i - размер зерна, значение абсциссы, $x_i > x_{min}$;

xmin - минимальный размер зерна (сита);

N - количество фракции, где $0 < q_1 < 1$ (см. (3)).

Далее по формуле (3) вычитаются сглаженные теоретические значения $\Phi(x_i)$ по нужным аргументам x_i^*

Хорошие результаты для α и β по формулам (5) и (6) получим при условии, что промежутки (расстояния) между x_i и x_{i-1} , т.е. $\Delta x_i = x_{i-1}x_{i-1}$ есть постоянные и общее количество аргументов $N \ge 20$.

При неравномерных $\Delta \infty$; и при $N \ge 8$, как это часто имеет место для определения гранулометрического состава сыпучего материала (т.е. при группированных экспериментальных данных) надо использовать для оценок параметров ∞ и β метод наименьших квадратов с использованием математических "весов".

В этом случае расчет оценок для о и β (для формулы (3)) можно вести следующими формулами:

$$\beta = \exp\left[\frac{\sum G_i \mathcal{Y}_i \cdot \sum G_i \mathcal{X}_i^2 - \sum G_i \mathcal{X}_i \mathcal{Y}_i \sum G_i \mathcal{X}_i}{G \sum G_i \mathcal{X}_i^2 - \left[\sum G_i \mathcal{X}_i\right]^2}\right], \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\sum G_i y_i - G \ln \beta}{\sum G_i x_i}, \qquad (8)$$

где $\mathfrak{X}_{i} = \ln(\mathfrak{X}_{i} - \mathfrak{X}_{min}); \, \mathcal{Y}_{i} = \ln\ln\left(\frac{1}{y_{i}}\right),$

здесь 4: - ординаты кривой экспериментальных значений;

G; - функция математического веса; для распределения
 Вейбулла можно представить в форме:

$$G_{i} = (x_{max} - x_{i})^{T}, \tag{9}$$

где жтах - максимальный размер сита;

т - некоторое вещественное число,

$$G = \sum G_i, \qquad (10)$$

N - количество аргументов для расчета.

Метод наименьших квадратов обеспечивает хорошую формализацию экспериментальных результатов по закону распределения Вейбулла.

Мерой приближения экспериментальных данных к формализованной кривой служит корреляционная оценка Θ [3].

Если $\theta = I$, то экспериментальная кривая (или полигон) приблизительно совпадает с теоретической (распределением Вейбулла).

Обычно Ө≈1. Корреляционная оценка вычисляется по фор-

муле:

$$\theta = \frac{\sigma_{y_T}}{\sigma_{u_n}}, \quad (II)$$

где от - стандартное отклонение двухкратно логарифмированной обратной величины функции дополнения распределения Вейбулла;

и вычисляется по формуле

$$\sigma_{y_{\tau}} = \frac{1}{N} \sqrt{N \sum y_{\tau_i}^2 - (\sum y_{\tau_i})^2},$$
 (12)

где

$$\Psi_{\tau_i} = \ln \beta + \alpha \ln (x_i - x_{\min}), \qquad (13)$$

и от - стандартное отклонение двухкратно логарифмированной обратной величины экспериментальных данных;

и вычисляется по формуле

$$\sigma_{y_a} = \frac{1}{N} \sqrt{N \sum y_{3i}^2 - (\sum y_{3i})^2}, \tag{I4}$$

где

$$y_{\mathfrak{g}_{i}} = \ln \ln \left(\frac{1}{y_{i}} \right),$$
 (15)

у; - опытная величина,

N - количество расчетных аргументов.

При этом недо помнить, что в расчет θ нельзя включать $y_i = 1$, так как $lnln1 = -\infty$, следовательно $0 < y_i < 1$. Количество полных остатков (на ситах) N нужно соответственно выбирать.

38

Примеры использования этого метода представлены в статье "О математическом описании гранулеметрического сестава мельничного продукта при грубом измельчении горючего сланца в центробежно-отражательной мельнице", опубликованной в данном сборнике.

Литература

- I. ГОСТ II.007-75 (СТ СЭВ 877-78). Прикладная статистика: Правила определения оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла.
- 2. Энник Х.Я. О возможности более точного определения коэффициента безопасности конструктивного материала по прочности хрупкого разрушения // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1985. № 603. С. 54-56.
- 3. Я л а с т о X. Справочник по элементарной статистике. На эстонском языке. Таллин: Валгус, 1978. С. 81-90, 138 -145.
- 4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Лейпциг: Тоибнер; М.: Наука, 1981. С. 289, 659, 689.
- 5. Тамме Э., Выханду Л., Лухт Л. Методы вычислений І. 2-е изд. Таллин: Валгус, 1986 (на эстонском языке). С. 163-165.
- 6. Левин М.И., Ульм С.D. Справочник по вычислительным методам. 2-е изд. доп. Таллин: Валгус, 1977 (на эстонском языке). С. II7.

Possibilities of Approximation of the Experimental Data of Screen Analysis of the Granulometric Composition of Loose Materials, Using the Weibull and Rosin-Rammler Distributions

Abstract

Calculation formulae for the estimation of the parameters of the Weibull distribution in the analysis of the granulometric composition of loose materials and other similar problems are presented by means of the method of least squares.

The present methodology is not included in FOCT 11.007-

H. Ennik, T. Pihu, A. Rips

Puisteaine sõelanaluusiga saadud lõimise lähendamise võimalikkusest, kasutades Weibulli ja Rosin-Rammleri jaotust

Kokkuvõte

Esitatakse vähimruutude meetodi abil tuletatud arvutusvalemid hinnangute saamiseks Weibulli jaotuse parameetritele puisteaine lõimise analuusi ning teiste analoogsete ülesannete puhul.

Esitatud metoodika puudub standardis FOCT 11.007-75.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 620, 193

А.А. Отс, Х.Х. Арро, А.В. Прикк

ПРОВЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ОЧИСТКИ И ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ МГД-ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Общие сведения

На МГД-электростаниях открытого цикла примерно 50 % электроэнергии вырабатывается в традиционном паросиловом цикле, эффективность которого определяется работой котларупилизатора. Из опыта эксплуатации обычных тепловых электростанций известно, что надежность работы котлоагрегатов зависит, прежде всего, от поведения золы сжигаемого топлива в газоходах котла, в частности, от ее склонности к загрязнению и коррозии поверхностей нагрева. Свойства золы, определяемые ее химико-минералогическим составом и условиями сжигания язляются, таким образом, одним из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать при разработке конструкций новых котлоагрегатов или методов сжигания.

Что касается условий работы котлов-утилизаторов МГДэлектростанций, то они по сравнению с условиями работы котлов обыкновенных ТЭС должны, по-видимому, являться еще более сложными. Такое предположение обосновывается наличием
большого количества присадки в продуктах сгорания МГДЭС,
учитывая, что соединения щелочных металлов являются общеизвестными агрессивными компонентами золы в процессах загрязнения и коррозии поверхностей нагрева котлоагрегатов.

Характер золоприсадочных отложений

Вышеизложенное послужило причиной для проведения специальных исследований с целью выяснения характера золопри-

садочных отложений при сжигании различных твердых топлиз в условиях, имитирующих условия МГД-установки. При этом, кроме поведения ионизирующейся присадки интерес представляло также поведение золы сжигаемого топлива после высокотемпературной обработки.

Опыты нарашивания проб золоприсадочных отложений на специальных опытных зондах проводились на установке M-IO Кохтла-Ярвеской ТЭЦ [I], Относительно условий опытов следует отметить, что при предварительном определении зоны установления зондов в газоходе исходили из предположения, что с точки зрания загрязнения, в котлах-утилизаторах МГДЭС в наиболее трудных условиях, по-видимому, работают поверхности нагрева, расположенные в зонах, где температура продуктов сгорания не превышает IIOO °C. При более высоких температурах можно ожидать, что отложения стабилизируются вследствие стекания с труб отложившегося расплавленного вещества с высоким содержанием калиевых соединений (температура плавления K2CO3 составляет 89I ° С и K2SO4 1074 °C). Поэтому диапазон температуры дымовых газов, омывающих зонды, составлял при опытах 750-IIOO °C, а температура поверхностей зондов изменялась в пределах от 100 до 500-650 °C. Последние цифры соответствуют температуре высокотемпературных пароперегревателей. Сжигались бородинский, березовский, подмосковный, экибастузский кузнецкий угли и кашпирский сланец. Ионизирующаяся присадка подавалась в камеру сгорания в виде 50%-ного водного раствора К2СО3. При этом, доля К2О в продуктах сгорания составляла, в зависимости от заданного режима спыта, от 0.45 по І.2І %.

Опыты были кратковременными, продолжительностью не более 4-х часов (лимитировали возможности установки М-IO), но и за это время толщина отложений на зондах составляла от I-2 мм для I5-20 мм. Несмотря на то, что полученные данные характеризуют только первоначальную стадию образования отложений, в результате их была выяснена все же весьма интересная закономерность. Учитывая, что содержащаяся в потоке дымовых газов твердая фаза состоит в условиях МГД-установки, по-видимому, в основном из очень мелкозернистого вещества (конденсированные соединения калия, а также других

компонентов золы, испарившихся в камере сгорания при высеких температурах), можно было ожидать, что из-за малого уплотняющего и изнашивающего воздействия запыленного газового потока на отложения, образующиеся на зондах, они будут более-менее рыхлыми. В действительности это предположение, однако, не всегда подтверждалось и характер отложений во многом зависит от свойств золы сжигаемого топлива.

Так, отложения топлив, содержащих более 20 % Са0 золе (ирша-бородинский и березовский угли, кашпирский сланец) всегда имели связанный характер, а иногда отличались даже очень высокой прочностью, в то время как золоприсадочные отложения экибастузского, подмосковного и кузнецкого углей, были почти рыхлыми. Характерным для этих углей является малое (не более 5 %) содержание СаО и высокое (не менее 70-75 %) суммарное содержание SiO2 и Al2O3. При этом следует отметить, что несмотря на наличие ионизирующейся присадки в продуктах сгорания и участия ее в образовании отложений, характер последних всегда определялся свойствами золы, компоненты которой при сжигании всех топлив весьма значительных количествах присутствовали в образовавшихся отложениях. Также было замечено, что даже высокотемпературная обработка золы не приводит СаО к полной инертности относительно сульфатизации.

Полученный результат говорит, таким образом, о том, что в условиях сжигания в МГДЭС твердых топлив с высоким содержанием СаО в золе можно ожидать трудности в работе котлов-утилизаторов из-за интенсивного образования на поверхностях нагрева прочносвязанных золоприсадочных отложений. Такое положение требует, очевидно, установления на таких котлах эффективных средств очистки поверхностей нагрева, так как относительно слабодействующие методы (например, вибро- или газоимпульсная очистка) не справляются с их задачей в условиях образования очень плотных, прочносвязанных отложений. В качестве основных эти методы могут быть применены только при сжигании малозагрязняющих топлив, характерным для которых является кислая зола с высоким содержанием SiO₂ и Al₂O₃ в золе.

Опыт эксплуатации котлоагрегатов традиционных ТЭС показал, что применение эффективных методов очистки (например, паровой обдувки, водяной обмывки и т.д.) всегда связано с интенсивным износом поверхностей нагрева, что ограничивает возможности использования этих методов. При этом, износ поверхностей нагрева под влиянием очистки во многом зависит от склонности образовавшихся на трубах золовых отложений к коррозии труб. Поэтому, разработка наиболее оптимальных методов и режимов очистки труб требует, прежде всего, данных об интенсивности коррозии котельных сталей под воздействием золовых отложений, особенно на начальных стадиях их образования.

Исследования показали, что наиболее агрессивными компонентами золовых отложений являются соединения щелочных металлов. Поэтому в условиях котлов-утилизаторов МГДЭС наибольший интерес представляет воздействие калиевых соединений ионизирующейся присадки в процессах коррозии проверхностей нагрева.

Для упрощения задачи в настоящей работе было решено вначале рассматривать коррозионное воздействие только ионизирующейся присадки, без присутствия других компонентов золы.

Коррозия перлитных сталей под воздействием поташа

В котлах-утилизаторах МГДЭС, сжигающих природный газ, единственным источником натрубных отложений на поверхностях нагрева является вводимая в систему ионирирующаяся присадка. Опыт работы экспериментальных МГД-установок показывает, что надежная работа этих котлов также зависит, в основном, от эффективности очистки поверхностей нагрева от отложений присадки. В качестве последнего обычно при сжигании газа применяется поташ. В условиях периодической очистки поверхностей нагрева долговечность их определяется коррозионной стойкостью используемых сталей. Высокотемпературная коррозия, в свою очередь, определяется маркой и температурой стали, составом продуктов сгорания, составом натрубных отложений и временем работы.

В свете сказанного, изучение кинетики коррозии сталей под воздействием ионизирующейся присадки, в данном случае поташа, должно давать основу как для прогнозирования изно-

са поверхностей нагрева (ресурса работы), так и для правильного выбора схемы, средств и режимов их очистки при проектировании и эксплуатации котлов для МГД-электростанций.

Результаты лабораторных исследований Таллинского политехнического института по кинетике коррозми сталей Ст. 20, I2XIMD, I2X2MDCP, I2XI8HI2T и ЭИ-756 в продуктах сгорания газа под воздействием поташа представлены в [2-7]. В результате этих работ получены обобщенные аналитические зависимости средней глубины коррозии (Δ S) от абсолютной температуры металла (T) и времени (T) типа:

$$Ln\Delta S' = A - B/T + (C + DT)Ln\tau$$
. (I)

Среди испытанных сталей наиболее стойкими к коррозии под воздействием поташа являются аустенитная сталь I2XI8HI2T и ферритомартенцовистая сталь ЭИ-756. Если предельные температуры использования этих сталей при отсутствии разрушения окалины на металле доходят до 670-680 $^{\rm O}$ C, то для перлитных сталей I2XIMD и I2X2MDCP не превышают 580-590 $^{\rm O}$ C [2, 3].

В реальных условиях кроме параметров, входящих в зависимость (I), на металл воздействуют многочисленные факторы, учет которых без ввода дополнительных ограничений и коэффициентов невозможен. В число таких факторов необходимо включить также общеизвестные изменения в микроструктуре металла и фазовом строении окалины на перлитных сталях при 570-580 ос и выше [7]. Эти температуры практически совпадают с предельными температурами использования перлитных сталей, являющихся основным материалом поверхностей нагрева котлов-утилизаторов МГДЭС, проектируемых для работы в условиях периодической очистки от золоприсадочных отложений. В связи с этим упомянутые выше изменения, как будет показано в дальнейшем, приобретают особоважное значение.

Изменения в микроструктуре металла (сфероидизация и дифференциация перлита и коагуляция карбидных частиц) оказывают сильное влияние на сопротивление ползучести и длительную прочность металла, снижают пределы прочности и текучести, а также коррозионную сопротивляемость [2, 3, 6].

Изменения в структуре окалины при 560-580 °C связаны со значительным рестем содержания вюстита (FeO) в нижнем ее слое [3-5].

По общему мнению исследователей, при температурах ниже 560-570 °C на железе образуется двухфазная окалина, состоящая, в основном, из магнетита (Fe_3O_4), над которым образуется тонкий слой из α — и γ — Fe_2O_3 . При такой структуре окалины скорость окисления определяется практически только скоростью роста Fe_3O_4 .

При температурах выше 560-570 °C образуется трехфазная окалина FeO/Fe₃O₄/Fe₂O₃. Отношение толщины отдельных слове такой окалины зависит от скорости роста каждого из них, которая в свою очередь определяется диффузией кислорода и ионов железа через окалину. На основе сказанного наиболее быстро нарастающим слоем является оксид с максимальной концентрацией дефектов кристаллической решетки. В то же время известно, что максимальную концентрацию дефектов имеет оксид металла с минимальной степенью окисления. Следовательно, скорость нарастания FeO существенно превышает скорость роста остальных оксидов, т.е. при высоких температурах основную часть многофазной окалины составляет оксид с минимальной степенью скисления. При этом подчеркивается, что фазовый состав многофазной окалины является функцией температуры.

В свете сказанного для формирования на металле стабильного слоя вюстита диффузионное сопротивление внешних слоев из Fe_3O_4 и Fe_2O_3 должно доходить до определенного значения. Это значит, что толщина окалины должна расти до требуемой величины, т.е. помимо температуры образование вюстита является и функцией времени выдержки.

Из вышесказанного следует, что присутствие вистита в окалине является крайне нежелательным, так как резко понижает защитные свойства окалины.

Отмеченное выше подтверждают результаты исследований строения и минералогического состава окалины, полученные в ТПИ при коррозии на воздухе, а также в продуктах сгорания как под воздействием зол различных твердых топлив, так и под воздействием поташа [7]. В продуктах сгорания газа

окалина на образцах из сталей I2XIMO и I2X2MOCP, отработавших 800 часов под воздействием поташа при 540 и 580 $^{\rm O}$ C однослойная. При 620-650 $^{\rm O}$ C оставшаяся окалина многослойная, неплотная, легко отшелушивающаяся от основного металла. Исследования минералогического состава окалины показали отсутствие при температурах выше 580 $^{\rm C}$ C стабильного плотного слоя из ${\rm Fe}_2{\rm O}_3$. Очевидно при высоких температурах доля ${\rm Fe}_2{\rm O}_3$ незначительная ввиду быстрого роста слоев из ${\rm Fe}_3{\rm O}_4$ [2].

На появление FeO в нижнем слое окалины при температурах выше 560-570 °C обращают внимание большинство исследователей, изучавших процесс высокотемпературной коррозии перлитных сталей в различных условиях. Образованием FeO объясняют, главным образом, большой разброс экспериментальных точек и, в меньшей мере, перегиб кинетических кривых коррозии в диапазоне 550-600 °C [6]. К сожалению, при дальнайшей математической обработке экспериментальных данных, в полученных кинетических уравнениях коррозии и в пределах их применимости все это, как правило, не учитывается.

Первая попытка учета появления FeO сделана в [3] при обработке экспериментальных данных по кинетике коррозии сталей I2XIMФ и I2X2MФСР в продуктах сгорания газа под воздействием поташа. Математическая обработка на ЭВМ про-изводилась различными массивами экспериментальных данных до и после перелома кинетических графиков. В [7]представляются результаты новой математической обработки данных по кинетике коррозии этих сталей после получения дополнительных экспериментальных данных. Получены уточненные температурно-временные зависимости типа (1), карактеризующие процесс коррозии до и после появления вюстита в окалине.

Для сталей I2XIMФ и I2X2MФСР в продуктах сгорания газа под воздействием поташа в [7] рекомендуются следующие кинетические уравнения:

- при двухфазной окалине Fe_3O_4/Fe_2O_3 :

12X1M Φ : $Ln\Delta S_4' = 1,30-5982/T+0,249Ln\tau$,

12X2M Φ CP: $Ln\Delta S_4' = -0,88-4751/T+0,328Ln\tau$,

(2)

- при трехфазной окалине
$$FeO/Fe_3O_4/Fe_2O_3$$
:

12 X1MФ : $Ln\Delta S_2'=15.82-20630/T+0.708Ln\tau$ и (4)

12 X2MФCP: $Ln\Delta S_2'=21.53-26220/T+0.810Ln\tau$. (5)

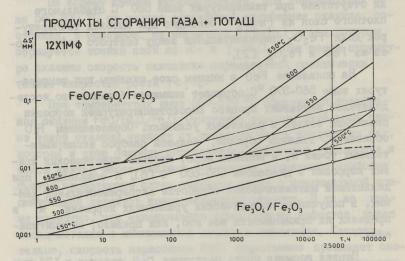


Рис. 1. Кинетическая диаграмма коррозий стали.

В качестве примера на рис. І представляется кинетическая диаграмма коррозии стали І2ХІМФ в продуктах сгорания газа под воздействием потаща. Как видно, появление FeO на границе металл-окалина вызывает очень сильное скачкообразное увеличение показателя степени окисления, т.е. скорости коррозии. Одновременно видно, что время образования окалины, диффузионное сопротивление которой соответствует условиям образования стабильного вюстита (тео), уменьшается значительно по мере увеличения температуры металла.

Для рассматриваемых перлитных сталей при $560\,^{\circ}$ С т $_{\text{FeO}}$ составляет 800-I000 часов, а при $540\,^{\circ}$ С превышает уже 2000 часов. Это говорит о том, что при эксплуатации котлов-утилизаторов МГДЭС в условиях периодической очистки поверхностей нагрева вероятность образования стабильного FeO в нижнем слое окалины при температурах ниже $570-580\,^{\circ}$ С сильно уменьшается, а при $540\,^{\circ}$ С образование вюстита уже маловероятно.

На рис. І граница появления FeO показана штрихованной линией, являющейся в координатах $Ln\Delta S'-Lnc$ степенной функцией времени:

 $Ln\Delta S'_{FeO} = K + n_{FeO}Ln\tau$. (6)

Опираясь на уравнения (2) - (5) для сталей I2XIMФ и I2X2MФСР, получены следующие зависимости:

12 X 1 M
$$\Phi$$
 : Ln $\Delta S'_{Fe0} = -4,623 + 0,060 Ln \tau$ и (7)

$$12 \times 2 \text{M}\Phi \text{CP} : \text{Ln} \Delta S'_{\text{Fe0}} = -5,860 + 0,225 \,\text{Ln}\tau$$
 (8)

На основе данных рис. І в опытах под воздействием поташа средняя глубина коррозии стали $I2XIM\Phi$, при которой диффузионное сопротивление формирующейся на металле окалины соответствует условиям появления вюстита, мало зависит от времени и составляет 0,0I-0,0I5 мм при $n_{\text{FeO}}=0,060$. По мере падения коррозионной стойкости стали показатель n_{FeO} увеличивается — для стали $I2X2M\Phi CP$ в тех же условиях равняется 0,23.

На основе представленных выше данных высокотемпературная коррозия перлитных сталей при двухфазной окалине Fe_3O_4/Fe_2O_3 протекает в диффузионной области в то время, как при трехфазной окалине $FeO/Fe_3O_4/Fe_2O_3$ процесс коррозии приближается к кинетической области с максимально возможной скоростью коррозии.

Износ перлитных сталей в условиях работы котла-утилизатора

В циклах периодической очистки поверхностей нагрева обычно совместно с отложениями полностью или частично отделяется защищающая металл от коррозии окалина, т.е., периодические разрушения уменьшают общее диффузионное сопротивление последней, что неизбежно ускоряет высокотемпературную коррозию металла. Таким образом, коррозионно-эрозионный изноструб поверхностей нагрева определяется условиями высокотемпературной коррозии металла, ускоряющим фактором которой является периодическое разрушение оксидной пленки в циклах очистки.

Обычно глубину коррозиенно-эрозионного износа в условиях периодической очистки определяют по формуле (7):

$$\Delta S = [1 + \xi(Bm^{1-n} - 1)] \Delta S',$$
 (9)

 $m = T/T_0$ - количество циклов очистки за время работы T_0

 τ_{0} - период между циклами периодической очистки ΠH_{*} ,

п - показатель степени окисления металла,

 в - коэффициент, учитывающий влияние первоначальной стадии коррозии на износ труб и

ΔS' - глубина коррозии металла под влиянием натрубных отложений за время τ.

На основе выражения (9) глубина износа труб в условиях их периодической очистки является пропорциональной глубине высокотемпературной коррозии $\Delta S'$, а ускоряющее действие очистки выражается комплексом $[1+\xi(B^{1-n}-1)]$. Степень разрушения оксидной пленки учитывает уменьшение диффузмонного сспротивления окалины вследствие воздействия очистительной силы. При слабой очистительной силе или отсутствии ее $\xi=0$ и $\Delta S=\Delta S'$. При полном удалении оксидной пленки в цикле очистки $\xi=I$, а при удалении совместно с оксидной пленкой и части основного металла $\xi>I$.

Большое влияние на коррозионно-эрозионный износ труб имеет показатель степени окисления металла п, определяемый кинетическим уравнением высокотемпературной коррозии. Чем ниже п, тем более чувствителен металл к периодическим силовым действиям. Коэффициент В учитывает ускорение коррозии в первоначальной стадии после снятия или разрушения оксидной пленки.

Выражение [9] позволяет решить ряд практических задач, связанных с прогнозированием износа труб в условиях их периодической очистки от отложений.

В координатах $\Delta S - \tau$ процесс коррозии перлитных сталей при учете образования FeO в нижнем слое окалины иллюстрирует рис. 2a, а коррозионно-эрозионный износ при периодической очистке поверхностей нагрева рис. 2б и 2в.

Если при периодической очистке поверхностей нагрева от натрубных отложений то <= Т Бео, т.е. период между очистками не превышает время. требуемое для появления вюстита, процесс коррозионноэрозионного износа иллюстрирует линия 4 на рис. 26. таком случае нижним пределом глубины износа **Д**S является глубина износа при $\tau_0 = \tau_{FeO}$ (линия 3), а верхним пределом глубина износа при полном отсутствии окалины (кинетическая область коррозии, линия 5).

При условии $\tau_{\rm o} > \tau_{\rm FeO}$ процесс коррозионно-эрозионного износа иллюстрирует рис. 2в. В этом случае имеются условия для образования трехфазной окалины FeO/Fe $_3$ O $_4$ /Fe $_2$ O $_3$ и верхним пределом для ΔS является глубина износа при условии $\tau_{\rm o} = \tau_{\rm FeO}$ (линия 3).

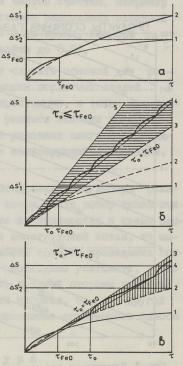


Рис. 2. Схема кинетики коррозии (а) и коррозионно-эрозионного износа нерлитной стали при $\tau_0 < \tau_{e0}$ (б) и при $\tau_0 > \tau_{e0}$ (в).

По мере роста τ_0 глубина износа при условии $\tau_0 = \tau_{\text{FeO}}$ (ли-

В рамках настоящей работы производился расчет допускаемой частоты периодической очистки (τ_c , ч) при различных степенях разрушения оксидной пленки (ξ) и ресурсах работы труб (τ , ч). В расчетах использовался коэффициент запаса I,3, учитывающий неравномерность глубины коррозии, а коэффициент В из-за отсутствия в настоящее время данных по коррозии сталей в первоначальной стадии под влиянием поташа принимался равным I,0. Кроме того вводилось условие, согласно которому при $\tau_0 > \tau_{\text{FeO}}$ образуется трехфазная окалина.

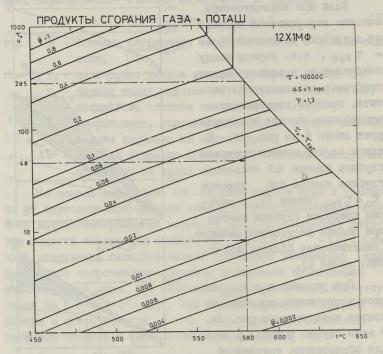


Рис. 3. Номограмма для прогнозирования допускаемого периода между очистками поверхностей нагрева.

На рис. 3, в качестве примера, представляется номограмма для прогнозирования допускаемого периода между очистками при заданной $\Delta S = I$ мм (глубина равномерной коррозии при коэффициенте запаса $\Psi = I$,3 составляет 0,77 мм) в температурном интервале 450-650 °C при ресурсе работы I00000 ч и различных степенях разрушения оксидной иленки.

Видно, что при $\tau_0 > \tau_{FeO}$, т.е. при трехфазной окалине, происходит скачкообразное очень сильное увеличение допускаемого периода между очистками. Это значит, что при эксплуатации котлов-утилизаторов в условиях периодической очистки поверхностей нагрева эт отложений поташа при $\tau_0 > \tau_{FeO}$ нечинается катастрофический рост износа труб. При коррозии стали $12XIM\Phi$ в продуктах сгорания газа под воздействием поташа при температуре металла $580\,^{\circ}$ С и ресурсе работы 100000 часов катастрофический коррозионно-эрозионный износ начинается при степени разрушения оксидной пленки $\xi > 0,15$

(τ_0 = 285 ч). При необходимости частой очистки, например τ_0 = 8 ч (паровая очистка), степень разрушения оксидной пленки должна остаться ниже 0,0I в то время, как при τ_0 = 48 ч (водяная обмывка) может дойти до 0,04.

Полученные результаты могут служить основой для разработки рекомендаций по применимости перлитных сталей в условиях работы котлов МГД электростанции, а также для правильного выбора схем, средств и режимов очистки поверхностей нагрева упомянутых котлов в условиях сжигания природного газа с добавкой, в качестве ионизирующейся присадки, поташа,

Особо зажным является вопрос правильного выбора режимов очистки в ходе эксплуатации котла. Если выбор типов счистительных аппаратов, определение их количества и схемы расположения во многом определяются конструкцией котла, то выбор оптимальных параметров их работы требует проведения специальных исследований. При этом необходимо учитывать, что увеличение интенсивности очистки, с одной стороны, увеличивает тепловосприятие поверхностей нагрева, но, с другой стороны, возрастает скорость коррозиснно-эрозионного износа труб.

Литература

- І. Арро Х.Х., Книга А.А. Кеэров В.Я., Кулев В.Н., Носкова Н.И., Прикк А.В., Ратник В.Э. О поведении минеральной части твердых топлив в условиях МГДЭС // Восьмая Междунар. конф. по МГД-преобразованию энергии. М., I2-I8 сент. I983 г. Т. 5. С. II-I4.
- 2. Отс А.А., Таллермо Х.И., Прикк А.В. Исследование коррозионного износа котельных сталей под воздействием поташа в продуктах сгорания газа. Там же, Т. 4. С. 31-34.
- 3. Отс А.А., Прикк А.В., Тоуарт Р.В. Расчет скорости коррозии котельных сталей под влиянием отложений поташа применительно к парогенераторам МГДЭС // Междунар. научно-техн. совещ. "Физико-техн. проблемы создания МГДЭС". Киев, 2-8 сент. 1984 г., Д 4.1. Д4.4.

- 4. Отс А.А., Прикк А.В., Тоуарт Р.В. Коррозия сталей в продуктах сгорания газа под воздействием поташа // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1985. № 600. С. 474—54.
- 5. Таллермо Х.И., Прикк А.В., Хунт А.Э. Влияние состояния исходной поверхности металла на интенсивность коррозии в начальной стадии // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 654. С. 55-64.
- 6. От с А.А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. Энергоатомиздат. М., 1987. 272 с.
- 7. Отс А.А., Прикк А.В., Томанн Э.Л., Тоуарт Р.В., Бояринова Т.П. Роль вюстита в кинетике высокотемпературной коррозии перлитных сталей // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1988. № 672. С. 40-61.
- 8. Ots A.A., Tallermo H.J., Tomann E.L., Suurkuusk T.N. Corrosive erosive wear of steam generator heating surfaces // Fouling and corrosion in steam generators. Beograd, 1980. P. 107-126.

A. Ots, H. Arro, A. Prikk

Die Verschmutzungs-, Reinigungs- und Verschleißprobleme der Dampferzeugerheizflächen bei MHD-Kraftwerken

Zusammenfassung

Es wurde bewiesen, daß der Verschmutzungsprozeß von Dampferzeugerheizflächen an MHD-Anlagen beim Verbrennen von festen Brennstoffen sehr stark von der Aschezusammensetzung abhängig ist. Es gibt einen großen Unterschied im Verschmutzungsvorgang zwischen den Brennstoffen mit saurer und basischer Asche. Die letzten verursachen große Schwierigkeiten im Kesselbetrieb wegen der Bildung von harten, festverbundenen Ablagerungen.

Hinsichtlich der Heizflächenkorrosion wurde festgestellt, daß die Korrosionsgeschwindigkeit sich bei Temperaturen über 500 °C wegen der FeO-Bildung in der Zunderschicht nach der Anfangsperiode erhöht ersteigt, die zur
Verminderung von Schutzeigenschaften der Zunderschicht
führt. Es wurde auch die entsprechende Methodik für Heizflächen-Korrosionsberechnungen ausgearbeitet.

A. Ots, H. Arro, A. Prikk

MHD-elektrijaamade katelde-utilisaatorite kuttepindade saastumise, puhastamise ja kulumise probleemid

Kokkuvõte

MHD-elektrijaamade katelde-utilisaatorite edukas ekspluateerimine tagatakse kuttepindade efektiivse soojusliku tooga. Selle ulesande taitmiseks on vajalikud andmed nende kuttepindade saastumise ja erosiconilise korrosiooni kohta.

Kirjeldatakse tahkete kütuste mineraalosa ja ioniseeriva lisandi mõju küttepindadele moodustuvate sadestiste omadustele. Analüüsitakse perliitteraste korrosiooni gaasi põlemisproduktides potase sadestiste juuresolekul ning vüstiidi osa selles. On saadud korrosiooni kineetilised võrprandid.

Toodud andmed on vajalikud sadestiste omaduste prognoosimiseks erinevate kutuste põletamisel ning MHDEJ-katelde kuttepindade puhastamise meetodite, vahendite ja režiimide valimiseks.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUJI TOIMETISED TPYJH TALLIUHCKOFO NOJUTEXHUYECKOFO UHCTUTYTA

УДК 662.93:66.096.5

А.А. Пайст

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ В КНР

Введение

На современном этапе энергетика КНР развивается в направлении использования в первую очередь низкосортных твердых топлив. За 1986 г. в КНР дебыто 860 млн. тонн угля, из которого 410 млн. тонн использовано на выработку электроэнергии и тепла [I].

Одним из способов сжигания твердых топлив на данном этапе развития техники является использование топок с кипящим слоем. Применение этого способа сжигания позволяет сократить габариты котлов, связывать сернистый ангидрид $\rm SO_2$ и снизить образование $\rm NO_X$.

На современном этапе развития в КНР работает около 2600 установок с традиционным кипящим слоем. Производственно-отспительные котлы имеют обычно паропроизводительность 2, 4, 6, 8, 10 и 12 т/ч, а котлоагрегаты для выработки электроэнергии паропроизводительностью 27,35 и 130 т/ч со средними параметрами пара (3,8 МПа и 450 °C).

Новым направлением для сжигания низкосортных твердых топлив является метод форсированного или циркулирующего кипящего слоя, отличающийся от традиционного кипящего
слоя более высокими коэффициентами выгорания топлива. Технология циркулирующего кипящего слоя способна заменить применяемую до сих пор технологию традиционного кипящего слоя,
особенно при повышенной требовательности потребителя к
теплотехническим, экологическим и экономическим показателям котлоагрегата.

Содержание и новизна технологии циркулирующего кипящего слоя заключается в успешном сочетании традиционного кипящего слоя с новыми элементами: циклона (камеры осаждения) на выходе из топки и специальной системой возврата уноса в топку – состоящей из бункера и немеханического вентиля.

В настоящее время в КНР разработка технологии сжигания топлива в котлах с кипящим слоем ведется по ряду направлений, включая схемы с традиционным и циркулирующим слоями, а также организация кипящего слоя под давлением в топке.

Угольные ресурсы

По запасам углей КНР занимает третье место в мире. За последние 25 лет добыча угля выросла от 32 млн.т у.т. (1949 г.) до 725 млн.т у.т. в (1985 г.). В 1987 г. было добыто 890 млн т у.т., а по прогнозам к 2000 г. добыча угля возрастет до 1200 млн.т условного топлива в год.

Географически КНР занимает большую территорию, месторождения угля рассеяны по всей территории Китая, начиная с северных провинций до южных островов. Гамма углей очень широкая, начиная с антрацитов и кончая лигнитами от высококалорийных углей до низкосортных. В сечеро-восточных провинциях Heilongjiang, Kirin и Lidoning в бассейне Shanxi и восточной провинции Anhui сосредоточено более 90% из запаса углей с высокой степенью углефикации. Запасы бурых углей сконцентрированы во Внутренней Монголии, однако в южных провинциях, в том числе и в бассейне Sichuan находятся небольшие, разбросанные по всей территории месторождения. В КНР более 18 шахт с годовой выработкой угля более чем 7 млн. т у.т., а мощные шахты в бассейне Datong и Kailun добывают высококалорийных углей [2] более чем 20 млн. т у.т. в год.

Сжигание китайских углей в котлоагрегатах

В КНР для сжигания твердых топлив используют слоевые топки как с плотным фильтрирующим, так и с кишящим слоем, а

также камерные топки для сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии.

Промышленные котлы снабжены слоевыми топками, а энергетические котлы в основном камерными топками.

В промышленных котлах используют в основном битуминозные угли среднего и высокого качества.

Теплота сгорания (низшая) битуминозных углей:

- низкосортный битуминозный уголь до 15,5 МДж/кг (3700 ккал/кг)
- битуминозный уголь среднего качества I5,5-I9,7 МДж/кг (3700-4700 ккал/кг)
- битуминозный уголь высокого качества более 19,7 МДж/кг (4700 ккал/кг)

В промышленных котлах паропроизводительностью от 10 до 30 т/ч используют механические топки с цепной решеткой. Однако механические топки с цепной решеткой очень чувствительны к спекающимся свойствам угля и поэтому для спекающихся углей используют топки с решеткой возвратно-поступательного движения (паропроизводительность таких котлов от 2 до 10 т/ч).

Около 50 % теплоэлектростанций ННР работают на пылевидном топливе. В энергетических котлах этих станций используют в основном битуминозные угли с хорошим выходом летучих и литниты. Паропроизводительность котлов от 35 до 850 т/ч, котлы паропроизводительностью выше 400 т/ч имеют в основном тангенциальное расположение горелок.

Дальнейшее развитие тепловых электростанций в КНР выдвигает необходимость решения новых технических задач, которые можно на данном этапе сформулировать следующим образом:

- выработка классификации ископаемых углей для лучшего их использования и выбора правильного способа сжигания.
- максимельное снижение расхода мазута в структуре потребления топлива при одновременном повышении доли твердого топлива, создание более современных горелочных устройств, позволяющих сократить или полностью исключить потребность в мазуте для подсветки факела при сжигании твердого топлива, а также для поджигания твердого топлива.

- стабильное и эффективное сжигание низкосортных углей, создание специальных горелочных устройств с предкамерой и со стабилизаторами факела;
- разработка, внедрение и совершенствование новых технологий производства электроэнергии и теплоты, в первую очередь работающих на твердых топливах, с обеспечением мер по охране окружающей среды.

Технология традиционного кипящего слоя в КНР

В настоящее время для изучения процессов сжигания низкосортных углей и отходов углеобогащения созданы специальные экспериментальные установки и котлы.

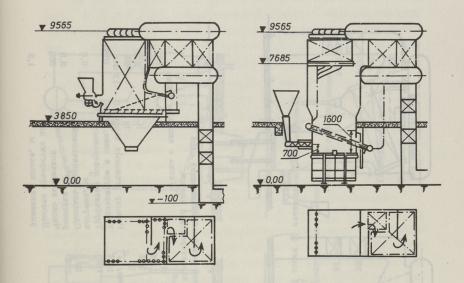
Первые исследования сжигания мелкого низкосортного сланца в опытной установке начались уже в 1964 г. в провинции Гуангдонг. В 1965 г. была создана первая установка для сжигания маюмингского сланца паропроизводительностью 14,5 т/ч (4 кг/с) с параметрами пара 1,3 МПа и 250 °С (Маомингский сланец имеет влажность 18 %, зольность до 62,2 % и теплоту сгорания 4,3 МДж/кг (1034 ккал/кг).

На основе полученных на Масмингском кстле экспериментальных данных были созданы в 1969 г. новые котлы для сжитания антрацитов и отходов углеобогащения, паропроизводительностью 14 т/ч с параметрами перегретого пара 2,4 МПа и 360 °C.

Начиная с 1969 г. началось широкое применение котлов с жиплящим слоем. Многие слоевые топки, которые были спроектированы для сжигания углей со средним выходом летучих, были переведены на киплящий слой, для сжигания углей с очень высокой зольностью до 70 %.

В 1976 г. в провинции Sichuan котлы с неподвижной решеткой, механические топки с цепной решеткой и решеткой с качающимися колосниками переведены на кипищий слой. Основные характеристики этих котлов приведены на рис. I, 2 и 3.

Реконструированные котлы снабжены шнековыми питателями угля в объем слоя и наклонными пучками труб в слое. Котлы снабжены системой автоматического регулирования и контроля



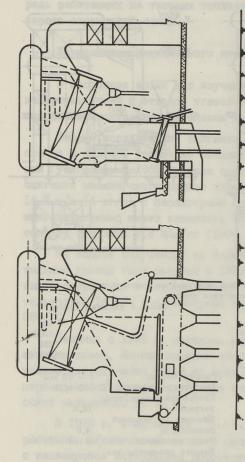
Fuc. 1. Перевод топки с неподвижной решеткой на кипящий слой.
Общая характеристика котлов.

Топка с неподвижной решеткой		Топка с кипящим слоем	
Паропроизводительность, т/ч Давление пара, кПа Температура пара, С Температура воды, 2°С	8 1300 350 50		10 1300 350 50
Площадь решетки, м	10,9	Температура в слое, ^о С 950	13 MM
		Требуемая доверхность нагрева, м 16, Площадь кодпачковой	4
		решетки, м 4,5	
		Число колпачков 11	34

Высота отверстия для

удаления шлака, м

1,6

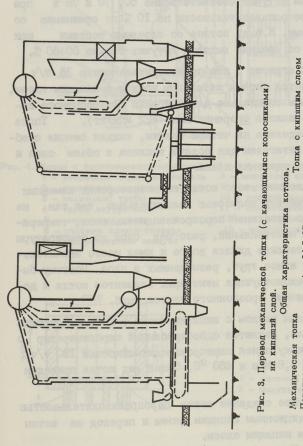


Рыс. 2, Перевод топки с цепной решеткой на кипящий слой Общая характеристика котлов.

Топка с кипяшим споем	Размер угольных частии 0 - 13 Температура в слое, С Трубчатая доверхность нагрева, м	Площадь кодпачковой решетки, м Число колпачков
Топка с неподвижной решеткой Паропроизводительность, т/ч 8 Давление пара, кПа Температура пара, С 275 Температура воды, С 50 50	Площадь поверхностей нагрева, м Р – радиационный 10,4 7 – конвективный 188. Т	- пароперетревателя 59 П - экономайзера 284 р

Высота отверстия для уналения шлака, м

MM



Топка с кипящим слоем Температура в слое, Паропроизводительность, т/ч 24,5-27 Давление пара, ^ОС 400 Давление пара, кПа Температура пара, ^оС 400

Высота отверстия для удале-

ния шлака, м 1,6

и рассчитаны для сжигания каменных углей с хорошим выходом летучих (теплота сгорания 5,3 МДж/кг), для углей со средним выходом летучих (теплота сгорания 18 МДж/кг) или смеси двух углей (75/25 %) при средней зольности 55 %.

К.п.д. этих котлов при сжигании каменных углей с хорошим выходом летучих, смеси этих двух углей и угля со средним выходом летучих соответственно 60, 70 и 78 % при увеличении паропроизводительности на 10 % по сравнению со слоевыми топками. К.п.д. котлов со слоевыми топками при сжигании угля со средним выходом летучих только 50-60 %.

Котельный агрегат с паропроизводительностью 35 т/ч (рис. 4) является первым китайским котлом с кипящим слоем, спроектированным специально для сжигания низкосортного каменного угля (теплота сгорания ниже 4,2 МДж/кг). Топка этого котла разделена на четыре секции, каждая секция снабжена шнековым питателем для подачи топлива в объем слоя и устройством для удаления шлака.

Однако освоение этого котла на ниэкосортных каменных углях нельзя считать полностью положительным, так как не было достигнуто проектной паропроизводительности, температура слоя была нестабильной, разогрев слоя до температуры воспламенения топлива длился долго и имел место значительный эрозионный износ труб, размещенных в слое. Поэтому была выполнена реконструкция некоторых элементов котла и достигнуто уменьшение эрозионного износа труб.

Самым мощным котлом с кипящим слоев в КНР, работающим на каменном угле, является однобарабанный парогенератор с естественной циркуляцией паропроизводительностью I30 т/ч. Параметры пара 3,8 МПа и 450 °C. Общий вид котла приведен на рис. 5.

В перспективе создание котла паропроизводительностью 240 т/ч с традиционным кипящим слоем и переход на котлы с циркулирующим кипящим слоем.

Технология циркулирующего кипящего слоя

С целью улучшения технологии прямого энергетического использования низкосортных углей, торфа, древесных отходов, продуктов обогащения предложен метод так называемого цир-

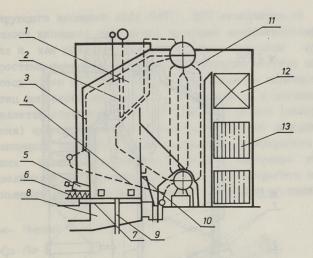


Рис. 4. Котел с паропроизводительностью 35 т/ч с кипящим слоем.

1 - вторичный пароперегреватель

2 - первичный пароперегреватель

3 - подъемные трубы

4 - трубы внутри слоя

5 - мазутная горелка

6 - система подачи топлива

7 - распределитель воздуха

8 - воздушная коробка

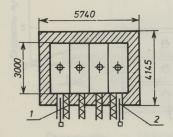
9 - спускное отверстие шлака

10 - перелив шлака

11 - конвективный газоход

12 - экономайзер

13 - воздухоподогреватель



1 - система подачи топлива

2 - мазутная горелка

План 4-секционного кипящего слоя (котла 35 т/ч)

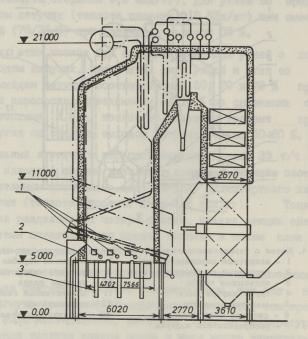
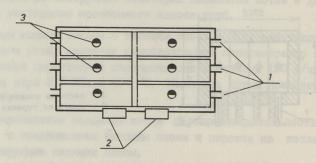


Рис. 5. Котел паропроизводительностью 130 т/ч с кипящим слоем.



План 6-секционного кипящего слоя (котла 130 т/ч)

1 - система подачи топлива,

2 - перелив шлака,

3 - спускное отверстие шлака.

кулирующего кипящего слоя (ЦКС). ЦКС отличается от трациционного кипящего слоя более высокими коэффициентами выгорания и, как показано на рис. 6, более высокими скоростями газа [4]. Если мелкие тверлые частицы заполняют весь объем ЦКС реактора, то определенное количество частиц выносится из реактора, сепарируется в циклоне, стправляется обратно в слой ЦКС, Поэтому циклон (камера осаждения) один из ключевых элементов в системе циркулирующего кипящего слоя. Благодаря внутренней реширкуляции несгочастиц увеличивается степень выгорания углерода и увеличивается термический к.п.д. котлоагрегата за счет уменьшения потерь от механической неполноты сгорания.

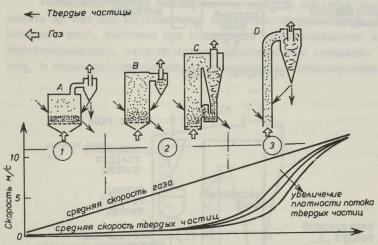


Рис. 6. Основные системы ожижения мелких частиц.

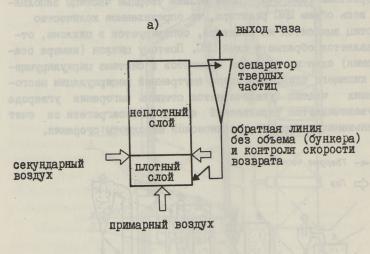
1 - классический кипящий слой,

2 - циркулирующий кипящий слой,

3 - пневмотранспорт.

Содержание и новизна циркулирующего кипящегоя слоя заключаются в успешном сочетании традиционного кипящего слоя с новыми элементами - горячего циклона (камеры осаждения) на выходе из топки и со специальной системой возврата уноса в топку (состоящей из бункера и регулировочного немеханического вентиля).

На рис. 7 представлены схемы циркулирующего кипящего слоя [3]. Схема (а) с постоянным расходом возврата



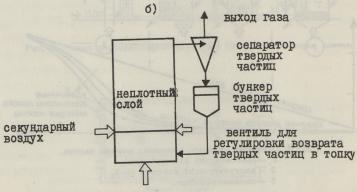


Рис. 7. Принципиальные схемы циркуляционного кипящего слоя а ~ с постоянным расходом возврата уноса, б - с изменяющимся расходом возврата уноса.

примарный воздух

(несгоревших частиц) в топочную камеру. Схема (б) с промежуточным бункером для несгоревших твердых частиц и с немеханическим так называемым L — вентилем для регулировки расхода возврата твердых несгоревших частиц в топку. Такая схема усложняет конструкцию агрегата, но облегчает автоматическое управление пусков и остановов. Высокая стабиль ность ЦКС обеспечивает работу котла на 25-30 % нагрузки котла от номинальной.

Топка котла с ЦКС обычно квадратного сечения с фронтовым расположением подачи топлива и более стройной по сравнению с традиционным кипящим слоем.

Общая схема ЦКС приведена на рис. 8 [5].

Технология ЦКС по мнению многих авторов способна заменить до сих пср используемую технологию традиционного кипящего слоя, особенно при повышенной требовательности к теплотехническим, эконогическим, экономическим показателям, а также регулировочным характеристикам котлоагрегата.

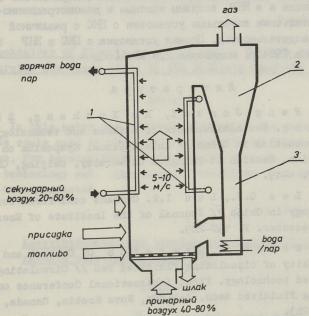


Рис. 8. Принципиальная схема циркулирующего кипищего слоя.
1 - экраны топки, 2 - улов уноса,

3 - возврат уноса.

По мнению многих авторов ЦКС имеет:

- более высокий к.п.д. по сравнению с традиционным кипящим слоем,
- способность сжигать большую гамму топлива (одновременно или отдельно без особых изменений в мощности и эффективности агрегата),
- хорошие регулировочные характеристики (работать при нагрузках до 25 % от номинального), хорошую маневренность,
- хорошие возможности для подавления $\rm SO_2$ и $\rm NO_X$ (применение присадок к топливу и низких температур $\rm 850-950~^{\circ}C$ в топке).

Особенно целесообразно ее применение при сжигании низкосортных топлив - торфа, бурых углей, лигнитов, а также различных производственных отходов (древесные отходы, отходы углеобогещения и др.).

Указанные преимущества сжигания в ЦКС вызвали большой интерес к этой технологии. В настоящее время в ряде стран, в том числе и в КНР, созданы опытные и демонстрационно-исследовательские котельные установки с ЦКС с различной паропроизводительностью. Первая установка с ЦКС в КНР была создана в 1984 г. мощностью 2,8 МВт [6].

Литература

- 1. Feng Junkai, Xu Xuchang, Zhou Lixing. New achievements of science and technology of coal combustion in China // International Symposium on coal Combustion. Session I: Tsinghua University, Beijing, China, 1987. P. 4-19.
- 2. Lee G.K., Lau I.T. Current coal-fired boiler technology in China // Journal of the Institute of Energy. 1985, December. P. 197-209.
- 3. K o b r o H., B r e r e t c n C. Control and fuel flexibility of circulating fluidized bed // Circulating fluidized bed technology. First International Conference on Circulating Fluidized Beds. Halifax, Nova Scotia, Canada, 1985. P. 263-283.

4. Hirsch M., Janssen K., Serbent H. The circulating fluidized bed as reactor for chemical and metallurgical processes // Circulating fluidized bed technology. First International Conference on Circulating Fluidized Beds. Halifax, Nova Scotia, Canada, 1985. P. 329-338.

5. Kullendorff A., Andersson S. A general review on combustion in circulating fluidized beds // Circulating fluidized bed technology. First International Conference on Circulating Fluidized Beds. Halifax, Nova Scotia, Canada, 1985. P. 83-97.

6. Wang Ta-san, Zhang Yafu, Pan Zhonggang, Ren Aifang, Yian Guiz-hang, Jiang Hongan. On fluidized bed combustion and on experimental 2,8 MW circulating fluidized bed combustor // International Symposium on Coal Combustion. Session II. Tsinghua University, Beijing, China, 1987.

A. Paist

Technology of Fluidized Bed Combustion Boilers for Burning Low Grade Coals in the People's Republic of China

Abstract

In this paper the characterization of the main low grade coals used in the People's Republic of China has been given. For burning these coals the use of both bubbling bed technology and circulating fluidized bed technology has been presented.

A. Paist

Keevkihttehnoloogia kasutamine madalasordiliste kutuste põletamisel Hiina RV-s

Kokkuvõte

Iseloomustatakse üldjoontes Hiina RV-s kasutatavaid kütuseid. Kirjeldatakse nii traditsioonilise keevkihttehnoloogia kasutamist nende kütuste põletamisel kui ka uue
tsirkuleeriva keevkihttehnoloogia kasutamise üldprintsiipe.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJIJ TALJUHCKOFO HOJUTEXHUYECKOFO NHCTUTYTA

УДК 621.182

К.И. Ингерманн, А.Э. Сийрде

К РАСЧЕТУ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКАХ КОТЛОВ

Обозначения

d - - степень черноты тепки;

степень черноты факела;

Чср - средний коэффициент тепловой эффективности экранов;

О к - приведенная степень черноты топочной камеры;

дл - степень черноты лучевоспринимающей поверхности;

d np - приведенная степень черноты;

а,, а 2 - степени черноти тел, участвующих в теплообмене;

степень экранирования;

Q _{ст} - степень черноты стенок топочной камеры;

Тст - эффективная температура стенок топочной камеры;

Тф - эффективная температура факела;

о - коэффициент излучения абсолютно черного тела;

 q, р результирующий (воспринятый) тепловой поток топочных экранов;

Финан - падающий на экраны тепловой поток;

фсоб - поток собственного излучения стенок топочной камеры;

- коэффициент сохранения тепла;

V_г - объем продуктов сгорания;

с средняя удельная теплоемкость предуктов сгорания;

F_{ст} - поверхность стенок топочной камеры;

T_u - адиабатическая температура горения;

¬¬ температура газов на выходе из топки, ОС;

м - топочный параметр;

 $\epsilon_{\text{т}}$ — приведенная степень черноты топочной камеры, рассчитанная по формулам (3) и (4);

Т_{3л} - эффективная температура натрубных золовых отложений, К;

 $T_{\tau}^{"}$ — температура газов на выходе из топки; К; H_{μ} — лучистая поверхность теплообмена топки;

х макс - относительное расположение максимума температур по высоте топки;

Н_{макс} - лучистая поверхность теплообмена топки, расположенная ниже зоны максимальных температур;

Во, - число Больцмана (видоизмененное).

Известно, что при сжигании многих видов твердого топлива топки паровых котлов подвергаются интенсивному загрязнению золовыми отложениями. В действующих нормах теплового расчета паровых котлов [1] загрязнение учитывается введением в расчетную формулу т.н. коэффициента тепловой эффективности экранов Ψ_{Cp} , значения которого при загрязнении экранов золовыми отложениями принимаются соответствующим образом ниже значений, рекомендуемых для топок сжигающих незагрязняющие топочные экраны виды топлива. При этом коэффициент Ψ_{Cp} вводится в расчетное число Больцмана и в степень черноты топки Q_T .

Введение коэффициента тепловой эффективности экранов Чер в степень черноты топки от на наш взгляд является в теоретическом плане необоснованным. В действующих в настоящее время нормах теплового расчета паровых котлов степень черноты камерной топки определяется по формуле:

$$a_{\tau} = \frac{a_{\phi}}{a_{\phi} + (1 - a_{\phi}) \psi_{c\phi}}.$$
 (I)

В ранее действующих нормах теплового расчета паревых котлов [2] степень черноты камерной топки определялась по формуле:

$$a_{T} = \frac{0.82 a_{\phi}}{a_{\phi} + (1 - a_{\phi}) \psi_{cp}}$$
 (2)

Действующие в настоящее время нормы теплового расчета паровых котлов приводят в качестве альтернативного варианта метод расчета ВТИ-ЭНИНа, при котором приведенная степень черноты топочной камеры $q_{\rm K}$ определяется по формуле (при $\gg 0.8$):

$$\alpha_{K} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Lambda}} + \chi_{0}\left(\frac{1}{\alpha_{\Phi}} - 1\right)}$$
 (3)

формула (3) является варшантом общензвестной формулы приведенной степени черноты с пр, применяемой при расчете теплообмена излучением между двумя серыми излучателями, один из которых располагается внутри другого:

$$a_{np} = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} - 1} . \tag{4}$$

Очевидне, формулы (1), (2) и (3) не являются равноценными. При сжигании сланцев в мощных котлях степень черноти факела \mathbf{q}_{ϕ} стремится к единице. При этом при расчете \mathbf{q}_{τ} по формуле (1) она так же стремится к единице, а при расчете по формуле (2) она стремится к значению 0,82. Если рассчитать приведенную степень черноты факела по формулам (3) и (4), то при условии $\mathbf{q}_{\phi} \rightarrow \mathbf{I}$ получаем $\mathbf{q}_{\kappa} \rightarrow \mathbf{q}_{\Lambda}$ и $\mathbf{q}_{\eta p} \rightarrow \mathbf{q}_{2}$, т.е. приведенная степень черноты топки стремится к степени черноты тепловоспринимающей поверхности нагрева. Формула (2) дает при $\mathbf{q}_{\phi} \rightarrow \mathbf{I}$ результат, совпадающий с результатом расчета по формулам (3) и (4) при условии равенства степени черноты тепловоспринимающей поверхности значению 0,82, а формула (1) при значении 1,0.

Основные теоретические положения нормативного метода расчета топок котлов были разработаны в 50-ме и 60-ме годи А.М. Гурвичем, В.В. Митором, А.Г. Блохом и другими советскими учеными. В последующие годы методика расчета топок уточнялась, но основные положения были сохранены. При этом формула (I) выведена из более общей формулы (см. [3]):

$$q_{T} = \frac{q_{\phi} + q_{cT}(1 + q_{\phi})(\frac{T_{cT}}{T_{\phi}})}{1 - (1 - q_{cT})(1 - q_{\phi})}$$
 (5)

подстановкой

$$\left(\frac{T_{cT}}{T_{\phi}}\right)^4 = a_T \left(1 - \frac{\psi}{a_{cT}}\right), \tag{6}$$

Здесь следует заметить то, что в формулу определения степени чернети топки G_{T} (формула (5)) входят, как и следовало ожидать, степени черноти факела (G_{Q}) и теплоприемника (G_{CT}), однако в эту же формулу входит также отношение эффективных температур излучателя (факела) и теплоприемника в четвертой степени, что в теоретическом плане необосновано.

В.В. Митор и А.М. Гурвич [3, 4] указывают на возможность вывода формулы (1) из общеизвестной формулы:

$$q_{p} = \frac{\sigma_{e}(T_{\phi}^{4} - T_{eT}^{4})}{\frac{1}{a_{\phi}} + \frac{1}{a_{cT}} - 1}$$
(7)

путем исключения Тст, т.е. вводом коэффициента тепловой эффективности топки . Такое же утверждение встречается в работах А.Г. Блоха [5, 6]. Однако при этом следует заметить то, что выражению (7) соответствует приведенная степень черноты топки по формуле (4), которая дает результат, отличающийся от результата расчета по фермуле (I). Так, мер, при расчете теплообмена в топке пылесланцевого TII-IOI получается $d_{\bullet} = 0.98$ и расчет d_{\mp} по формуле при $\Psi_{cp} = 0,2-0,4$ дает $q_T = 0,99-1,00$, а расчет q_T формуле (4) дает результат $d_{\tau} = 0.72$ (при $d_{c\tau} = 0.73$). Таким образом, при вводе коэффициента тепловой эффективности Чсь в формулу расчета приведенной степени черноты топки с численных значениях происходит скачок, который в теоретическом плане является необоснованным. Нетрудно доказать то, что при этом деформируется также понятие эффективной температуры факела.

Поскольку за годы, прошедшие со времени издания действующего в настоящее время нормативного метода теплового расчета паровых котлов, накоплен общирный экспериментальный материал по теплообмену в топках паровых котлов, в том чиоле и по излучательным свойствам натрубных отложений, то целесообразно \mathbf{q}_{T} рассчитывать по формулам (3) и (4), которме в теоретическом плане являются более оправданными.

Формула (6) выведена в [3, 4] при существенном упрощении законов лучистого теплообмена между двумя средами, участвующими в теплообмене. Так, падающий на экраны поток излучения определяется по выражению:

$$q_{\text{mag}} = \sigma_0 a_{\tau} T_{\phi}^4,$$
 (8)

а поток собственного излучения экранов:

$$q_{co\delta} = \sigma_o q_{c\tau} T_{c\tau}^4 . \tag{9}$$

Это позволяет простым образом найти результирующий поток

и вывести формулу для определения коэффициента тепловой эффективности экранов

$$\Psi = \frac{q_{pp}}{q_{rnag}} = \frac{a_{cT}q_{rnag} - q_{co\delta}}{q_{rnag}} = a_{cT} - \frac{a_{cT}}{a_{T}} \left(\frac{T_{cT}}{T_{\phi}}\right)^{4}.$$
 (10)

Из формулы (I0) найдено выражение (6), которое позволило преобразовать формулы (5) с получением формулы (I). При этом важным является следующее. Определение падающего на топочные экраны лучистого потока по формуле (8) является существенным искажением законов лучистого теплообмена. На самом деле падающий на экраны лучистый поток необходимо определить с учетом излучения экранов топочной камеры. Часть этого излучения через факел или поток газов попадает обратно на экраны:

$$q_{maq} = \sigma_0 a_{\phi} T_{\phi}^4 + (1 - a_{\phi}) q_{cT}, \qquad (II)$$

а эффективный поток излучения экранов в топочное пространство определяется по формуле:

$$q_{\text{vet}} = \sigma_0 q_{\text{er}} T_{\text{ct}}^4 + (1 - q_{\text{ct}}) q_{\text{rag}}.$$
 (12)

При совместном решении уравнений (II) и (I2) получаем:

$$q_{\text{mag}} = \frac{\sigma_0 \left[a_{\phi} T_{\phi}^4 + a_{\text{cT}} (1 - a_{\phi}) T_{\text{cT}}^4 \right]}{1 - (1 - a_{cT}) (1 - a_{\phi})}$$
(I3)

N

$$q_{c\tau} = \frac{\sigma_0 [a_{c\tau} T_{c\tau}^4 + a_{\phi} (1 - a_{c\tau}) T_{\phi}^4]}{1 - (1 - a_{c\tau}) (1 - a_{\phi})} . \tag{14}$$

Последние формулы позволяют найти выражение для определения коэффициента тепловой эффективности экранов:

$$\Psi = 1 - \frac{q_{cT}}{q_{nag}} = 1 - \frac{a_{cT}T_{cT}^4 + a_{\phi}(1 - a_{cT})T_{cT}^4}{a_{\phi}T_{\phi}^4 + a_{cT}(1 - a_{\phi})T_{cT}^4}.$$
 (15)

Формула (I5) идентична с формулой, выведенной А.Г. Блохом [5]:

 $\Psi = \frac{a_{\phi}a_{cT}(T_{\phi}^4 - T_{cT}^4)}{a_{\phi}T_{\phi}^4 + (1 - a_{\phi})a_{cT}T_{cT}^4}.$ (16)

Если воспринятый топочными экранами тепловой поток рассчитать по выражению $q_p = \psi q_{mag}$, то приходим к формуле (7), что подтверждает правомерность расчета приведенной степени черноты камерной топки по формулам (3) и (4).

Такой подход к определению эффективных потоков q_{nag} и q_{cт} позволяет вывести новую формулу для определения отношения эффективных температур слоя натрубных стложений и факка в четвертой степени (сравните с формулой (6)):

$$\frac{T_{3n}}{T_{\phi}} = \frac{a_{\phi}a_{3n} - \Psi a_{\phi}}{\Psi a_{3n}(1 - a_{\phi}) + a_{\phi}a_{3n}}.$$
 (17)

Коэффициент тепловой эффективности экранов Ψ_{cp} при разработке методики теплового расчета котлов первоначально ввелся как отношение воспринятого экранами и падающего на экраны дучистых потоков. К сожалению, понятие Ψ_{cp} в течение последующих лет деформировалось ввиду значительных затруднений определения коэффициента Ψ_{cp} . Значения коэффициентов тепловой эффективности экранов можно определить разными способами. Очевидно, наиболее правомерным является определение Ψ_{cp} на основе прямых измерений падающих и обратных или падающих и воспринятых тепловых потоков топочных экранов [7, 3], однако этот способ весьма затруднен ввиду большого объема экспериментальных работ, необходимых для определения локальных значений падающих и воспринятых тепловых потоков.

Большая работа по расчетному определению локальных значений Ψ выполнена К.С. Адзерихо, Е.Ф. Ноготовым и В.П. Трофимовым [8]. Однако рассчитанные ими для разных температурных профилей значения Ψ пока трудно увязать с реальными условиями лучистого теплообмена в топках паровых котлов.

Одной из возможностей определения ψ_{cp} по данным испытания котлов является расчет ψ_{cp} из полуэмпирической формулы, приведенной в [I] для расчета температуры газов на выходе из камерных топок. Решение этого уравнения относительно ψ_{cp} дает результат:

$$\Psi_{cp} = \frac{\varphi B_p V_r c_{cp}}{\sigma_0 F_{c\tau} a_{\tau} T_0^3} \left[\left(\frac{T_q}{\Theta_{\tau}'' + 273} - 1 \right) \frac{1}{M} \right]^{\frac{1}{0.6}}.$$
 (I8)

Формула (18) широко использовалась нами при обработке результатов балансовых испытаний котлов, проведенных с целью выяснения эффективности водяной очистки топок, работающих на прибалтийских сланцах и на канско-ачинских углях. Однако найденное по формуле (18) значение уср может не со-

ответствовать простому физическому смыслу введенного в 50-е годы в тепловой расчет топок коэффициета тепловой эффективности экранов. Результат расчета $\psi_{\rm cp}$ по формуле (18) во многом зависит от точности расчета степени черноты топки, от точности определения эмпирического топочного параметра м и от других факторов. Поэтому на стадии разработки новых норм теплового расчета паровых котлов определение $\psi_{\rm cp}$ по формуле (18) на наш взгляд является недопустимым. Это подтверждается неодинаковыми значениями $\psi_{\rm cp}$, найденными при испытании паровых котлов по формуле (18) и путем измерения падающего и воспринятого теплового потоков [9, 10].

Нами сделана попытка обработки экспериментальных данных по теплообмену в топках пылесланцевых котлов, в которых, как известно, происходит интенсивное загрязнение настенных поверхностей нагрева, по одномерной модели, позволяющей рассчитать и средние коэффициенты тепловой эффективности.

Исходное уравнение теплообмена в топке напишем в дифференциальной форме:

$$-BV_{r}c_{cp}dT = \sigma_{0}E_{\tau}(T^{4}-T_{3h}^{4})dH$$
 (I9)

или после разделения переменных:

$$\frac{dT}{T^4 - T_{3n}^4} = \frac{\sigma_0 \varepsilon_T}{B V_T c_{cp}} dH. \qquad (20)$$

и Интегрируя уравнение (20) по температуре от $T_{\text{мскс}}$ до $T_{\text{т}}$ и по поверхности нагрева от 0 до $H_{\text{л}}-H_{\text{мскс}}$, приходим после некоторых преобразований к выражению следующего вида:

где
$$e \times p \left(\frac{4 \, \varepsilon_T \left(1 - \times_{\text{макс}} \right)}{B_0^*} \right) = A_1 A_2, \tag{2I}$$

$$A_{1} = \frac{T_{\text{Makc}} - T_{3h}}{T_{\text{Makc}} + T_{3h}} \exp \left[2 \operatorname{arctg} \left(\frac{T_{\text{Makc}}}{T_{3h}} \right) \right]$$
 (22)

И

$$A_{2} = \frac{T_{T}^{"} + T_{3h}}{T_{T}^{"} - T_{3h}} \exp \left[-2 \operatorname{arctg} \left(\frac{T_{T}^{"}}{T_{3h}}\right)\right]. \tag{23}$$

Такой подход к расчету теплообмена в топке котла известен из работ А.Г. Блоха [6], однако в отличие от работ А.Г. Блоха мы не отпускали при интегрировании уравнения (20) среднюю температуру золовых отложений в четвертой степени, т.к. при сильном загрязнении топки температура золовых отложений является соизмеримой со средней температурой излучателя, т.е. факела и потока продуктов сгорания.

В число Больцмана B_0^* в данном случае входит средняя температура золовых отложений в третьей степени:

$$B_0^* = \frac{\varphi B_p V_r C_{cp}}{\sigma_0 H_A T_{3A}^3} \cdot \tag{24}$$
 При испытании паровых котлов $T_r^{"}$ определяется на ос-

При испытании паровых котлов $T_{\tau}^{"}$ определяется на основании непосредственных измерений или балансовых расчетов, а эффективная температура натрубных отложений $T_{3,n}$ может быть определена из уравнения (2I) методом повторных приближений.

Если переписать уравнение (I9) относительно конечной разности температур, то имеем:

$$BV_{rc_{cp}}(T_{q}-T_{T}'') = \sigma_{o} \delta_{T}(T_{\phi}^{4}-T_{3}^{4}) H_{A},$$
 (25)

а из этого может быть рассчитана эффективная температура факела T_{φ} . Такой подход к определению эффективных температур факела T_{φ} и натрубных отложений T_{3^h} позволяет рассчитать коэффициент тепловой эффективности экранов по формуле (15).

Приведенные нами расчеты показали применимость такой одномерной модели к обработке опытных данных по теплообмену в топках пылесланцевых котлов. При этом максимальная температура излучателя $T_{\text{мокс}}$ определялась по адиабатной температуре $T_{\text{с}}$ путем ввода множителя К (от 0,94 до 0,98). Знание эффективной температуры натрубных отложений позволяет также рассчитать среднее тепловое сопротивление слоя натрубных отложений.

Обработка опытных данных по теплообмену в топках пылесланцевых котлов TII-67 и TII-IOI по указанной одномерной медели дает значения коэффициентов тепловой эффективности экранов ψ_{cp} в пределах 0,45-0,55, что коррелируется с результатами прямых измерений. В то же время расчет ψ_{cp} по формуле (I8) согласно действующим нормам теплового расчета котлов дает более низкие значения ψ_{cp} (порядка 0,2-0,3). Следовательно, при разработке новых норм теплового расчета

паровых котлов на определение обоснованных значений коэффициентов тепловой эффективности следует обратить серьезное внимание.

Характерным результатом проведенных нами расчетов является относительно низкое значение расчетной эффективной температуры факела. Это, очевидно, вызвано эффектом экранирования излучения горячих областей газов более холодны ми пристенными слоями газов [8, II].

Основные выводы

- I. В условиях загрязнения топочной камеры котлов зеловыми отложениями нельзя отпускать при расчете лучистого теплообмена теплоприемник, т.е. нельзя учитывать наличие теплоприемника только одним коэффициентом эффективности экранов, который в реальности зависит как от параметров теплоприемника (σ_{cr} , σ_{cr}), так и от параметров факела (σ_{cr} , σ_{cr}).
- 2. Методика расчета топок ВТИ-ЭНИН соответствует в большей мере реальным условиям теплообмена в топке, чем методика ЦКТИ, поэтому при разработке новых норм теплового расчета котлов желательно принять методику ВТИ-ЭНИН как основную методику расчета топок котлов.
- 3. В методике ЦКТИ расчета топок котлов наобходимо пересмотреть порядок расчета степени черноты топочной камеры G_{τ} , а также необходимо откорректировать значения коэффициентов тепловой эффективности экранов, оказав максимальное внимание на способы определения ψ_{cp} , не зависящие от эмпирических коэффициентов действующих в настоящее время норм теплового расчета котлов.

Литература

- I. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. 296 с.
- 2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. А.М. Гурвича и Н.В. Кузнецова. Госэнерго-издат, 1957. 232 с.
- 3. М и т о р В.В. Теплообмен в топках паровых котлов. М.-Л.: Гос. изд-во науч.-техн. машиностроит. литературы. 1963. 180 с.

- 4. Гурвич А.М., Митор В.В. Излучательная способность топочных устройств // Теплоэнергетика. 1960. № II. C. 66-69.
- 5. Блох А.Г. Теплообмен в топках тепловых котлов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение. 1984. 240 с.
- 6. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия, 1967. 325 с.
- 7. Геллер З.И. Тепловая эффективность экранных повержностей нагрева при сжигании жидких топлив // Энергомашиностроение. 1959. № 6. С. 13-18.
- 8. Адзерико К.С., Ноготов Е.Ф., Трофимов В.П. Радиационный теплообмен в двужфазных средах. Минск: Наука и техника. 1987. 166 с.
- 9. 0 т с А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. М.: Энергия. 312 с.
- IO. Отс А.А., Сууркууск Т.Н., Ингерман н К.И. и др. Тепловая эффективность топки парового котла сверхкритических параметров в условиях водяной очистки экранов СРЧ при сжигании назаровского угля // Теплоэнергетика. 1981. № 5. С. 34-36.
- II. Б л о х А.Г., А д з е р и х о К.С., Т р о ф и м о в В.П., Л о ж е ч н и к Ф.Д. Аналитическое представление эффективной температуры для расчетов теплообмена излучением // Теплоэнергетика. 1980. \aleph 2. С. 52-57.

Calculating Heat Exchange in Boiler Furnaces

Abstract

This paper deals with calculating heat exchange in boiler furnaces. Special attention has been paid to the calculation of furnace screen radiant efficiency factor depending on both the emissivity and temperature of screen tubes and flame. The one-dimensional flow model of gases is used for calculating the above-mentioned furnace screen radiant efficiency factor.

K. Ingermann, A. Siirde

Soojusulekande arvutusest katla koldes

Kokkuvõte

Artiklis kasitletakse soojusvahetust katelde kolletes, eriti aga kolde efektiivsusteguri maaramist sõltuvana leegi ja koldeekraanide kiirgustegurist ning temperatuurist. Samuti kirjeldatakse gaaside ühedimensioonilise voolamise mudeli kasutamist kolde efektiivsusteguri maaramiseks.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TAJJINHCKOFO NOJINTEXHNYECKOFO NHCTITTYTA

УДК 536.2:62-791.2

И.Р. Вийльманн, Т.Б. Тийкма

НЕКОТОРЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ И ОКАЛИНЫ

В целях успешного использования математического моделирования для исследования работы термических печей и других установок термообработки сталей в машиностроении необходимы по возможности точные сведения по теплофизическим и радиационным характеристикам реальных поверхностей металла, обрабатываемого в этих агрегатах. Понятие "реальная поверхность" введено здесь в связи с тем, что при термообработке поверхность стали окисляется, возможны также изменения кристаллической структуре металла около его наружной верхности. Изменения в кристаллической структуре также связаны со способом его получения (выплавки). Существенную роль в формировании свойств поверхности металла играет естественно его механическая обработка перед термообработкой. При высоких температурах (особенно при нагреве металла под ковку) образуется на поверхности стали слой окалины, который составляет уже заметное термическое сопротивление. Вышесказанное подтверждает необходимость исследовать свойства поверхности нагреваемых сталей в условиях, близких к условиям их термообработки в промышленности.

Авторами разработана опытная установка для исследования динамики изменения нормальной спектральной и интегральной степени черноты сталей в ходе процесса их нагрева в среде продуктов сгорания газа [I]. В [I] дано описание установки в варианте измерения спектральной степени черноты. Интегральную степень черноты измеряют на этой же установке без монохроматора с тем же датчиком теплового потока.

Ниже приведены некоторые результаты исследования радиационных характеристик углеродистых и среднелегированных сталей. Опыты проведены на установке [I] со скоростью нагрева

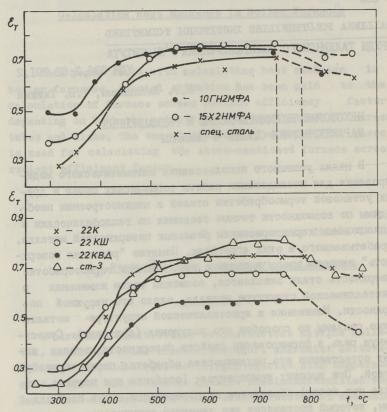


Рис. 1. Изменение интегральной нормальной степени черноты сталей в процессе их нагрева в продуктах сгорания газа.

На рис. І приведены результаты определения интегральной нормальной степени черноты углеродистых котельных сталей и среднелегированных сталей. Сплошные кривые прерваны при температуре начала отслаивания окисной пленки с образца. Поскольку степень черноты определяется радиационным методом, то при отслаивании окисной пленки ввиду резкого повышения термического сопротивления показания датчика и измеренные в теле образца термопарой температуры не позволяют вычислять истинную степень черноты по закону Стефана-Больцмана.

Как и следовало ожидать, самую высокую степень черноты приобретает нелегированная углеродистая сталь ст-3. Инте-

ресным является динамика изменения степени черноты котельных сталей 22К, 22КШ и 22КВД, которые идентичны по химическому составу, но отличаются по методу их выплавки. Следует отметить, что сталь 22КШ получают при помощи электрошлаковогс переплава, а 22КВД вакуумнодуговым методом. Ввиду этого кристаллическая структура этих сталей различная и при одинаковых условиях окисления степень черноты этих образцов неодинаковая. При этом с увеличением энергетического уровня (температуры) выплавки степень черноты этих сталей уменьшается.

Температура образования непрозрачного слоя окиси для всех исследованных в данной работе сталей одинаковая – на уровне $450\,^{\circ}\mathrm{C}_{\circ}$

Высокая начальная степень черноты стали $IOIH2M\Phi A$ обусловлена большей шероховатостью поверхности образца. Как у этой стали, так и у стали $I5X2HM\Phi A$ окисная пленка стабилизируется, т.е. становится полностью непрозрачной при температуре около 550 $^{\circ}$ C.

Исследование нормальной спектральной степени черноты (см. рис. 2) всех названных выше сталей кроме ст-3 показало, что с ростом окисной пленки и ее становлением непрозрачной образцы теряют свою селективность. Спектральная степень черноты сталей при температуре ниже начала интенсивного окисления увеличивается с уменьшением длины волны, что свойственно для чистых металлических поверхностей.

Приведенные результаты по исследованию радиационных характеристик окисленных сталей указывают на необходимость учета конкретных условий окисления при использовании данных по их радиационным характеристикам для точных расчетов теплообмена и температурных полей в нагреваемом металле.

Теплофизические свойства окалины, полученной из кузнечного цеха ПО "Ижорский завод" определены на стандартных лабораторных установках ИТ- λ -400 и ИТ-с-400 [2], принцип работы которых основывается на методе монотонного нагрева.

В качестве образцов для исследования коэффициента теплопроводности на установке ИТ- λ -400 используют таблетки диаметром I5 \pm 0,3 мм и толщиной 0,5-5 мм. Коэффициент теп-

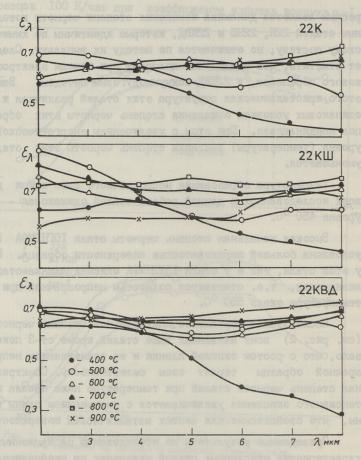


Рис. 2. Изменение спектральной степени черноты сталей типа 22K в процессе их нагрева в продуктах сгорания газа,

лопроводности определен на 4 образцах толщиной 4,7 мм, выточенных из кусков окалины. Результаты приведены на рис. 3. Незначительный разброс точек можно объяснить различной пористостью отдельных образцов, а также погрешностью прибора, которая составляет ± 10 %. Характерным является понижение коэффициента теплопроводности с повышением температуры. Как известно, основными составляющими окалины являются гематит Fe_2O_3 и магнетит Fe_3O_4 , теплопроводность которых подробно исследована в C31, где при $400\,^{\circ}\text{C}$ получено для Fe_2O_3

 $\lambda=4,0$ Вт/(м.К) и для ${\rm Fe_3O_4}$ $\lambda=2,0$ Вт/(м.К). Полученные нами значения для окалины при $400^{\rm o}$ лежат на уревне 2,6 – 2,8 Вт/(м.К), что является косвенным свидетельством о достоверности полученных результатов по измерению коэффициента теплопроводности окалины,

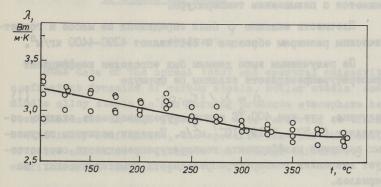


Рис. 3. Коэффициент теплопроводности окалины.

Коэффициент удельной теплоемкости С_р окалины определен на установке ИТ-с-400, образцы для которой должны иметь толщину ІО мм. Ввиду меньшей толщины исходного слоя окалины, чем требуется в установке, образец был собран из двух или трех слоев окалины общей телщиной ІО мм. При этом контактирующие поверхности этих слоев были отшлифованы с целью достижения плоскопараллельности отдельных таблеток, составляющих образец. При определении теплоемкости дополнительное термическое сопротивление между слоями составного образца заметно не влияет на результаты измерения.

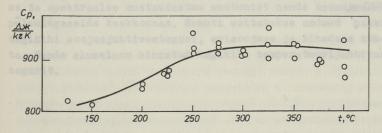


Рис. 4. Удельная теплоемкость окалины.

Результаты определения C_p приведены на рис. 4. Заметне девельне херешее севпадение результатов измерения C_p на
трех различных упакевках слеев екалины. Как свействение
кристаллическим веществам, удельная тэплоемкесть екалины повышается с повышением температуры.

Плетнесть екалины ρ была епределена по массе и геометряческим размерам образцев и сеставляет 4390—4400 кг/м 3 .

По полученным выше данным был определен коэффициент температуропроводности экалины пе формуле

$$a = \lambda / (C_p \cdot \rho). \tag{I}$$

Получено, что при 400 °C температуропроводность окалины составляет $(6,57...7,19)\cdot 10^{-7}$ м $^2/с$. Порядок величины полученных значений коэффициента температуропроводности соответствует значениям температуропроводности неметаллических материалов.

Литература

- І. В и й л ь м а и н И.Р., Т и й к м а Т.Б. Лабератерная установка для исследования динамики изменения спектральной степени черноты сталей в ходе их нагрева // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 654. С. 85-91.
- 2. Теплофизические измерения и приборы // Е.С. Платунов, С.Е. Буровой, В.В. Курелин, Г.С. Петров / Под общ.ред. Е.С. Платунова. - Л.: Мешиностроение, 1986. 256 с.
- 3. Внутритрубные образования в паровых котлах сверхкритического давления // В.П. Глебов, Н.Б. Эскин, В.М. Трубачев, В.А. Таратута, Х.А. Клар. М.: Энергоатомиздат, 1983. 240 с.

Some Thermophysical and Radiative Properties of Steels and Scale

Abstract

Some data of the normal total and spectral emissivity coefficient dynamics of carbon steels, boiler steels and middle alloy steels in gas burning products atmosphere have been presented in this paper. The data referring to thermal conductivity coefficient, the specific heat and the density of scale enable us to estimate the thermal diffusivity coefficient of the scale.

I. Viilmann, T. Tiikma

Teraste ja tagi mõningad soojusfuusikalised ja kiirgusomadused

Kokkuvõte

Artiklis iseloomustatakse mõningate süsinikteraste, katlateraste ja kesklegeeritud teraste normaalse integraalse ja spektraalse mustsusastme muutumist nende kuumutamisel põlemisgaaside keskkonnas. Samuti esitatakse andmed paksu tagikihi soojusjuhtivusteguri, erisoojuse ja tiheduse kohta. Nende alusel on hinnatud tagikihi temperatuurijuhtivustegurit.

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.182

А.А. Отс, Х.И. Таллермо, Я.П. Лайд, Р.Э. Рандманн, А.Э. Сийрде, Я.Б. Абрам, Э.М. Сийг

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ВТОРИЧНОГО ПАРОПЕРЕТРЕВАТЕЛЯ
ПЫЛЕСЛАНЦЕВОГО КОТЛА ТП-101

Высокая (более 40 %) зольность сланцев и большая склонность сланцевой золы к интенсивному загрязнению и коррозии поверхностей нагрева служат причиной того, что даже специальные котлоагрегаты, созданные в пятидесятыхшестидесятых годах для сжигания эстонских сланцев (TII-I7, TII-67 и TII-IOI), работают ненадежно. Более интенсивному износу подвержены высокотемпературные участки пароперегревателей. Например, по данным "Эстонэнергоремонта" объем по замене изношенных труб в пароперегревателях одного корпуса котла ТП-101 превышает регламентированный Минэнерго СССР объем более, чем в шестъдесят раз. Одной из причин интенсивного износа труб (особенно вторичного пароперегревателя) помимо ускоряющего цействия средств очистки, является повышенная температура металла из-за неудачной вторичного пароперегревателя. Интенсивнее всего изнашиваются выходные концы труб, крайних ширм I-й ступени ричного пароперегревателя. Описание котла ТП-101 привеле-HO B [I].

Для экспериментального определения температуры металла наружной поверхности наиболее поврежденных труб выходных ширм первой ступени вторичного пароперегревателя была применена с небольшими изменениями, методика, разработанная в ТПИ Я. Лайдом [2]. Конструкция температурной вставки приведена на рис. І. Температура наружной поверхности металла измерялась в 14 точках и записывалась непрерывно на приборе КСП-4. Места установки температурных

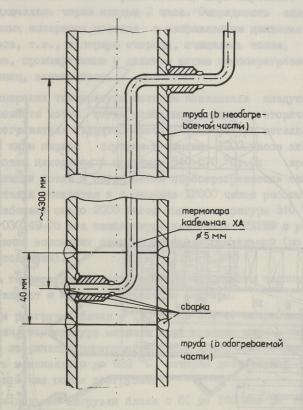
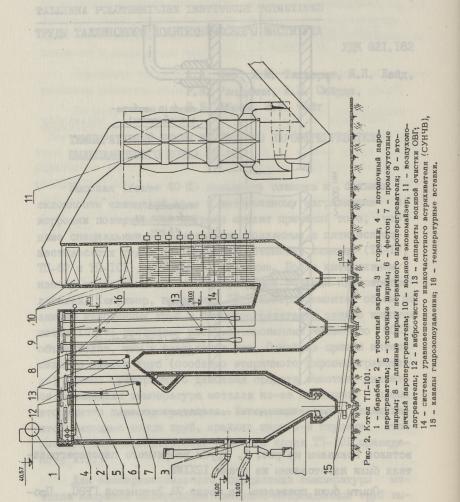


Рис. 1. Конструкция температурной вставки.

вставок показаны на рис. 2. Трубы вторичного пароперегревателя были изготовлены из стали I2XIMФ.

Опыты были проведены на котле 7A Эстонской ГРЭС. Продолжительность опытов была около 12000 часов и они охватили разные режимные факторы.

Во время опытов котел работал в условиях комбинированной очистки. Место расположения очистительных средств показано на рис. 2. Вторичный пароперегреватель очищался четырьмя обмывочными аппаратами типа ОВГ. Аппараты были снабжены четырехсопловыми головками. Верхние аппараты ОВГ вторичного пароперегревателя включались через каждые 168 час.,



а нижние аппараты через 336 часов. СУНЧВ (система уравновешенных низкочастотных вытряхивателей) ширм опускного газохода включалась через каждые 2 часа. Очередность включения обмывочных аппаратов совпала с направлением движения дымовых газов, т.е., в первую очередь, очищалась топка, затем топочные, промежуточные и длинные ширмы пароперегревателя, и, наконец, экономайзер.

Измерения температуры металла показывали следующее. После ремонта котла, когда поверхность нагрева вторичного пароперегревателя является чистой, температура металла труб крайних ширм первой ступени в течение 1000 часов эксплуатации котла находится в пределах 540-570 °C. Со времени эксплуатации котла и загрязнения пароперегревателя температура металла снижается и в течение 12000 часов работы котла трубы работают около 2000 часов выше температуры 540 °C. По РТМ-24.030.49-75 эта температура для стали 12XIMD в условиях сжигания эстонских сланцев является предельной (по коррозионностойкости).

На температурный режим металла вторичного пароперегревателя влияют и некоторые режимные факторы.

При разгрузке блока с 190 до 80 МВт со скоростью 4 МВт/мин, температура металла труб крайних ширм первой ступени вторичного пароперегревателя может кратковременно доходить максимально до 620 °C, которая достигается примерно через I час после разгрузки.

При подъеме нагрузки блока с 80 до $I60~MB\tau$ со скоростью 5 $MB\tau/мин$ при температуре первичного пара $535~^{\circ}C$ наблюдалось повышение температуры металла тех же труб вторичного пароперегревателя до $610~^{\circ}C$.

При работе котла на стабильном режиме разница между температурами наружной поверхности трубы и паром составляла 30-40 К, а при изменении нагрузки эта разница доходит до 70 К. Например, повышение температуры перегретого пара на выходе из первичного пароперегревателя с 510 до 530 °C вызывает подъем температуры металла первой ступени вторичного пароперегревателя до 590 °C.

На температуру металла этих труб оказывает влияние также последовательность включения аппаратов водяной очист-

ки пароперегревателя. При изменении песледовательнести очистки кетла — с длинных ширм в сторону топки — температура металла после обмывки ширм в опускном газоходе в зависимости от степени загрязнения пароперегревателя, от температуры первичного пара и нагрузки корпуса, может повышаться на 30-70 К, по сравнению с температурой металла загрязненного котла. Дальнейшая обмывка топочных и промежуточных ширм ведет к снижению температуры металла вторичного пароперегревателя. Увеличение температуры металла после обмывки ширм опускного газохода объясняется удалением слоя золовых отложений.

По опытным данным тепловое сопротивление отложений на вторичном пароперегревателе котла $T\Pi$ -IOI колеблется в пределах C,03-0,04 M^2 $K/B\tau$. По M.П. Эпику I3]коэффициент теплопроводности плотных золовых отложений на поверхностях нагрева пылесланцевых котлов колеблется в пределах 0,4 – I,65 ккал/м·ч·К (0,47 – I,92 $B\tau/$ м·К). Исходя из этих данных толщина отложений на вирмах вторичного пароперегревателя котла $T\Pi$ -IOI может составлять 20-80 мм.

Выводы:

- I. Температура труб выходных ширм первой ступени вторичного пароперегревателя котла TII-IOI, при определенных режимах работы котла, превышает рекомендуемую. Это является одной из основных причин интенсивного высокотемпературного износа этих труб.
- 2. Для устранения перегрева труб необходимо изменить схему вторичного пароперегревателя.

Литература

- I. От с А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. М.: Энергия, 1977. С. 312.
- 2. Лайд Я.П., Отс А.А., Рандманн Р.З., Суйк Х.Х. Полупромылленная опытная установка для исследования влияния температуры газов на интенсивность высокотемпературной коррозии при сжигании мазута // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1977. № 416. С. 131-139.

3. Эпик И.П. Влинние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Таллин: Эстгосиздат, 1961. 250 с.

A. Ots, H. Tallermo, R. Randmann, A. Siirde, J. Abram, E. Siig

Temperaturregime der Metalloberfläche des Zwischendampfüberhitzers für Dampferzeuger TP-101

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse über Heizflächentemperaturmessungen für den Zwischendampfüberhitzer des Dampferzeugers TP-101 vorgestellt.

TP-101 ist ein Staut-Ölschieferkessel mit einer Dampfleistung von 89 kg/s.

Für die Messung der Heizflächentemperatur ist ein besonderer Einsatz (Bild 1) verwendet worden. Die Anordnung der Meßanlagen ist in Fild 2 unter Pos. 16 gebracht.

Die Ergebnisse zeigen, daß während 2000 von 12000 Betriebstunden die Metalltemperatur höher war, als die für den Stahl 12X1MØ zulässige Temperatur 540 °C ist.

Die Metalltemperatur beeinflussen verschiedene Regiemfaktoren wie auch Reinigungsverfahren. A. Ots, H. Tallermo, J. Laid, R. Randmann, A. Siirde, J. Abram, E. Siig

Põlevkivikatla TP-101 auru-sekundaarulekuumendi kuttepinna temperatuurirežiim

Kokkuvote

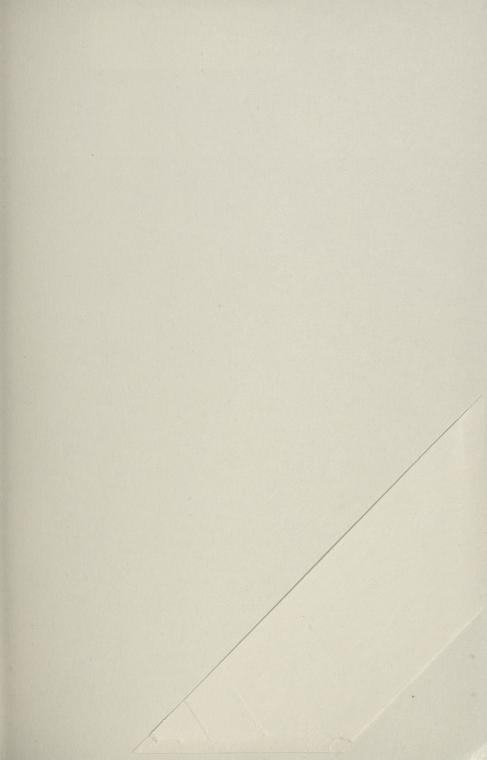
Kaesolevas artiklis esitatakse põlevkivikatla TP-101 auru-sekundaarulekuumendi metallpinna vahetu mõõtmise tu-lemused.

TP-101 on polevkivi tolmpoletamisega katel, mille aurutootlikkus on 89 kg/s.

Kuttepinna temperatuuri mõõtmiseks on kasutatud spetsiaalseid katsekehi (joon. 1), mis asetsevad sekundaarülekuumendi esimeses astmes ning on kujutatud joonisel 2 positsiooni 16 all.

Mõõtetulemused näitavad, et 12000 töötunni jooksul töötasid sekundaarülekuumendi äärmised sirmid 2000 tundi kõrgema temperatuuri juures kui 540 °C, mis on Eesti põlevkivil töötavate katelde lubatav piirtemperatuur.

Metalli temperatuurile avaldavad mõju nii mitmed režiimi faktorid kui ka puhastussüsteem.



Цена 1 руб.

