



ООО «ПроЭнергоМаш-Проект»
656905, Россия, Алтайский край,
г. Барнаул, Проезд Южный 17а
Тел/факс (385-2) 505-135; 505-576
E-mail pem-energo@list.ru

Дополнение к «Программе ..» в части «Освоение технологии ЦКС путём реконструкции и модернизации ТЭС»

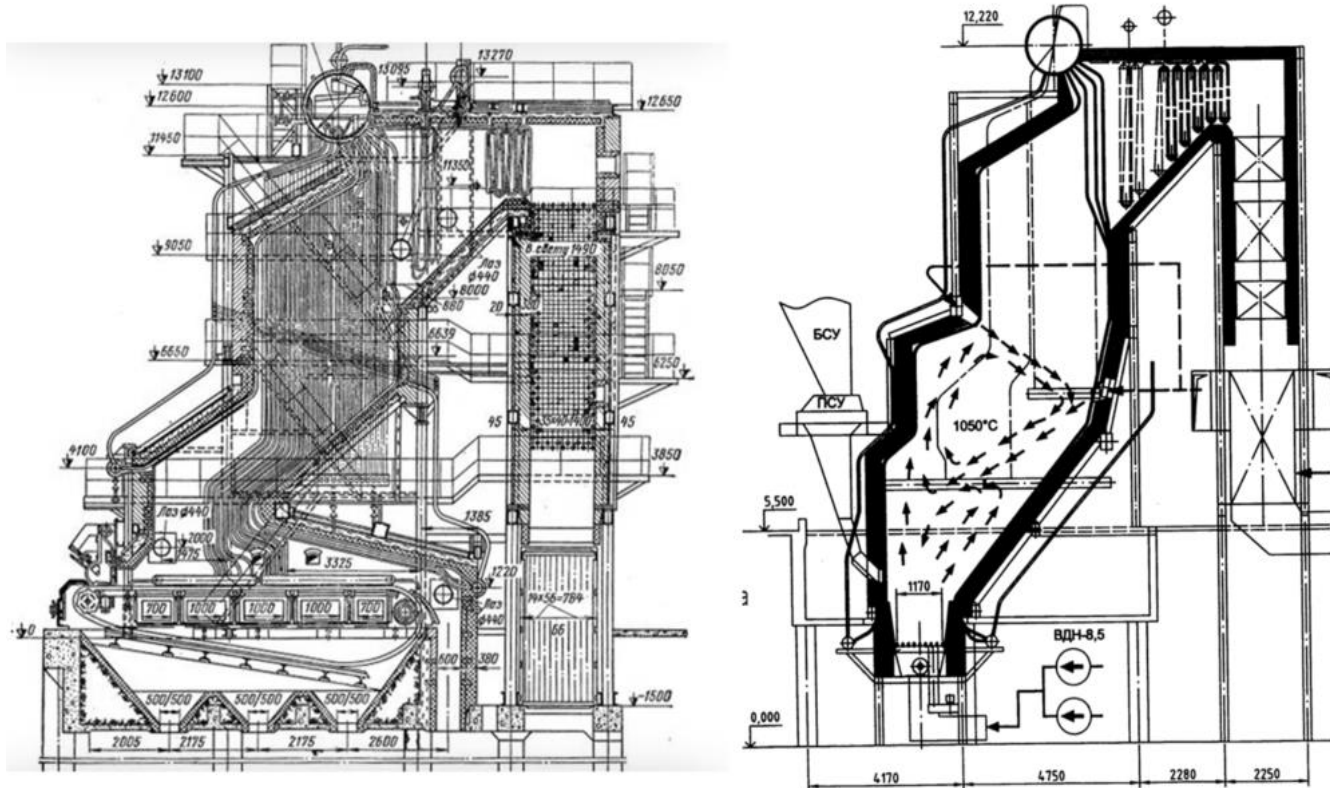
- ❖ У нас есть преимущество, можно выбрать пути освоения технологии ЦКС, опираясь на зарубежный опыт и анализ преодолённых ошибок.
- ❖ Осваивать ЦКС путём модернизации котлов, наш привычный путь, с минимумом затрат.

С.2 Обоснование ФНТКС как варианта технологии ЦКС на основе исследований

- **АлтГТУ, каф. «КиРС»** - Исследования выгорания углей в КС. Выявлен бимодальный закон формирования уноса. Теория. Выгорание в КС. Дополнение переносом частиц «Двухфазной модели КС». Защита дисс. - 5 соиск.
- **БиКЗ**. Организация сжигания углей на опытных котлах, режимно-наладочные и спец. испытания котлов с КС.
- **ООО «49 отдел «НПО ЦКТИ»**, г. Барнаул. Исследования по программам НПО ЦКТИ в котельной предприятия. Поток «Газ-частицы» в ЦКС и топочные процессы.
- **НИЦ ПО «Бийскэнергомаш»**. Разработка технологии ФКС. Модернизация и проекты новых котлов ФКС.
- **ООО «РК Системы»**. Модернизация котлов ФКС.
- **ООО «ПроЭнергоМаш-Проект»**. Выполнение проектов и разработка технологий организации сжигания в ЦКС.

С.3. Пример 1. Читинская ТЭЦ-2

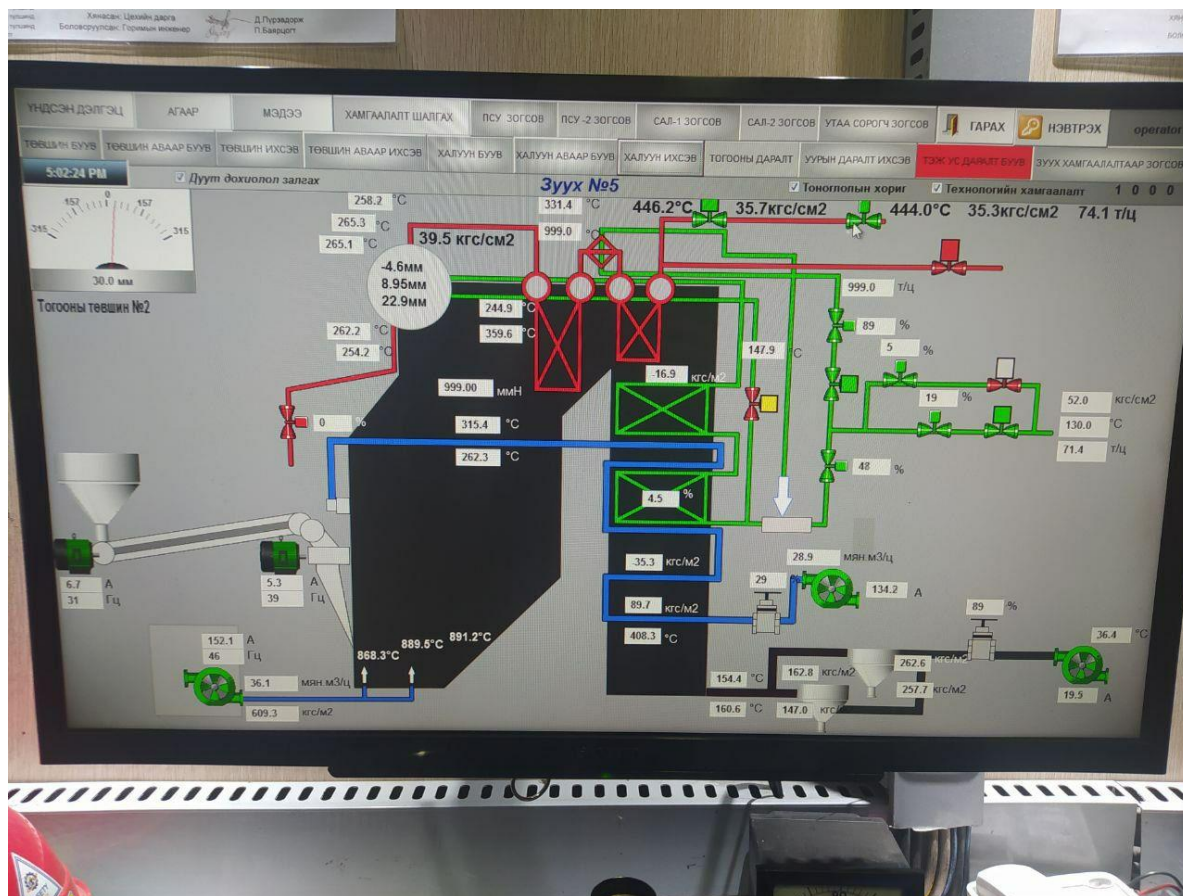
Реконструкция ТС-35 всех 6 слоевых котлов ТЭЦ на ТС-42ФНТКС



- Слойной энергетический котел исходный и после реконструкции на ФНТКС, 6 котлов. Форсировка КС до $q_R=7-12 \text{ МВт/м}^2$.
- Большой вынос циркулирующих частиц в над слоевой объём, дожигание недожога и удержание частиц с их возвратом в охлаждённом виде по наклонному экрану в донный КС.

С.4 Пример 2. Республика

Монголия. ТЭЦ-2 Улан-Батор, Котлы БКЗ-75, 5 шт



Щит АСУ ТП. Котел БКЗ-75 ТЭЦ-2 Улан-Батор.
Переведены все котлы ТЭЦ, 5+2=7шт.

C.5 Опыт промышленного применения ФНТКС

- Общее количество введенных в эксплуатацию котлов с топками ФНТКС за последние 15 лет составляет более 120 единиц на 93 объектах.
- Суммарная мощность котлов 1900 МВт.
- Котлы работают в паровом и водогрейном режимах. Производительность водогрейных котлов от 3 до 30 Гкал/час и паровых от 4 т/час до 75 т/час.
- Для Улан-Баторской ТЭЦ-4 выполняется проект реконструкции котла БКЗ-220.
- Топлива: кородревесные (КДО) и древесные отходы, шлак и зола слоевых котлов, местные угли и др.
- Их утилизация важна для текущих условий в России.

С.6 Зелёные тарифы

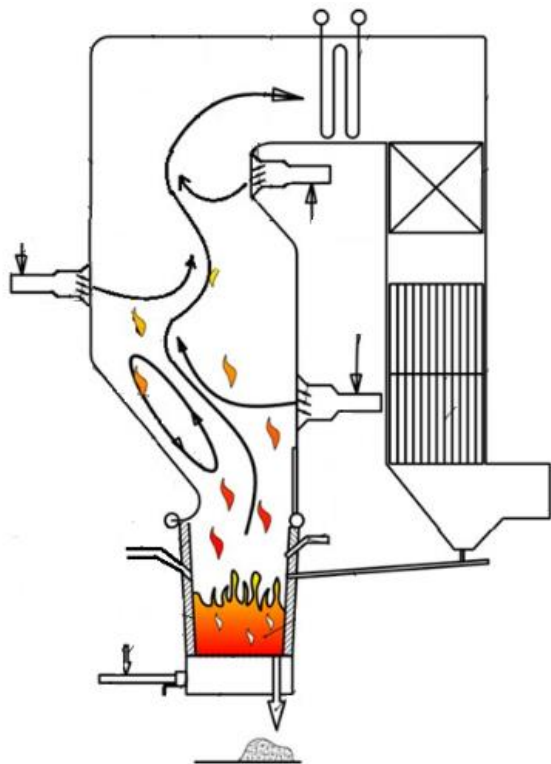
- При разработке «Программы ЦКС» важно увязать её с другими направлениями развития и «Программами» «Зелёной повестки» по биотопливу и биоэнергетике.

- В ЕС зелёные тарифы дали мощный толчок развитию различных технологий: рубильные машины и шредеры; биобрикеты и пеллеты; производства биогаза и биодизеля, в том числе авиационного; фуры - щеповозы; склады топлива типа «живое дно» и **собственно ЦКС под маркой «Pyroflou» введен в 1979. году финской фирмой «Альстрем».**

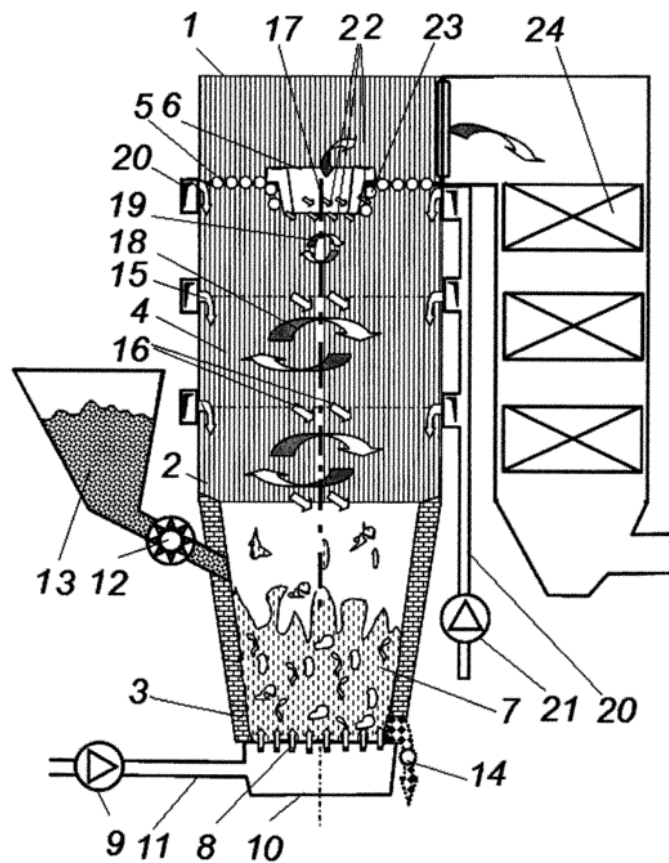


- В РФ для предприятий лесо- и сельхоз переработки из-за сезонного потребления тепла утилизация отходов экономически проигрышная и отягощает их деятельность.
- Введение «зелёных тарифов» - экономического и политического механизма, как и в ЕС, решит проблему утилизации КДО, но не за счёт переработчиков – их источника, а путём привлечения инвестиций в технологии обращения с биотопливами.
- Для России важно вовлечь ТЭС на основе ЦКС в утилизацию КДО и РДФ. Пока у нас КДО и CO₂ нейтральные отходы – это мусор, условно бесплатное топливо, а в ЕС, это источник доходов для цепочек предприятий: от переработчиков до ТЭС.
- Выплата ТЭС от государства по зеленым тарифам за снижение объёмов вредных выбросов, ТЭС закупает биотопливо, а кто-то его готовит, завозит и т.д.
- Для контроля доли «зелёной энергии» в топливном балансе ТЭС, мы предлагаем простой приборный метод, основанный на газовом анализе.

С.7 Перспективы 1 технологии ЦКС

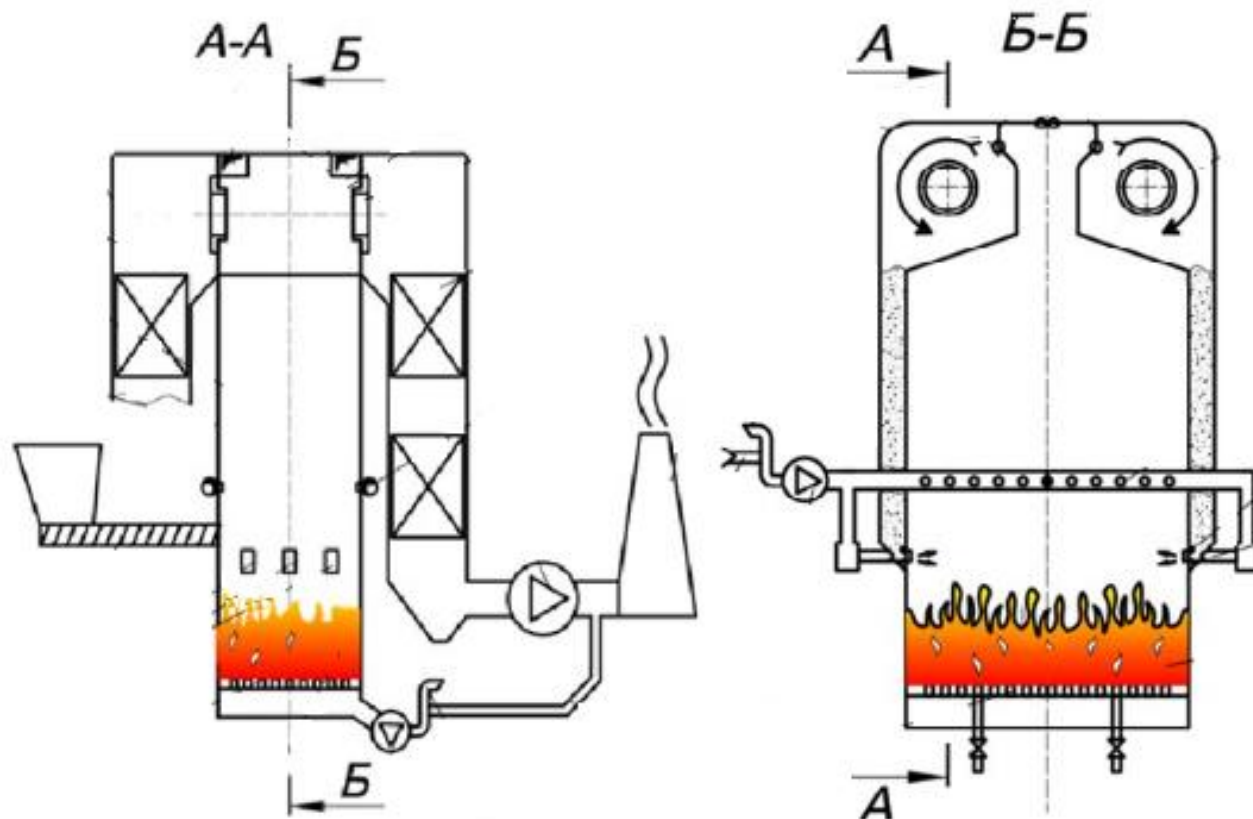


ФНТКС, ЦКС с гравитационной
сепарацией на наклонном
экране. Освоен.



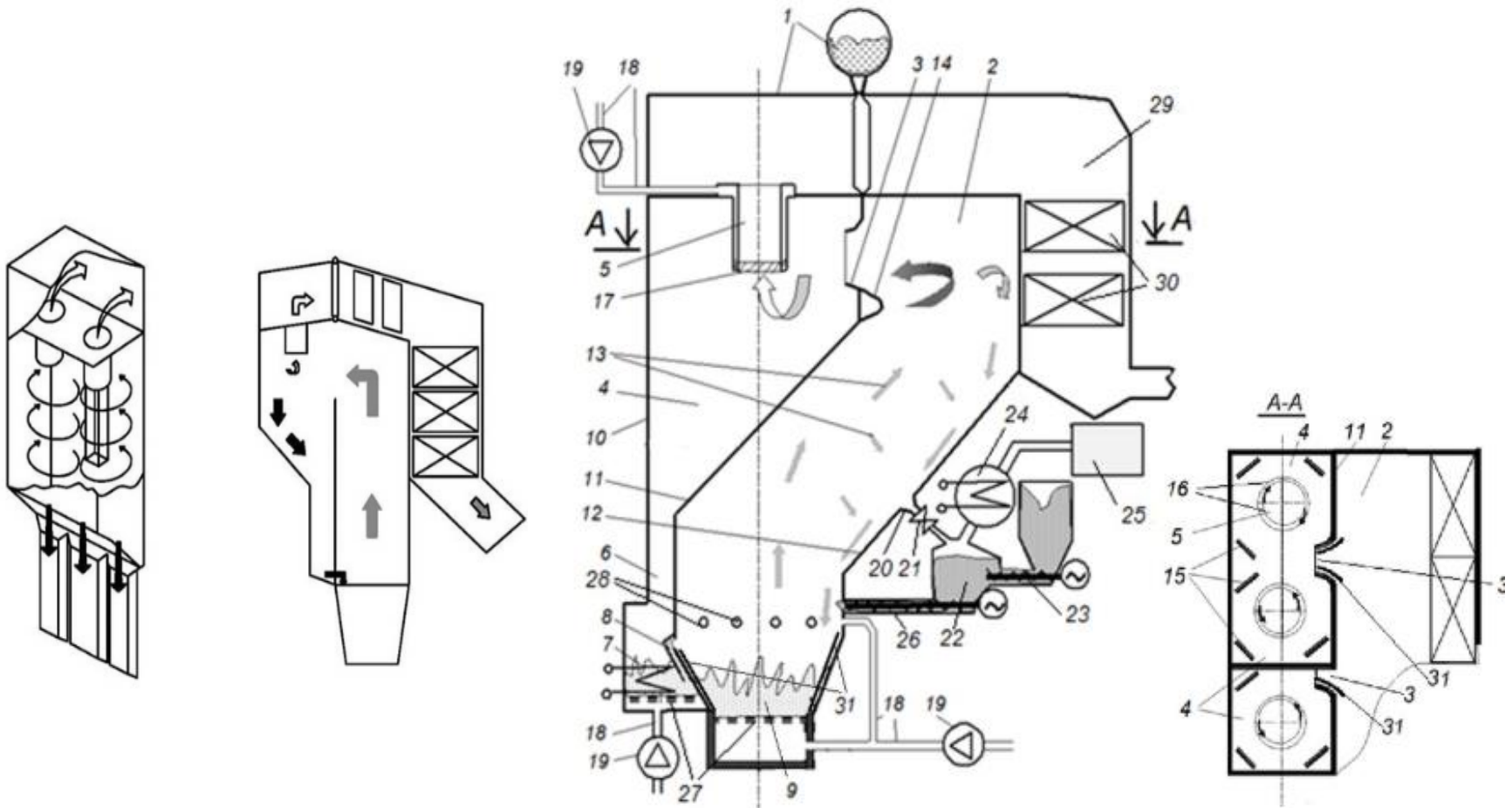
ЦКС с внутритопочной
сепарацией по схеме «Торнадо».

С.8 Перспективы 2 технологии ЦКС



Пример схемы ЦКС с сепарацией циркулирующих частиц в двух встроенных циклонах с дожигающим встречным дутьём по схеме «Трнадо» и Т-образной компоновкой котла.

С.9 Перспективы 3 технологии ЦКС



Развитие технологии ЦКС «Сомракт» с применением более компактно встроенных внутри топочных циклонов и использованием наклонного экрана, в том числе для внутрицикловой энерготехнологической переработки топлив

С.10 Изучать котёл №9 Новочеркасской ГРЭС

- Наличие котла с ЦКС современного уровня очень важно для ускоренного развития котельной топочной техники в России, и это необходимо использовать.
- Например, на сегодня при наличии в АлтГТУ кафедры КиРС ощущается очень острая нехватка специалистов котельщиков, причём практически все магистранты работают по специальности, а Барнаул по сути является "Меккой" котлостроителей, имеются КБ ТКЗ, ЗиО, «Эмальянс», БелэнергоМаш, ИнтерРАО и др. Таким образом, через распределение выпускники каф. КиРС возможно дать импульс на применение ЦКС во многих котлостроительных предприятиях РФ.
- В связи с этой особенностью важно выделить финансирование и организовать на котле №9 с ЦКС Новочеркасской ГРЭС прохождение практики для студентов, стажировок для преподавателей и ведущих специалистов фирм с целью углубленного изучения технологии ЦКС, АСУ, схем контроля, блокировок, включая вопросы подготовки топлива, обращения с золой и др.
- Важно подготовить обучающие материалы с технологическими схемами, общими видами котельной установки и её элементов с паспортами, характеристиками и инструкциями по эксплуатации, КВО и собственно котла.
- Подготовить примеры записей с мониторов для имеющихся схем управления с характеристиками рабочих параметров для процессов в стабильных состояниях и в переходных режимов, в объёме необходимом для их понимания.
- Обеспечить финансирование работы обучающего центра или факультета по повышению квалификации для работников электроэнергетической отрасли РФ.

С.11 ВЫВОДЫ

- В России есть простые и эффективные схемы модернизации ТЭС и энергетических котлов с применением ФНТКС, упрощенной технологии ЦКС, реализованные на ряде ТЭЦ: Читинская, Майская, Дарханская и Улан-Баторские ТЭЦ 2, 3.
- Есть и более эффективные схемы, которые могут служить основой для развития собственных направлений и применения ЦКС для модернизации.
- Разработку «Программы ЦКС » важно представить в комплексе с другими направлениями развития и «Программами ..» Зелёной повестки.
- КДО и CO₂ нейтральные отходы – это не мусор, а источник доходов и возможность развития для цепочек предприятий: от сельхоз- и лесопереработчиков до ТЭС.
- Предложить схему выплат ТЭС от государства по зеленым тарифам за счёт снижения объёмов вредных выбросов при приборном контроле доли «зелёной энергии» в топливном балансе ТЭС со стимулирующими развитии рынка биотоплив схемами его закупки.
- Для ускоренного развития технологии ЦКС в России необходимо выделить финансирование и организовать на базе котла №9 с ЦКС Новочеркасской ГРЭС обучающего центра с задачей организации прохождения практик для студентов и стажировок для преподавателей и ведущих специалистов. Центра, обеспечивающего углубленное изучение технологии ЦКС, включая вопросы подготовки топлива и обращения с золой.



ТЭЦ-2 в Душанбэ

- ТЭЦ современная. Блочные угловые горелки, выгрузка шлака с дожигани-ем, охлаждением и сортировкой. Визуальное наблюдение за топочным процессом со щита управления.
- Строительство внутри периметра без участия местных. Практически всё из Китая, оборудование и материалы.
- Все инструкции на китайском, Местные инженеры не у дел, эксплуатация силами китайцев до полного расчёта продаж электроэнергии и тепла.
- Низкая стоимость, так как китайцам отдано в разработку месторождение серебра.



Рис. 1. Читинская ТЭЦ-2. Наплавка износостойкого материала на трубы заднего экрана на высоту 1,5 м над слоем.

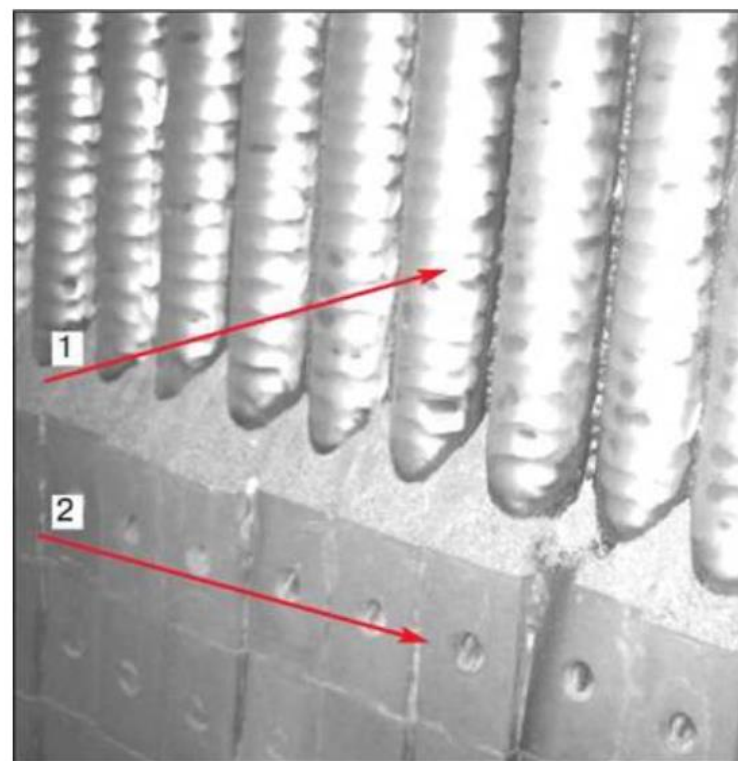
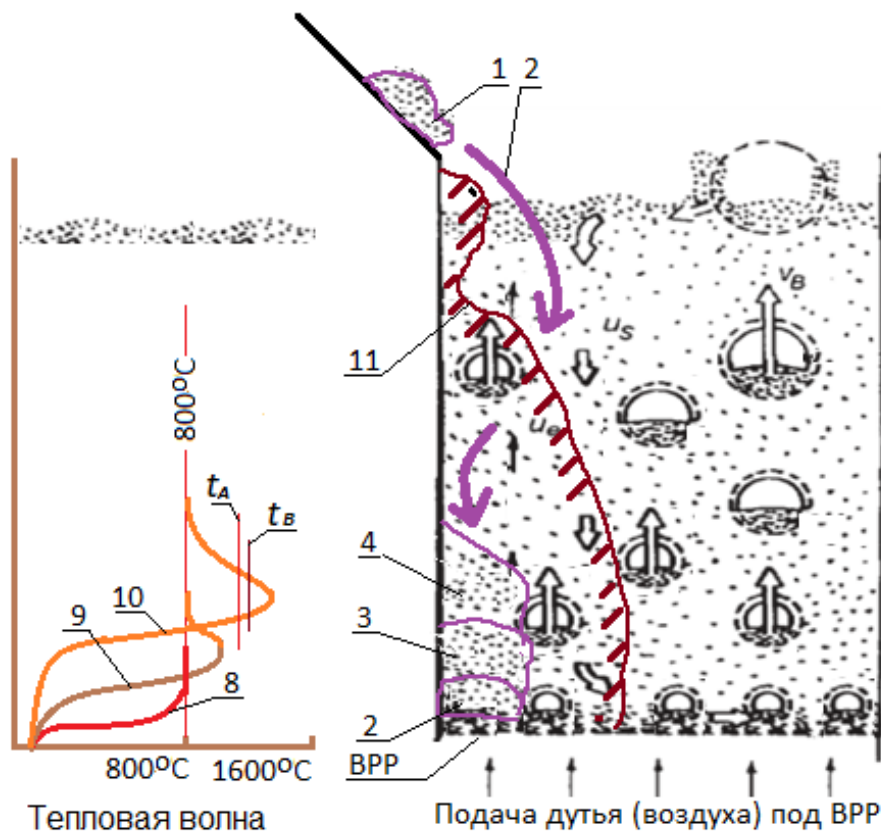


Рис. 4. Защита экранных труб котла КЕ-25-14-225ПС стационарный № 3 в котельной ООО «Алтайвагон»

Проблемы применения топок КС и ЦКС в котлах

Процесс спекание слоя



На БикЗ для очистки топки даже использовали трактор

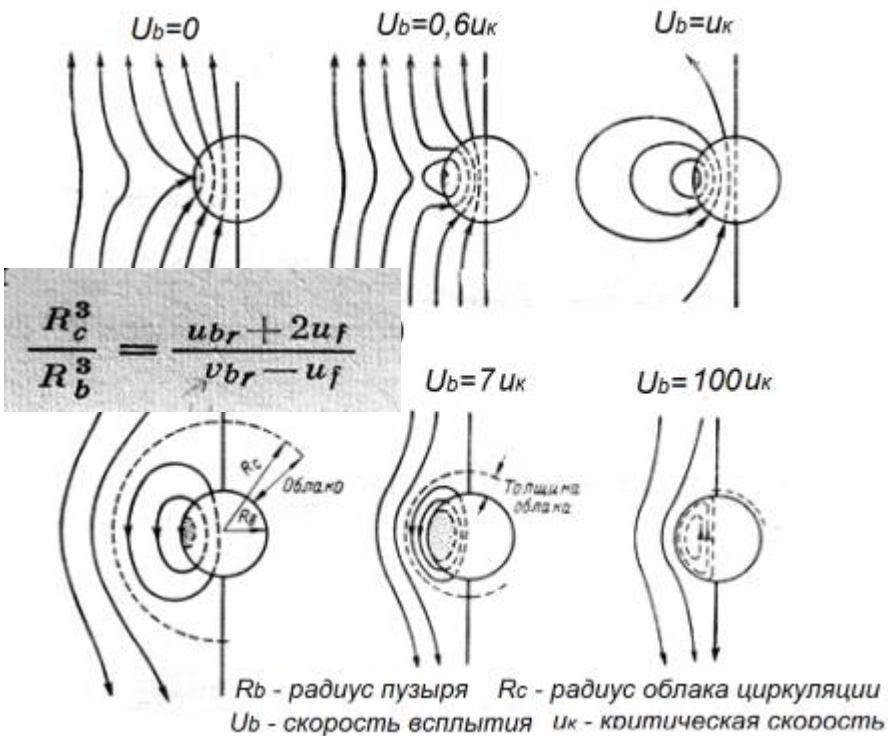
1. Пример. На скате образовался и спекается ком частиц.
2. Ком скатился в слой и утонул, лежит на BPP.
- 3, 4. Над комом быстро оседают частицы и топливо из слоя.
5. Через осевший слой с температурой $T=800-900^{\circ}\text{C}$ фильтруется воздух.
- 6, 7. При фильтрации воздух забирает физическое тепло частиц, теплоту сгорания топлива и быстро разогревается с формированием тепловой волны 8 9 10 без ограничения уровня температуры T в спёке 11 11.
- Образовавшийся спёк 11 растёт и полностью нарушает работу слоя с остановом котла.

ТЕОРИЯ Пузырьковый КС

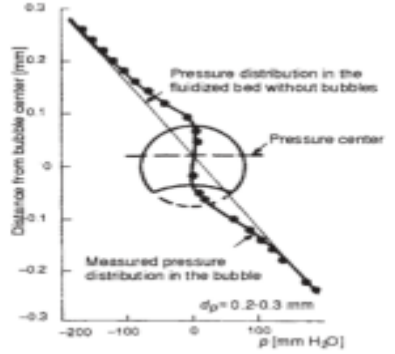
Модель Дэвидсона – Течения двух взаимопроникающих сред

Двухфазная модель. По опыту

- Избыток газа идет в виде пузырей
- Их скорость всплытия $U_b = 0,71(gD_b)^{1/2}$.
- За ними движется шлейф частиц и этим индуцируются потоки частиц в КС.
- Вокруг пузырей облако циркуляции.
- Пузырьки «видят» друг друга Коалесценция (слияние), сбор в центр.
- Кумулятивный выброс частиц до 2-4 м.

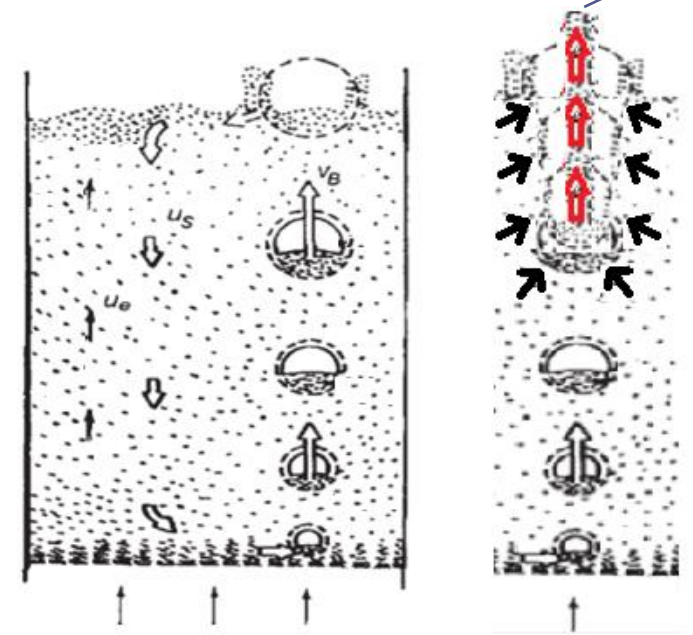


$$\frac{R_c^3}{R_b^3} = \frac{u_{br} + 2u_f}{v_{br} - u_f}$$



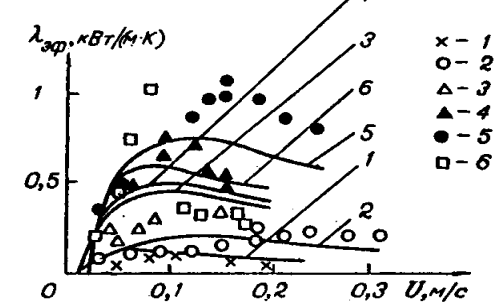
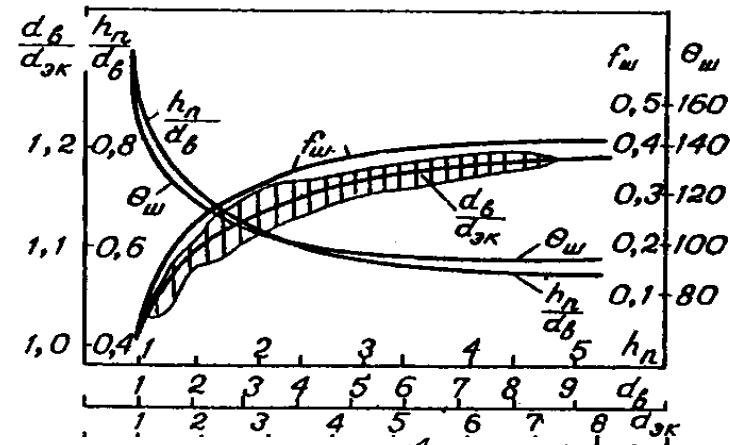
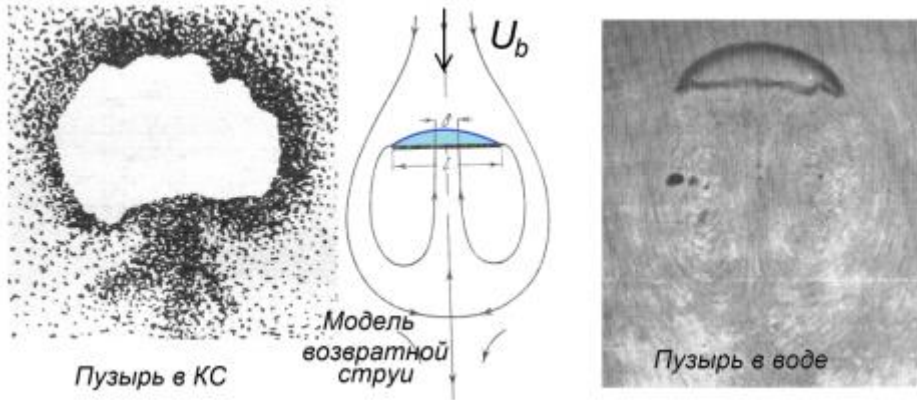
$$q_b = 3v_{mf} \pi R_b^2 = 3u_{mf} \epsilon_{mf} \pi R_b^2$$

q_b – расход циркуляции газа.
 График распределения давления

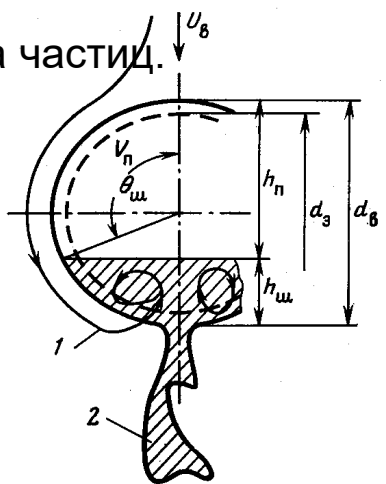
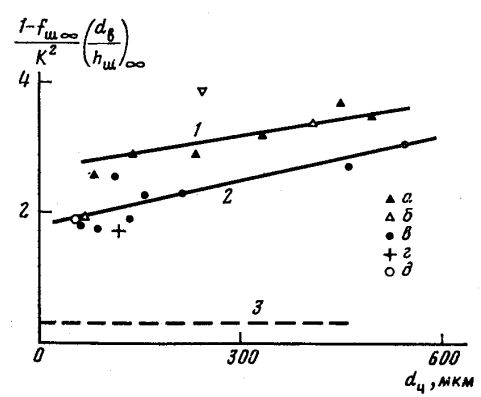


Теория возвратной струи

- Объясняет схему перемешивания в КС.
- Всплывающие полости КС и в воде имеют вид сегмента, за ним идёт заполняющий шлейф.
- В воде шлейф большой, в КС 10-40%, но даёт перенос массы и формирует циркуляцию частиц
- Расчет геометрии пузырей по модели согласуется с опытами. Можно рассчитать рост Rb по мере подъёма.
- Модель позволяет найти коэффициент теплопроводности кипящего слоя.
- Шлейф обновляется и находится в облаке Rс, это объясняет хороший тепло-и массообмен пузырей и частиц, нет проскока газов.



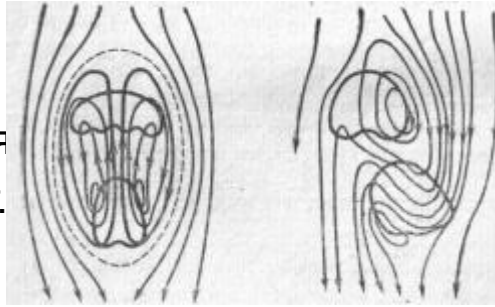
- Расчетная схема модели.
- Доля шлейфа зависит от типа частиц.



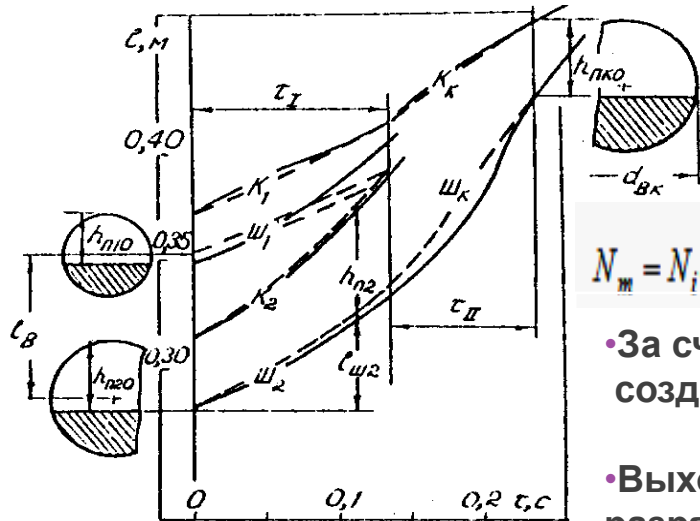
Модель коалесценции, унос

- Картина слияния – коалесценции в КС.
- При касании Rc облака объединяются.
- Верхний

замедляется или нет,
а нижний вытягивается
ускоряется и догоняет.
Далее слияние.



Расчетная схема для модели коалесценции.

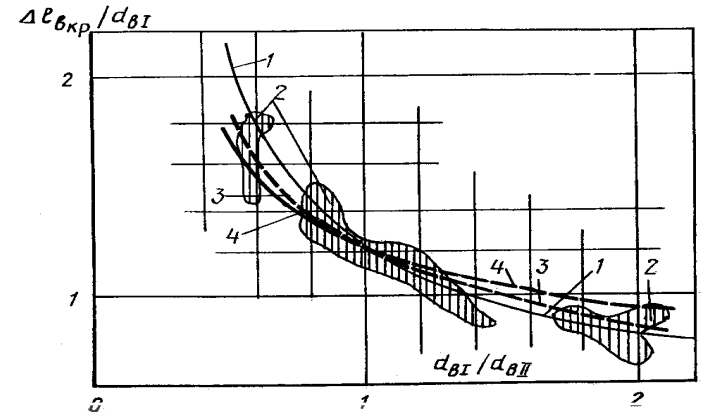


- Изменение концентрации, размера и скорости пузырей при прохождении от i до m актов парной коалесценции.

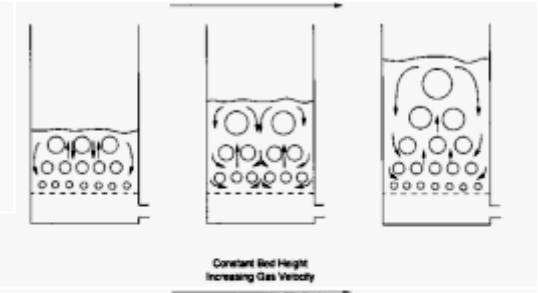
$$N_m = N_i(2)^{i-m}; \quad d_{км} = d_{ei}(2)^{\frac{m-i}{3}}; \quad U_{км} = U_{ei}(2)^{\frac{m-i}{6}}$$

- За счет коалесценции пузыри создаются ячейки циркуляции.
- Выход с парным и тройным слиянием создаёт в КС волну разряжения, которая индуцирует повышенную подачу газа в КС.
- Возникает режим автоколебаний КС.

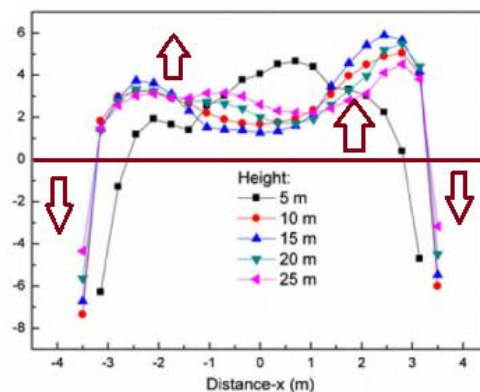
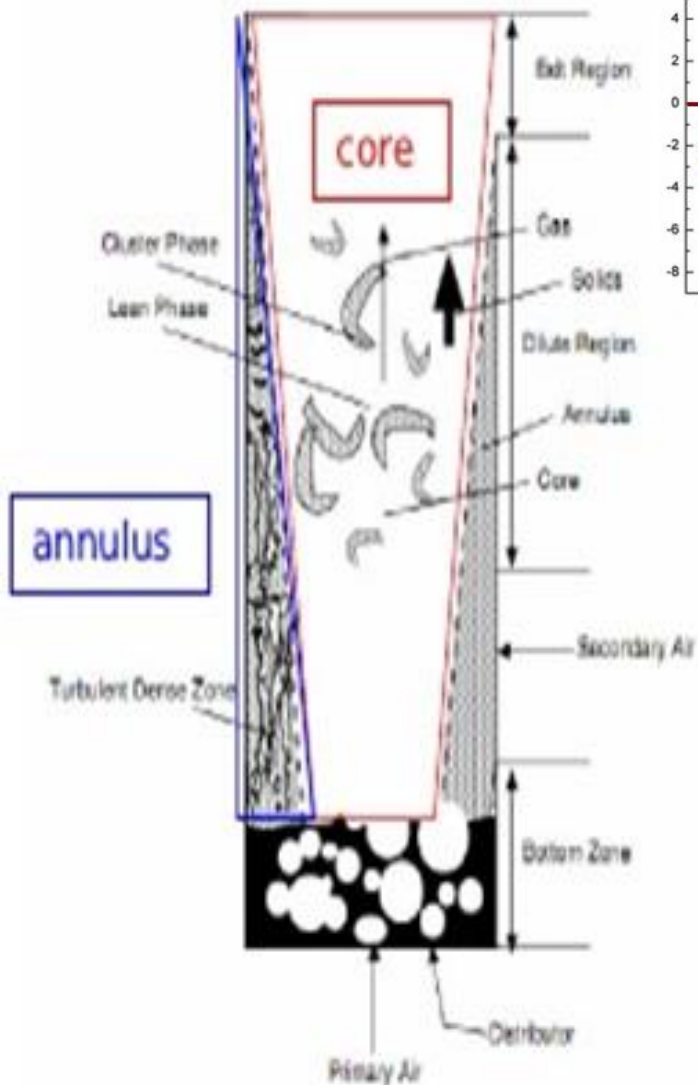
- Парные и особенно тройные слияния у поверхности КС формируют из шлейфа кумулятивные струи. Эти выбросы создают интенсивный выброс (фонтаны) и унос частиц из КС.



Расстояние начала коалесценции.
1, 2 опытные данные, 3, 4 – теория.



ЦКС и его структура



- На ВРР плотный, донный кипящий слой.
- Над ним подъёмное движение частиц и газа по центру – ядро восходящего потока газа.
- По стенкам топки опускное движение частиц и газа, увлекаемого частицами.

Модель для пристенной зоны ЦКС

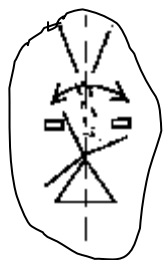
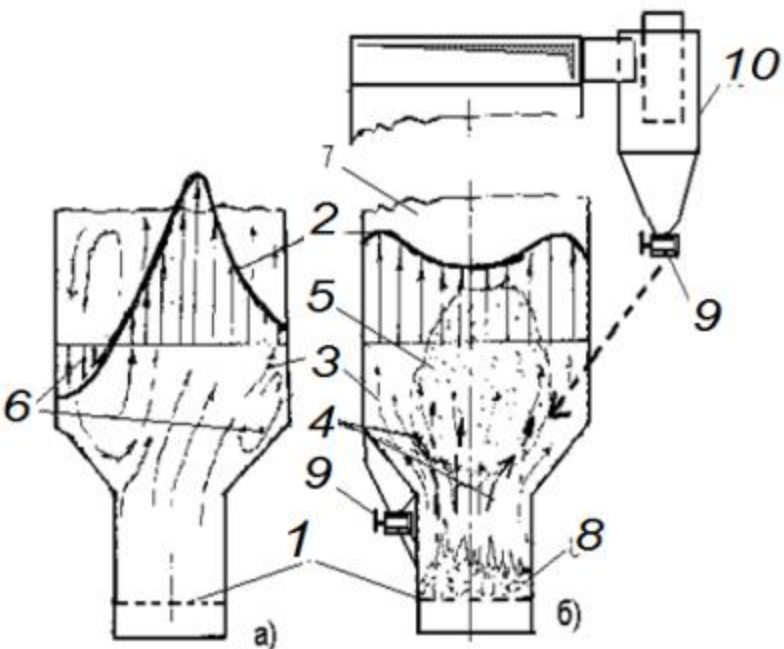
$$\frac{M}{2} \frac{du^2}{dy} + 2u^2 \frac{dM}{dy} = Mg$$

- Уравнение Мещерского для падающего со скоростью u потока M , кг/с частиц с переменным расходом.
- При постоянном по высоте y потоке частиц к стенке решение имеет вид: $u = \sqrt{2gy/5}$

Поток тормозится в 2,236 раз по отношению к свободному падению. Соответственно интенсивность износа снижается оценочно в 11 раз.

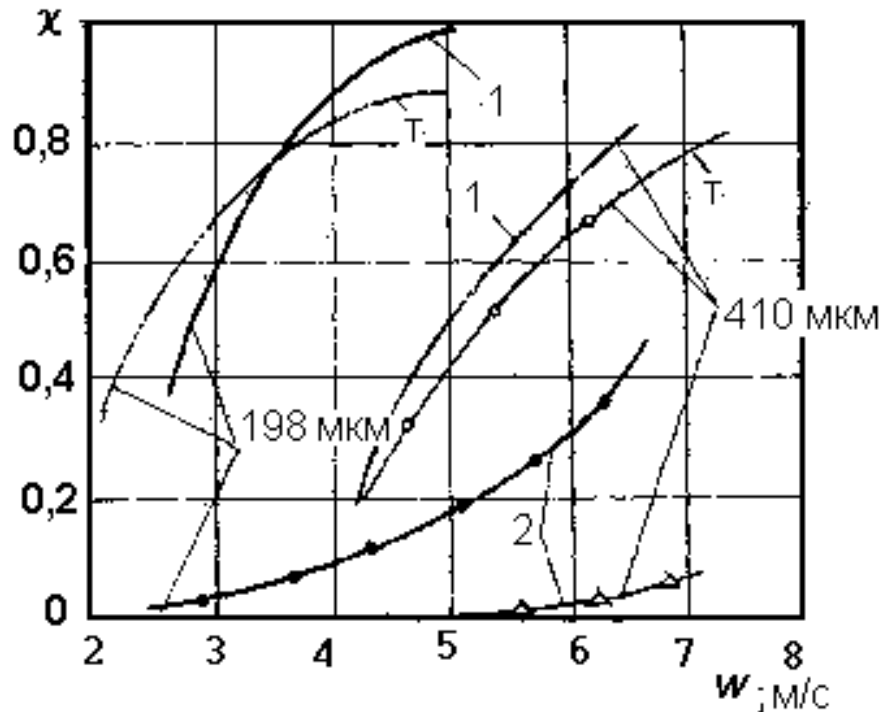
Исследование аэродинамики при различных режимах ЦКС

Теории нет, опытное изучение



- Использовался плоский стенд с прозрачной фронтальной стенкой и ВРР 1.
- Рециркуляция частиц шла через внешний циклон 10, а от гравитационной сепарации в модели ЦКС по перепускными каналам.
- Расходы частиц замерялись качающимися расходомерами 9.
- Поля скорости 2 замерялись пвмотрубками с ультра чувствительным диффманометром в диапазоне от 0,04 до 10 м/с.
- При заполнении слоя 8 частицами и подаче дутья возникает режим рециркуляции частиц.
- Картина течения при циркуляции частиц б) - симметрична, без вихрей, отрывов и пульсаций.
- Эта картина принципиально отличается от режима а), формирующегося без частиц или при слабой запыленности, как в пылеугольной топке или в КС без возврата частиц.

Характеристика выноса монофракций частиц



Доля χ выносимых частиц со средним размером 490 и 198 мкм, 1 – поток со слабой запыленностью в опытах, т – теория, 2 – с рециркуляцией частиц, ЦКС.

Вынос частиц в опыте при слабой запыленности – 1 хорошо соответствует теории – т.

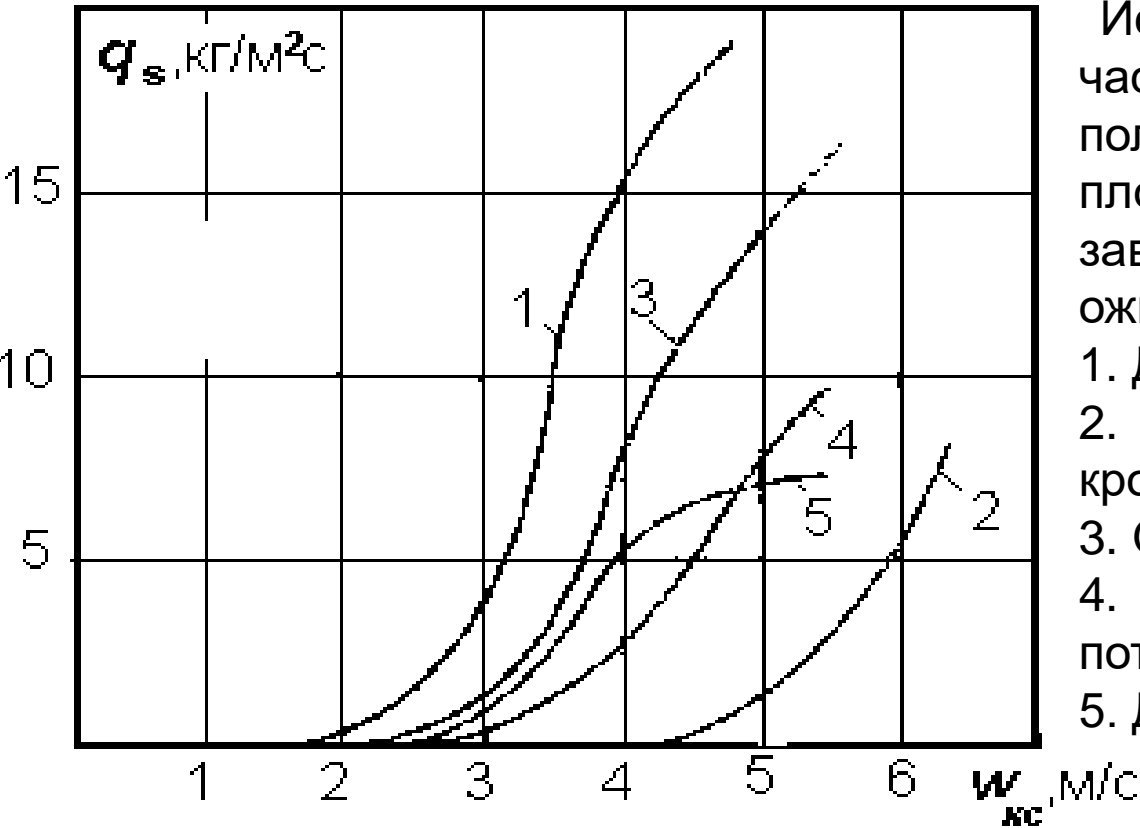
Доля выносимых частиц χ в режиме ЦКС, кривые 2 значительно, многократно, меньше, чем при слабой запыленности.

Изменяется и качественный вид кривых 2 в сравнении с линиями 1 по теоретической модели.

В этих опытах было выявлено интенсивное взаимодействие сред с формированием на ВРР донного слоя.

Донный слой обеспечивает высокоэффективное удержание частиц в условиях ЦКС. Он будет стабилизировать и топочные процессы.

Исследования выноса бинарной смеси



Использовалась бинарная смесь частиц песка $\delta_1=410$ мкм и полиэтилена $\delta_2=3600$. Кривые плотности потоков q_s в зависимости от скорости псевдооживления $u_{кс}$:

1. Для монофракции частиц песка.
2. Для частиц полиэтиленовой крошки.
3. Общий поток бинарной смеси.
4. Для полиэтиленовой крошки в поток бинарной смеси.
5. Для песка в бинарной смеси.

Вывод. Вынос мелочи с бинарным потоком частиц 5 резко снижается по сравнению с циркуляцией этой монофракции, кривая 1, а вынос крупных частиц кривая 4, наоборот существенно возрастает.

Взаимодействие циркулирующих частиц и преимущества ЦКС

1. Проведенные исследования показали, что мелкие частицы, передают кинетическую энергию, увлекают и выносят из слоя крупные. Вынос мелочи резко снижается.
2. Унос крупных частиц начинается, почти одновременно с мелкими частицами и многократно, на порядок, усиливается в сравнении с условиями циркуляции крупной монофракции.
3. Ансамбль частиц ведет себя как фракция среднего размера, соответственно этим и объясняется неправдоподобно высокая эффективность 98-99,9% работы огромных циклонов котлов ЦКС.
4. Мелочь задерживается в слое на значительное время, поэтому рециркуляция существенно улучшает перемешивание в ЦКС. Возврат и дожигание уноса в ЦКС гораздо эффективнее чем в КС.
5. Возврат частиц в ЦКС улучшает дожигание горючих из возврата уноса и расширяет диапазон стабильного существования и регулирования ЦКС в сравнении с КС.

Теплообмен в КС

- Пакетная модель теплообмена с КС

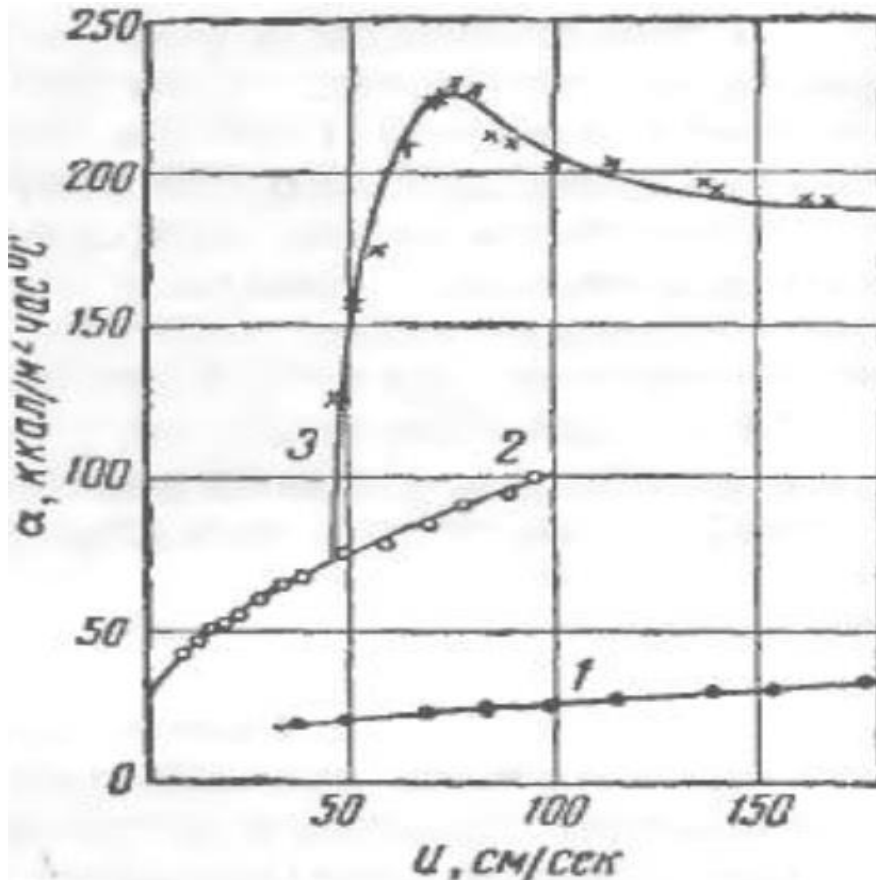
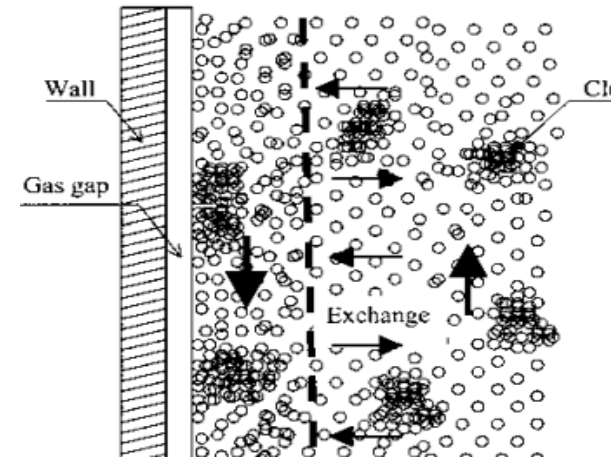


Рис. 2. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости потока:

1 — в пустой трубке; 2 — в неподвижном слое; 3 — в кипящем слое



$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

$$x=0, \tau > 0 \quad T = T_w$$

$$\frac{T - T_0}{T_w - T_0} = 1 - \operatorname{erfc} 2 \sqrt{\frac{x}{a\tau}}$$

$$h = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\tau}}$$

$$\bar{h} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} h d\tau = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\tau}}$$

Влияние размеров частиц КС

Влияние размера частиц и скорости газа на теплообмен

