ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ВЫПУСК 6



НОВОСИБИРСК
2002

Министерство образования Российской Федерации

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

40-ЛЕТИЮ
ФАКУЛЬТЕТА ЭНЕРГЕТИКИ
ПОСВЯЩАЕТСЯ!

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ВЫПУСК 6

НОВОСИБИРСК
2002

УДК 621.311

Е.М. Пузырев, А.М. Сидоров,
А.А. Скрябин, В.П. Щуренко
(НИЦ ПО «Бийскэнергомаш»)
С.М.Кисляк, Г.П.Пронь
(Алт. ГТУ)

ОБОСНОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРСИРОВАННОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Рассмотрены различные аспекты комплексного обоснования и практического применения разработанной в НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» технологии форсированного кипящего слоя, включая огневое моделирование, изучение поведения топлив и особенностей аэродинамической обстановки в кипящем слое и над ним.

Технологии кипящего и циркулирующего слоя относятся к числу наиболее сложных и наукоёмких, требующих значительных затрат для своего решения. На основании имеющегося 27-летнего опыта в НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» [1] предложено комплексное решение вопросов, в виде концепции **топки со свободным форсированным низкотемпературным кипящим слоем (НТКС), вписываемой в профиль котла с использованием его элементов и топочного объёма для сепарации частиц и дожигания горючих с учетом типа применяемого топлива**.

НТКС использует форсированный режим, приспособлен к реально имеющемуся в котельных низкому качеству дробления рядового угля. Форсирование позволяет вписать топку НТКС практически во все имеющиеся профили котлов Бийского, Доргобужского, Белгородского и других котельных заводов с организацией в топочном объёме сепарации и удержания частиц. При этом нет необходимости замены инфраструктур действующих котельных.

Использование свободного слоя без погруженных поверхностей нагрева упрощает конструкцию топки, облегчает её обслуживание, устраняет проблему износа труб и зашлаковывания слоя.

Материальное исполнение базируется преимущественно на технических и технологических возможностях Бийского котельного завода [1]. Используются проверенные практикой промышленной эксплуатации элементы и технические решения. Приме-

няются экономичная система нижней растопки, охлаждаемые водой решетки колпачкового типа с селективным удалением золы, поставляются встроенные системы улавливания и возврата уноса.

Важная роль отводится типу топлива, изучению поведения углей при горении в кипящем слое. Это предопределяет конкретные особенности организации топочного процесса [2]. Системы с внутрицикловой подготовкой и переработкой топлива за счет тепла слоя [2–7] обеспечивают более широкий диапазон регулирования, повышают экологические показатели и экономичность, в том числе благодаря конденсации влаги топлива.

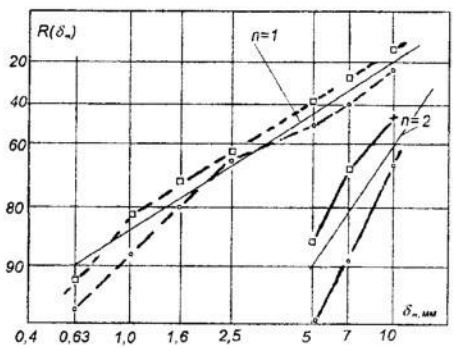

Рис. 1. Зерновые характеристики исходного (сплошные) и после темоконтактной сушки (пунктир) бурого угля

Изучение поведения различных видов топлив при внутрицикловой подготовке, переработке и сжигании проводилось в лабораторных установках, на огневых стендах и с разработкой теоретических моделей. На рис. 1 в качестве примера для березовского угля Б-2 с исходной влажностью W^r_i = = 35…48 % показано изменение зерновых характеристик, $R(\delta_т)=100\exp(-\delta_т/\delta_0)^n$, примерно подчиняющихся закону Розина–Раммлера при термоконтактной сушке. Топливо переизмельчается, увеличивается его показатель полидисперсности n [8]. Для характерных времён τ_x выхода влаги, летучих и воспламенения кокса в зависимости от размера частиц $\delta_т$ различных углей и температуры в кипящем слое $\vartheta_{кс}$ получены аппроксимирующие зависимости [9] степенного типа: $\tau_x/\delta_т=F(W^r_i)(1000/\vartheta_{кс}-273)^M$.

Изучение выгорания топлив в кипящем слое показало, что главной проблемой является повышенный механический недожог с уносом q_4, который зависит [10] от размера частиц $\delta_т$, петрографического состава угля и имеет два механизма формирования. Дифференциальные функции распределения горючих в уносе имели бимодальный характер. Унос по своему характеру разделяется на мелкий $\delta_{ун}<0{,}16$ мм и крупный $\delta_{ун}>0{,}2$ мм. Крупный унос [10], и он особенно ярко выражен при подаче мелкого топлива, образуется в первые моменты времени из-за выноса, растрескивания и первичных превращений исходных частиц угля.

Резкое увеличение мехнедожога особенно характерно при подаче мелкого угля (мельче 1,2 мм). Здесь значительное влияние

имеет петрографический состав угля. В буром угле первичные превращения идут с глубоким растрескиванием. Угли с высоким содержанием витрена, например кузнецкие, не рассыпаются. На их поверхности появляются вспучивающиеся связывающие пористые выплавления витрена. Эти выплавления далее затвердевают в легко отделяющиеся ксеносферы, которые отламываются и выносятся, формируя малозольный крупный унос с низкой плотностью.

Расход уноса уменьшается с укрупнением подаваемого топлива, стремясь к предельному значению. Он представлен мелкими частицами, которые формируются при динамическом взаимодействии кипящего слоя и горящей поверхности кокса. Это неизбежный унос. Плотность потока частиц уноса с горящей поверхности зависит от типа топлива, меняясь в пределах $(0{,}4\ldots400)10^{-4}$ кг/м^2·с. По нашим опытам, неизбежный унос составляет 5,3; 4,4 и 1,24 % соответственно для кузнецкого, экибастузского и бурого углей. Из-за малого размера частиц этот унос трудно улавливается и в топке должно быть организовано его сжигание «за один проход».

На основе изучения механизмов формирования уноса для топлив с высокой реакционной способностью и большим выходом летучих (древесные отходы, торф, бурые угли) предложены простые схемы организации НТКС. Для антрацитов, каменных и тощих углей выявлены требования и разработаны специальные меры по подавлению недожога и зашлаковывания слоя.

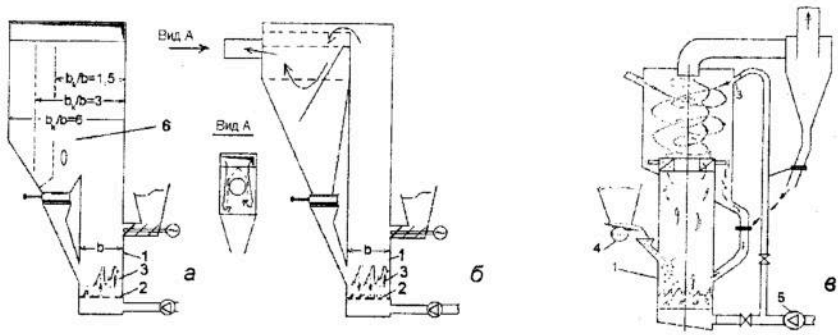

Рис. 2. Схемы огневых стендов организации НТКС:
а – с гравитационной сепарацией, *б* – с инерционной сепарацией, *в* – с центробежной сепарацией

При разработке НТКС, помимо изучения механизмов формирования уноса, в экспериментальной котельной НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» и лабораториях Алт. ГТУ моделировались элементы технологических схем с использованием реконструированных котлов ДКВр-4-13 НТКС, ДКВр-4-13 ПС и стендовых установок. Стенды огневого моделирования выполнялись с гравитационной

(рис. 2,*а*) сепарацией за счёт расширения камеры сгорания *6* в верхней части стенда $b_к/b$=1,5; $b_к/b$=3; $b_к/b$=6. Исследовались схемы с инерционным (рис. 2,*б*) и центробежным (рис. 2,*в*) улавливанием циркулирующих частиц по патентам [11–14].

Стендовые установки имеют топку *1* с перфорированной решеткой *2*, на которой поддерживается кипящий слой *3*. Топливо подавалось питателями *4*. Температура и режимы поддерживались подачей топлива и дутья от вентилятора *5*.

В опытах измерялись: сопротивление (высота) слоя, расход воздуха, температура слоя $\vartheta_{сл}$ К, температура в верхней части камеры сгорания $\vartheta_т$ К и температура циркулирующего материала $\vartheta_ц$, К, отбирались пробы слоя и уноса. Анализировались составы подаваемого угля, уноса и материала слоя. В качестве топлива использовался отсев $\delta_т \le 15$ мм дробленого кузнецкого 1СС угля и бурый уголь. Режимные параметры представлены в табл. 1.

При работе установки в нижней части камеры сгорания наблюдался кипящий слой из крупнофракционных частиц, по контурам циркуляции двигался более мелкий материал. С увеличением степени расширения и улавливания в топке накапливаются более мелкие циркулирующие частицы.

Кратность циркуляции $K_ц$, определяемая как отношение расхода циркулирующего материала $B_ц$ к расходу поданного топлива $B_т$, в опытах составляла $K_ц=B_ц/B_т$=8–10 и достигала 50 в схеме рис. 2,*в*. Температура на возврате циркулирующего материала в опускном канале в опытах была близка к температуре слоя, $\vartheta_ц$=880–1170 К. Таким образом, выгорание топлива происходило по всему контуру циркуляции.

Фракционная эффективность улавливания циркулирующих частиц на кузнецком угле 1СС для топок с инерционной и гравитационной сепарацией показана на рис. 3. Интегральный КПД с инерционным улавливанием составил 92…98 %, а с гравитационной сепарацией (рис. 2,*а*) 95,5…92 % при $b_к / b$=6; 91…86 % при $b_к / b$=3 и 85…82 % при $b_к / b$=1,5. Однако недожог на кузнецком угле 1СС в схемах рис. 2,*а* и 2,*б* из-за малых размеров топок был высоким и достигал 13…16 %. При разработке технологических схем для низкореакционных углей необходимо приближаться к идеальному процессу выгорания.

Такой является схема [13] со встроенными дожигающими циклонами. Достоинствами этой схемы являются как глубокое дожигание горючих, так и возможность компоновки циклонов в надслоевом объёме [14] с соответствующим снижением габаритов котла. Испытания подтвердили, схема рис. 2,*в* обеспечивает снижение механического недожога для угля 1СС до 3…6 %, а на бу-

ром угле до 0,8…1,5 %. Фракционная эффективность улавливания циркулирующих частиц в стенде, рис. 4, для бурого Б2 – кривая *5* более высокая, чем для кузнецкого 1СС – кривая *4*.

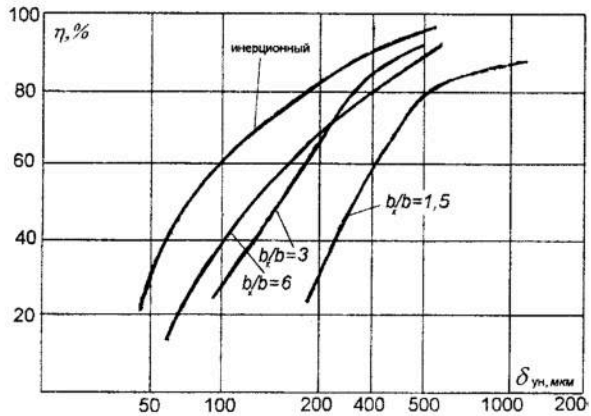

Рис. 3. Фракционная эффективность улавливания

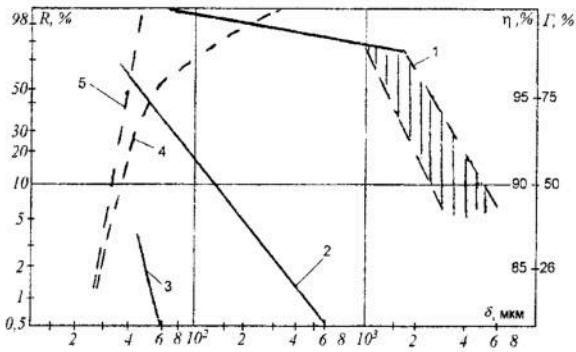

Рис. 4 Стенд 2,*в*. Зерновые характеристики плотного кипящего слоя – *1*, уносов кузнецкого 1СС – кривая *2* и бурого Б2 – кривая *3*. Эффективность сепарации циркулирующих частиц 1СС – кривая *4* и бурого Б2 – кривая *5*

Большая часть плотного кипящего слоя состоит из крупных частиц, кривая *1*, и их состав зависит (на рис. 4 показаны штриховкой) от типа угля и режимных параметров, смещается вправо. Он укрупняется с ростом скорости и при подаче низкореакционного угля 1СС. Мелочь плотного кипящего слоя и циркулирующие частицы почти не меняют своего состава при смене топлива и режима работы. При скорости 3…5 м/с размер циркулирующих частиц был меньше 1…0,7 мм.

Тепловая мощность топки была на уровне 30...100 кВт, т. е. теплонапряжение сечения поддерживалось на уровне пылеугольных котлов, 2...6 МВт/м^2, но объёмное теплонапряжение было на порядок выше, чем в топках камерных котлов, 1...3 МВт/м^3. В целом, как показали огневые испытания, схема рис. 2,*в* эффективнее остальных.

Таблица 1

Режимные параметры стендовых исследований

№ п/п	$Q_в$, нм^3/с	$B_т$, кг/с	α	$\vartheta_{сл}$, К	$\vartheta_т$, К	$\vartheta_ц$, К	$w_{сл}$, м/с	$B_{ц1}$, кг/с	$B_{ц2}$, кг/с	$B_{ун}$, гр/с	Q_4, %	$\eta_ц$, %
1. Степень расширения топки b/b_k=6												
1	0,0166	0,0015	1,98	780	700	580	4,1	0,0089	0,0014	0,21	13,9	85
2	0,0178	0,003	1,07	850	800	710	4,7	0,0187	0,0013	0,39	15,9	91
3	0,02	0,0035	1,19	730	820	600	5,95	0,021	0,0037	0,44	14,2	83
2. Степень расширения топки b/b_k=3												
4	0,022	0,0015	1,07	720	875	800	6,55	0,0315	0,0044	0,56	15,1	86
5	0,0285	0,0015	0,94	770	910	875	7,7	0,0465	0,0056	0,9	16,3	87
3. Степень расширения топки b/b_k=1,5												
6	0,0205	0,0039	1,29	800	810	790	6,4	0,029	0,0031	0,4	14,8	82
4. Топка с инерционным сепаратором												
7	0,021	0,0043	0,92	650	670	710	5,6	0,0245	-	0,5	15,7	90

Для подавления уноса разрабатывались и специальные мероприятия. При подаче крупных частиц угля (более 1,6 мм) и окатышей недожог резко снижается и превалирует мелкий унос. Окатыши не подвержены раскалыванию, и поэтому окомковывание угольной мелочи и уноса с использованием схем [15, 16] перед сжиганием дает несомненные преимущества.

При отработке схем растопки использовался реконструированный котёл ДКВр-4-13 НТКС мощностью $Q_{ка}$≈2 МВт. При нижней схеме растопки уголь в слое воспламенялся через 20 минут при мощности камеры 0,7 $Q_{ка}$. От растопочной горелки с высотой её установки 750 мм над решеткой слой удалось зажечь через 30 минут и только при её мощности 0,9 $Q_{ка}$. При установке растопочной горелки на высоте 1500 мм от решетки прогреть слой до воспламенения топлива не удалось.

С учетом необходимости защиты верхних растопочных устройств от воздействия работающего слоя, их высокой мощности и низкой экономичности была принята за основу схема с нижней растопкой. На сегодня схема КИПиА котлов НТКС предусматривает автоматический запуск топки. В комплект поставки котлов входят растопочная камера, защитно-запальное устройство, растопочный блок с баком и насосом подачи солярки, датчики и элементы коммутации. Для защиты от высокотемпературного воз-

действия продуктов сгорания используются охлаждаемые водой воздухораспределительные решетки.

На псевдоожижение и аэродинамику слоя влияет не только конструкция решетки, но и фракционный состав слоя, определяемый типом и подготовкой исходного угля и системой улавливания и возврата уноса. Можно выделить четыре характерных случая зерновой характеристики слоя $R_{кс}(\delta_{кс})$ и провести анализ влияния её на профили и величины давления $P_{кс}$ и температуры $\vartheta_{кс}$ собственно в слое, над слоем $P_{кс2}$, $\vartheta_{кс2}$ и на решетке $P_{кс1}$, $\vartheta_{кс1}$

Случай 1. Частицы мелкие, крупных частиц мало. Давление над кипящим слоем $P_{кс2}$ за счет хорошего заполнения топки циркулирующими частицами высокое. Из-за интенсивной циркуляции через уловитель циркулирующих частиц и хорошей теплоотдачи к экранам топка изотермична по высоте. Слой имеет минимальную температуру $\vartheta_{кс1}=\vartheta_{кс}^{min}$, т. е. наибольший запас по условию зашлаковывания слоя. В результате хорошего псевдоожижения при одинаковом заполнении топочного объёма в этом режиме работы в слое требуется минимальное давление на решетке $P_{кс1}$.

Случай 2. Частицы преимущественно мелкие, но имеются и крупные, которые скапливаются на дне. Давление над кипящим слоем $P_{кс2}$ и заполнение надслоевого объема снижаются. Из-за уменьшения выноса частиц из кипящего слоя его охлаждение снижается, температура $\vartheta_{кс1}$, давление $P_{кс1}$ и плотность слоя на решетке из-за накопления крупных частиц возрастают.

Случай 3. Грубая зернистость. Зола плохо выносится из слоя, слой перегревается. Заполнение и теплообмен в надслоевом объеме снижаются. Из-за снижения теплоотдачи к экранам температура $\vartheta_{кс}$ возрастает во всем объёме слоя. Давление $P_{кс1}$ и плотность слоя на решетке увеличиваются.

Случай 4. В слое с грубой зернистостью накапливаются крупные частицы. Они заполняют нижнюю часть слоя. Из-за падения циркуляции золы заполнение и теплообмен в надслоевом объеме снижаются, слой в придонной зоне перегревается ещё больше, $\vartheta_{кс1}$ максимальна. Давление и плотность слоя на решетке увеличиваются. Для псевдоожижения требуются повышенные скорости и напор дутья. Это наихудший режим работы топки.

Таким образом, за счет топливоподготовки (выбор дробилок и измельчения в соответствии с применяемым углем) и накопления мелочи (высокоэффективной сепарации частиц) важно стремиться к поддержанию мелкого фракционного состава слоя.

По нашим исследованиям (рис. 5), наличие кипящего слоя *8* принципиально изменяет аэродинамику в надслоевом объёме *7*. При малом количестве или отсутствии частиц формируется течение (рис. 5,*а*) с выраженным несимметричным [17] профилем скорости *2* и траекториями *3* с пульсирующими отрывными и возвратными вихревыми зонами *6*. При заполнении решетки *1* слоем песка с его возвратом через расходомер *9* из циклона *10* в надслоевом объёме возникают гравитационная сепарация и рециркуляция частиц. Картина течения становится симметричной (рис. 5,*б*). По измерениям наблюдается провал скорости в центре. Это объясняется образованием облака *5* с повышенной концентрацией частиц в объёме *7* над кипящим слоем *8*. Таким образом, циркулирующие частицы в надслоевом объеме индуцируют особую аэродинамическую обстановку (рис. 5,*б*). Индуцирование частицами аэродинамики было получено при численном моделировании [18] топок кипящего слоя.

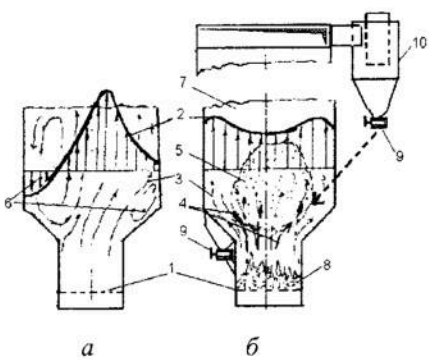

Рис. 5. Изменение характера течения над кипящим слоем

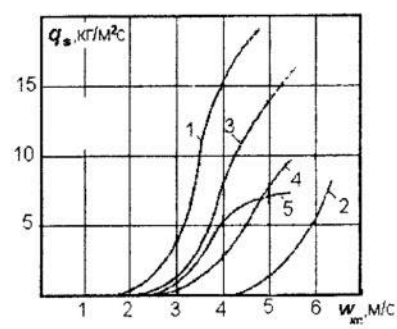

Рис. 6. Вынос и взаимодействие частиц

В отличие от постулированных в [19] закономерностей **«о невзаимодействии частиц разного размера»**, основанных на аналогии со статистической физикой, реально взаимодействие в НТКС между частицами имеется, и значительное. По нашим исследованиям [2, 18], плотность потока мелких частиц песка δ_1=410 мкм в бинарной смеси (кривая *5*) частиц резко снижается по сравнению с циркуляцией песка (кривая *1*), а поток крупных частиц (полиэтиленовая крошка 3…5 мм) в бинарной смеси (кривая *4*) гораздо выше, чем без мелочи (кривая *2*) (рис. 6). Суммарный поток смеси показан кривой *3*.

Таким образом, мелкие частицы, уносимые газом, передают кинетическую энергию крупным и увлекают их. Рециркуляция существенно улучшает условия перемешивания в кипящем слое.

Мелочь задерживается в слое на значительное время, что улучшает дожигание горючих из возврата уноса, снижает средний размер частиц в плотном слое и повышает диапазон устойчивого псевдоожижения слоя. Это важный момент в схеме организации НТКС.

Так для реконструкции котлов БКЗ-220-100, Райчихинская ГРЭС (Райчихинский Б2), БКЗ-160-100, Павлодарская ГРЭС-2 (Экибастузский СС), БКЗ-75-40-440, Братская ТЭЦ-7 (Канско-Ачинский Б2), БКЗ-50-40-440, Экибастузская ТЭЦ-1 (Экибастузский СС) были выполнены проекты с использованием для улавливания циркулирующих частиц встроенных золоуловителей [18, 20, 21]. ПО «Сибэнергомаш» полностью изготовил и отгрузил элементы реконструкции котлов БКЗ-160-100 и БКЗ-50-40-440.

Первый уловитель схемы выполнен в виде золоулавливающего пучка с V-образными ребрами. Он расположен на фестоне топочного экрана или на первых рядах труб пароперегревателя. Вторым используется золоуловитель лабиринтного типа.

Из практики известно, что куски породы «проскакивают» дробилки, так как её прочность выше, чем угля, и поэтому в кипящем слое всегда идет накопление крупного куска. Для вывода крупного куска нами разработаны и применяются системы поддержания высоты кипящего слоя, причем только с нижним сливом материала слоя. Кроме того, для возврата мелочи и охлаждения частиц узел слива слоя выполняется с отдувом мелочи и охлаждаемым водой. Разработаны решетки с направленным дутьем. Крупномасштабные исследования проводились на стенде ПО «Сибэнергомаш» [22], (рис. 7). Стенд *1* по длинной оси делился вертикальной металлической стенкой *2*, и таким образом формировался замкнутый контур циркуляции.

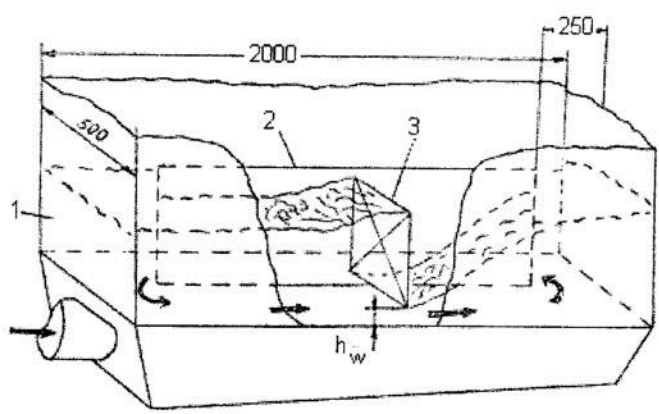

Рис. 7. Схема стенда

Слой заполнялся округлыми полиэтиленовыми частицами размером 5...3 мм с плотностью ρ_s=950 кг/м^3 и скоростью минимального псевдоожижения U_{mf}=1,14 м/с. Менялась скорость псевдоожижения и высота лежащего слоя H_0. При малой высоте слоя наблюдался быстрый, движущийся по контуру поток частиц с характерным повышением уровня на поворотах. При заполнении слоя более 130 мм картина менялась, слой вздувался и переходил в псевдоожиженное состояние без заметной циркуляции. Пульсации и размеры пузырей на поверхности были намного меньше, чем без циркуляции.

Для исследования интенсивности невидимого движения контур циркуляции разделялся шибером *3*. На рис. 8 показано влияние скорости псевдоожижения и высоты подъёма шибера *3* на расход потока частиц.

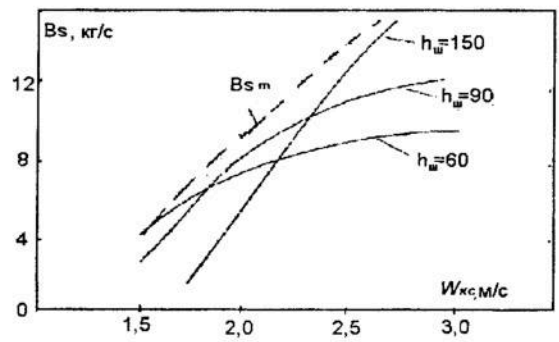

Рис. 8. Расход потока частиц в кипящем слое

Схема с направленным дутьем наиболее перспективна для котлов с топками кипящего слоя, работающих на каменных углях. Картина течения аппроксимирована профилем скорости частиц по высоте слоя *Z*:

$$U_S = 2\sqrt{W - 1,25}\left(1 - \frac{2Z}{H_*} + \frac{Z^2}{H_*^2}\right), \text{ м/с}, \quad H_* = 200 \text{ мм}.$$

Расход частиц на 1 п.м ширины потока для условий опыта (эта корреляция показана пунктиром на рис. 6) равен $B_{\text{см}} = \sqrt{W - 1,25}$, кг/с. Оценочно в придонной области на крупные куски создается динамическое усилие 2...3 н/см^2 (2000...3000 кг/м^2), сдвигающее оседающие куски угля и породы.

Для возврата частиц из уловителей при минимизации потока воздуха и износа транспортирующих каналов были разработаны и исследованы на стенде (рис. 9) различные конструкции аэромеха-

нических клапанов, которые рекомендуется применять в котлах наряду с эжекторами. В схеме производится разрыв стояка спуска частиц с помощью стакана. Через воздухораспределитель стакана подается регулируемый расход воздуха Q_0. Это позволяет управлять расходом ссыпающегося материала B_s в соответствии с расходной характеристикой (рис. 9) для различных исполнений клапана.

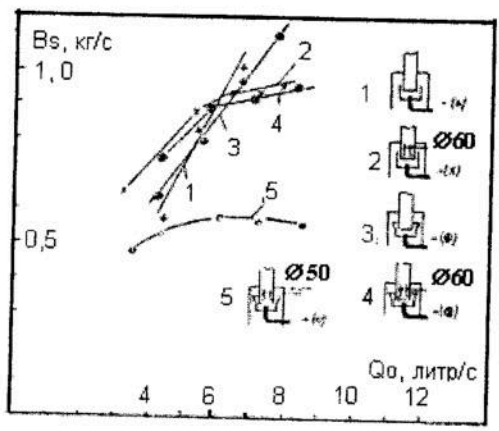

Рис. 9. Расходные характеристики

На основе рассмотренных выше обоснований схемы НТКС были успешно применены при реконструкции котлов на сжигание бурых углей: КЕ-25-24 в котельной Хорского гидролизного завода, ДКВр-20-13 (1 шт.) и ДКВр-10-13 (2 шт.) Лесосибирского канифольно-экстракционного завода, КЕ-10-14 АО «Стройзаказчик», г. Чита и МЖКХ, пос. Чегдомын, ДКВр-10-13 завода стройматериалов, с. Белогорье Амурской области, КВ-ТС-20 МЖКХ, г. Лесосибирск.

Схема НТКС успешно применена в утилизационных котельных для сжигания древесных отходов. В ООО «Ванино-Тайрику» установлено два новых водогрейных котла КЕВ-4. Новые котлы КЕ-10-14 установлены в котельной ОАО «Тернейлес», пос. Пластун Приморского края. Поставляются два водогрейных котла КЕВ-6,5 в котельную завода клееной древесины г. Томска. Реконструкции котла ДКВр-10-13 в котельной г. Дальнегорска Амурской области и котла КЕ-25-24-250 в котельной Пермского фанерного завода особенно эффективны, так как отходами замещен мазут.

По схеме НТКС в котельной Теплоозерского цементного завода реконструированы котлы ТП-35У и ТП-30. В котельной АО

«Спасскцемент» реконструирован котел ТС-35. В этих П-образных котлах особенно эффективна схема с организацией вихревого движения в топке подачей вторичного дутья. Реконструированные котлы ТС-42-40-440 № 7 и № 8 Читинской ТЭЦ-2 обеспечивают повышение мощности на 20 % и высокие технико-экономические показатели [23]. Планируется реконструкция всех остальных котлов Читинской ТЭЦ-2 и одного котла Первомайской ГРЭС.

С применением НТКС освоено производство котлов КВ-1,6-95КС, КЕ-25-14ПС и КЕ-10-14ПС.

Касаясь перспектив, следует отметить успешное опытное сжигание в кипящем слое водоугольных топлив, промышленно приготовленных из кузнецкого угля Д и из шламов шахты Тырганская (г. Прокопьевск). Горение было устойчивым, механический недожог мал – 1,7...4,5 %.

Важной для большинства городов России является утилизация осадка сточных вод (ОСВ). По проведенным опытам, в исходном виде и даже подсушенный на воздухе ОСВ при подаче в разогретый КС плохо воспламеняется. Его горение сопровождается большим выносом мелочи (до 20...50 %), горение неустойчивое. В ходе исследований была предложена технология и получены гранулы, в том числе с влажностью исходного ОСВ, удовлетворяющие специфическим требованиям работы кипящего слоя. Устойчивое горение имело место при широком диапазоне варьирования определяющих параметров. Механический недожог был снижен до 1...4 %, что предопределяет улучшенные экологические показатели схемы огневого обезвреживания и утилизации ОСВ. Оценочно реконструкция котла КЕ-4-14 позволяет обезвреживать до 4...3,6 т/ч ОСВ. Резервное топливо – бурый уголь. Удаление золы – в гранулированном виде.

ВЫВОДЫ

1. На основании имеющегося в НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» 27-летнего опыта предложено комплексное решение вопросов в виде концепции топки НТКС. При внедрении НТКС используются преимущественно технические и технологические возможности Бийского котельного завода.

2. Важная роль отводится типу топлива. Изучено поведение углей при внутрицикловой переработке и горении в кипящем слое, так как это предопределяет конкретные особенности организации топочного процесса.

3. На стендах огневого моделирования исследованы схемы с гравитационной, инерционной и центробежной сепарацией циркулирующих частиц. Наиболее эффективна схема НТКС с центробежным улавливанием.

4. На псевдоожижение и аэродинамику НТКС влияет фракционный состав, за счет топливоподготовки и сепарации частиц нужно стремиться к поддержанию мелкофракционного состава слоя. Для псевдоожижения и удаления крупных кусков породы исследованы решетки с направленным дутьём.

5. Наличие кипящего слоя принципиально изменяет аэродинамику, по опытам и численному моделированию, циркулирующие частицы в надслоевом объеме индуцируют особую аэродинамическую обстановку. Отмечено сильное взаимодействие крупных и мелких частиц.

6. Рециркуляция мелочи – важный момент в схеме организации НТКС. Для её организации разработаны встраиваемые в профиль котла уловители и аэромеханические клапаны.

7. На основе схем НТКС были успешно проведены НИЦ ПО «Бийскэнергомаш» реконструкции котлов на сжигание бурых местных углей: КЕ-25-24, ДКВр-20-13, ДКВр-10-13 (3 шт.), КЕ-10-14 и КВ-ТС-20. Реконструированы П-образные котлы ТС-35 и ТП-35 (4 шт.). Котлы ТС-42-40-440 № 7 и № 8 Читинской ТЭЦ-2 обеспечивают повышение мощности на 20 % и высокие технико-экономические показатели.

8. Схема НТКС успешно применена для сжигания древесных отходов в котлах КЕВ-4 (2 шт.), КЕВ-6,5, КЕ-10-14 (2 шт.), ДКВр-10-13 и КЕ-25-24-250. Показана перспективность НТКС для сжигания ОСВ и др. отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сидоров А.М, Пузырев Е.М, Скрябин А.А.* Маштаков А.Н. Применение новых технологий при реконструкции энергетических котлов и в котлах Бийского котельного завода. Тр. 4-й Междунар. выставки – конгресса «Энергосбережение–2001» - Томск.: Изд-во ТомЦНТИ, 2001.

2. *Пузырев Е.М.* Организация топочного процесса в кипящем слое. Обзор. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. Сер. 3. Выпуск 12. – С. 36.

3. *Пузырев Е.М., Стропус А.В.* и *др.* Топка с циркулирующим слоем. Патент № 1645759. Бюл. № 16, 91.

4. *Пузырев Е.М.* Устройство для сжигания топлива. Патент № 1179017. Бюл. № 34. 85.

5. *Пузырев Е.М., Лихачева Г.Н.* Система подготовки и сжигания топлива. Патент № 1291792. Бюл. № 7. 87.

6. *Пузырев Е.М.* Устройство для газификации твердого топлива. Патент № 1214988, Бюл. № 8. 88.

7. *Пузырев Е.М.* Топка с кипящим слоем. Патент № 1096449. Бюл. № 21. 84.

8. *Пузырев Е.М.* Термоконтактная сушка в кипящем слое. Труды Всесоюзной конференции «Техника псевдоожижения (кипящего слоя) и перспективы её развития». Изд-во НИИТЭХИМ, Черкасы, 1988.

9. *Пузырев Е.М., Сидоров А.М.* Исследование процессов сушки и выхода летучих из угольных частиц в топке кипящего слоя // Теплоэнергетика. – 1988. – № 3.– С. 55–57.

10. *Пузырев Е.М., Пронь Г.П., Сидоров А.М.* и *др.* Механизм формирования механического недожога при сжигании угля в кипящем слое // Горение органического топлива. – Ч. 2, ИТФ СО АН СССР. – Новосибирск: 1985. – С. 157–161.

11. *Пузырев Е.М., Кротов О.Г., Сидоров А.М.* Котельный агрегат с циркулирующим слоем топлива. Патент №1442803. Бюл.45, 88.

12. *Пузырев Е.М., Сидоров А.М., Стропус А.В.* Котел с циркулирующим слоем. Патент № 1772523. Бюл. № 40, 92.

13. *Пузырев Е.М.* Топка с кипящим слоем. Патент № 1359565. Бюл. № 46, 87.

14. *Пузырев Е.М., Сидоров А.М., Соколов Ю.В.* Топка. Патент № 2006745. Бюл. № 2. 94.

15. *Сидоров А.М., Пузырев Е.М.* Способ сжигания. Патент № 2006746. Бюл. № 2. 94.

16. *Пронь Г.П., Фурсов И.Д., Гейм С.Б.* Повышение надёжности поверхностей нагрева котлоагрегатов с кипящим слоем // Тез. докл. «Проблемы загрязнения и очистки наружных поверхностей нагрева паровых котлов». – Батуми, 1988. – С. 81.

17. *Алексеенко С.В.* Аэродинамические эффекты в энергетике. Препринт 216–90 / ИТФ. – Новосибирск. – 58.

18. *Пузырев Е.М., Стропус В.В., Сидоров А.М., Ильин Ю.М.* Реконструкция котлов для сжигания угля в циркулирующем слое // Теплоэнергетика. – 1993. – № 9. – С. 14–16.

19. *Барский М.Д.* Фракционирование порошков. – М.: Недра, 1980. - 342.

20. *Пузырев Е.М., Кисляк С.М., Сидоров А.М.* Пылеуловитель лабиринтного типа. Патент № 1674910.. Бюл. № 33. 91.

21. *Пузырев Е.М., Кисляк С.М., Алтухов Ю.А.* Исследование эффективности улавливания лабиринтного золоулавливателя (ЛЗУ) // Сибирский физико-технический журнал. – 1991. – Вып.5 – С. 142–144.

22. *Стропус В.В., Упоров А.П., Сукновальник М.Х., Горелик В.И., Пузырев Е.М.* Исследование сепарации из кипящего слоя крупных частиц и разработка решетки транспортирующего типа // Тез. докл. «Сжигание и газификация твердых топлив в кипящем слое». – Свердловск, УПИ. – 1986. – 73.

23. *Тихонов С.Б., Беломестнов Ю.А.* Новая технология сжигания бурых углей в топках с низкотемпературным кипящим слоем с вертикальным вихрем // Электрические станции. – 2001. – № 11. – С. 28–30.