УДК 621.438:621.311.22

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОПОЧНОГО КОНТУРА КОТЛОВ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Рябов Г.А., Фоломеев О.М.

ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлены данные по обоснованию основных зависимостей для расчета гидродинамики топочного контура, включая профиль концентраций, расход циркулирующего материала, улавливание частиц на выходе из топки, улавливание частиц в сепараторах, гидродинамики стояков и затворов. Дано описание зависимостей для расчета теплообмена к экранам. Дан анализ ряда известных моделей расчета котлов с ЦКС. Дано краткое описание методических подходов при проведении конструкторского и поверочного расчета котла с ЦКС.

ВВЕДЕНИЕ

В России до сих пор не была разработана программа теплового расчета котлов с ЦКС. Использование известных программ расчета традиционных пылеугольных котлов («ТРАКР», «Бойлер-дизайнер»), основанных на рекомендациях Нормативного метода расчета паровых котлов, дает ошибочные результаты. Основное отличие котла с ЦКС заключается в особенностях гидродинамики и теплообмена в топке, наличии системы улавливания и возврата. Новыми являются рекомендации по выбору скорости в топке, определению характеристик сепараторов и системы удаления и возврата золы. ОАО «ВТИ» в конце прошлого века разработало оригинальную методику расчета топочного контура котлов с ЦКС. Она базируется на собственных опытных данных и обобщении результатов зарубежных исследований. С тех пор эта методика постоянно совершенствуется и опробована путем сопоставления расчетных данных с показателями ряда зарубежных котлов с ЦКС. При этом конвективная часть котла рассчитывается по известным программам расчета.

Зарубежные программы расчета котлов с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), как правило, разрабатываются фирмами-поставщиками котлов и носят закрытый характер. Они базируются на многочисленном экспериментальном материале промышленных и стендовых исследований и также постоянно совершенствуются. Наша методика пока еще не достаточно обоснована для некоторых отечественных топлив (наибольший опыт имеется по сжиганию АШ и базируется на широко известных совместных работах Института угольных технологий АНУ и Казнииэнергетики.). Вместе с тем она может служить базой для разработки программ расчета отечественных котлов с ЦКС и будет уточняться по мере накопления опыта сжигания различных топлив в пилотных установках и промышленных котлах.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ТОПКЕ КОТЛА С ЦКС

Начиная с 1989 г. в ОАО «ВТИ» начались систематические экспериментальные и расчетно-аналитические исследования по научному обоснованию использования технологии ЦКС. В этих работах принимали участие Институт проблем энергосбережения АН Украины (г. Киев), КазНИИЭнергетики (г. Алма-Ата), Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург), Институт теплофизики СО РАН (г. Новосибирск), Московский энергетический институт и другие организации. За это время в ОАО «ВТИ» была создана экспериментальная база с двумя крупными аэродинамическими стендами и огневой установкой. Наибольшее внимание уделялось изучению вопросов гидродинамики топочного контура и тесно связанных с ними вопросов теплообмена, улавливания и возврата частиц, а также смешения вторичного воздуха с сильно запыленным потоком. В 60-х годах в СССР были заложены фундаментальные основы гидродинамики и тепломассообмена псевдоожиженного слоя. Широко известны работы С. С. Забродского, О. М. Тодеса, М. Э. Аэрова, Н. И. Гальперина, В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова. Их результаты использованы в разработке и внедрении аппаратов с кипящим слоем (КС)

© Рябов Г.А., Фоломеев О.М.

химической промышленности и металлургии. Некоторые из них также использовались при реконструкции небольших котлов с КС. Вопросы гидродинамики ЦКС в это время не были достаточно изучены, в особенности, применительно к условиям работы топочных устройств. Это направление начало развиваться в ОАО «ВТИ» в конце 90-х годов в сотрудничестве с другими исследовательскими организациями и высшими учебными заведениями. Эти вопросы являются ключевыми для организации эффективного низкотемпературного сжигания различных топлив и условий образования и подавления вредных выбросов. При этом следует отметить, что процессы гидродинамики, по причине сложного характера движения двухфазного потока полидисперсных частиц, не описываются простыми математическими зависимостями. Имеющиеся корреляции носят в основном эмпирический характер и зачастую базируются на данных, полученных на небольших установках. Поэтому комплексное исследование указанных вопросов представляется, безусловно, актуальным.

Важные исследования были проведены на установке ВТИ. На ней одновременно применяются метод определения локальных массовых потоков частиц с помощью S-образного изокинетического зонда [1], метод определения локального теплообмена к датчикам при их нагреве [2], использовались также миниатюрные турбинные расходомеры и различные датчики концентрации. Совместно с МЭИ проводились исследования распространения струй вторичного воздуха в сносящем потоке с помощью метода термозондирования при слабом подогреве вторичного воздуха. В ИТФ СО РАН разработан и использован на стенде ОАО «ВТИ» новый оптико-волоконный датчик со скрещивающимися световодами и дифференциальный лазерно-доплеровский анемометр [3]. Кроме того, определялись средние концентрации частиц (по методу измерения давлений по высоте установки), расход материала по внешнему контуру, выполнялся анализ фракционного состава проб, определялись параметры ожижения, эффективность улавливания в сепараторах и характеристики движения потока в опускном стояке.

Первыми практическими рекомендациями, полученными на аэродинамической установке, явились зависимости для расчета профиля концентраций потока по высоте топки. При построении зависимости в логарифмических координатах легко выделить две зоны: зону турбулентного слоя в нижней части и зону надслоевого пространства. Увеличение массы слоя (перепада давлений в модели) приводит к росту концентраций, также как и увеличение скорости воздуха. Для обобщения была принята степенная зависимость изменения концентрации по высоте и определены опытные коэффициенты [1]. Для режима ЦКС характерным является слабая зависимость (или ее отсутствие) размеров частиц от высоты. Оказалось, что при скорости воздуха более 4 м/с для песка и 5 м/с для анионита размеры отобранных из потока частиц близки к размерам загруженных частиц. При этом фракционный состав частиц, движущихся вверх в пристенной зоне и в центре потока одинаков [4].

Важной характеристикой котла с ЦКС является расход материала по внешнему контуру. Он зависит от эффективности улавливания в сепараторе, условий выхода из топки в сепаратор, скорости газа, размеров частиц и массы слоя (перепада давлений). Как показано в [5], влияние скорости газа близко к квадратичному (около 1,8). Для материалов с одинаковой плотностью уменьшение среднего размера с 800 до 200 мкм при одинаковой скорости воздуха приводит к увеличению выноса в 3-5 раз.

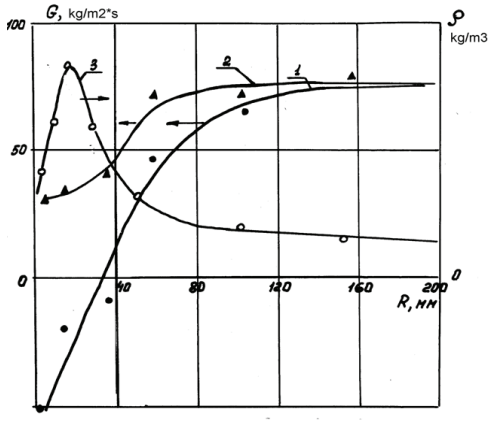

Рис.1 Типичный профиль массового потока нетто (1), подъемного потока (2) и плотности (3) в зависимости от расстояния от стенки модели

Рост массы слоя приводит к увеличению выноса. Это связано с вовлечением большего абсолютного количества частиц в циркуляцию при той же относительной доле в слое в соответствии с фракционным составом. Расход циркулирующих частиц всегда ниже, чем расход частиц, движущихся вверх в зоне выхода из топки, вследствие влияния сепарационного эффекта потолка топки и поворота на входе в циклон. Частицы, уловленные в верхней части топки, образуют внутреннюю циркуляцию, которая возрастает к нижней части топки за счет частиц, выпадающих из центральной зоны топки в пристенную зону опускного потока. Таким образом, зная подъемный (или опускной) поток частиц и КПД улавливания в верхней части топки, можно полностью рассчитывать все основные

показатели гидродинамики топки. На рис.1 (данные [6]) показан типичный профиль подъемных массовых потоков частиц и потока нетто в зависимости от расстояния от стенки модели. Там же приведены данные об относительной объемной концентрации потока (отношение локальной концентрации к среднеинтегральной), полученные с помощью дифференциального лазерно-доплеровского анемометра с оптико-волоконными датчиками.

Исходя из указанных данных, можно заключить, что резкое увеличение концентрации соответствует зоне значительного снижения подъемного и возрастания опускного расхода материала. Ширина пристенной зоны может быть определена исходя из условия: поток нетто равен нулю. Эта ширина несколько меньше, чем ширина зоны резких изменений концентраций.

В [7] показано, что на границе опускной зоны концентрация потока соответствует средней по сечению. Наиболее представительные эмпирические рекомендации для расчета ширины опускной зоны даны в [8]. Наши данные согласуются с рекомендациями [8]. Опускной расход частиц в сечении перед выходом из топки ($G_{оп}^{вых}$) в сепаратор определяет так называемый КПД улавливания в верхней части топки:

$$\eta_n = \frac{G_{оп}^{вых}}{G_n^{вых}} = \frac{G_n^{вых} - G_ц}{G_n^{вых}} \qquad (1)$$

Величина $\eta_п$ существенно зависит от геометрических характеристик зоны выхода из топки и может меняться в широких пределах от 10% и более. Для условий наших опытов эта величина составляла 30-50 %. Для промышленных котлов она равна 20-30 %.

Оказалось, что подъемный и опускной потоки почти линейно возрастают с увеличением концентрации. Обработка данных по подъемным потокам может быть выполнена с учетом простой зависимости, связывающей скорость частиц и их расход:

$$G_n = \rho_p \cdot V_p = \rho_p \frac{U_o}{\psi} \cdot \frac{1-\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}} \qquad (2),$$

где ρ_p –плотность частиц, кг/м^3; U_p – скорость частиц; U_o – скорость газа, приведенная к полному сечению, м/с; $\bar{\varepsilon}$ - средняя порозность; ψ - коэффициент скольжения ($\psi = U_o / \bar{\varepsilon} \cdot U_p$)

Определяя среднюю порозность через среднюю концентрацию частиц в потоке $\bar{\rho}$, окончательно получаем:

$$G_n = \frac{U_o(\bar{\rho} - \rho_г)}{\psi} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_p - \rho_г} \qquad (3)$$

Коэффициент скольжения может быть записан в виде функции от критериев Фруда по скорости воздуха и размеру установки (Fr_d) и по скорости витания (транспортной скорости Fr_t). Обработка наших опытных данных позволила получить следующую зависимость:

$$\psi = 1 + 0{,}057 Fr_d^{1{,}474} \cdot \left(1 - \bar{\varepsilon}\right)^{-0{,}002} + 0{,}69 Fr_t^{0{,}051} \qquad (4)$$

Зависимости (3), (4) в сочетании с рекомендациями [2] по расчету аксиального профиля концентраций позволяют определить расход подъемного потока частиц. Если известно КПД улавливания в верхней части топки, то система для расчета основных показателей аэродинамики ЦКС оказывается замкнутой.

На рисунке 2 дано сопоставление расчетных и опытных данных по подъемным расходам частиц. Там же приведены опытные данные, полученные на котле ТЭС Гарданэ во Франции [7], крупной пилотной установке в Швеции и еще двух промышленных котлах с ЦКС, приведенные в [8], а также материалы диссертационной работы [9], полученные на аэродинамическом стенде при нормальных условиях и на пилотной установке мощностью 12 МВт.

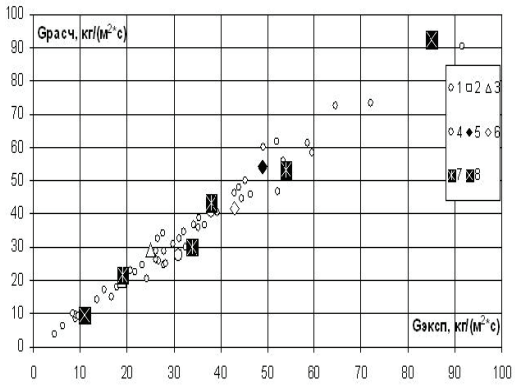

Рис.2 Сопоставление расчетных (Gрасч) и экспериментальных данных (Gэксп) по подъемным расходам частиц

Обозначения:
1 – данные ОАО «ВТИ»,
2 – котел ЦКС в г.Фленсбург [8],
3 – котел ЦКС в г.Дуйсбург [8],
4 – установка 12 МВт [7],
5 – котел ЦКС [7],
6 – котел ЦКС в г.Фленсбург [7],
7 – холодная модель ЦКС [9],
8 – пилотная установка ЦКС [9]

В [10] предложена зависимость для оценки КПД улавливания частиц в зоне выхода (η_t) из топки. Считалось, что η_t зависит от числа Стокса, концентрации частиц и геометрических характеристик зоны выхода из топки. На рисунке 3 приведены опытные данные по КПД потолка

топки, полученные на двух установках с разными условиями входа в циклон или швеллерковый сепаратор.

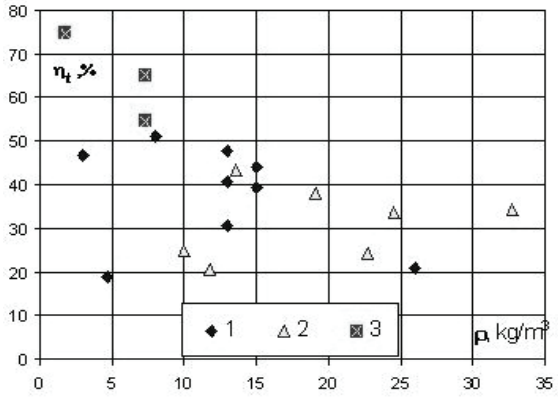

Рис.3 КПД потолка топки в зависимости от концентрации частиц в верхней части топки

Обозначения:
1- свободный вход в патрубок циклона,
2 – вход в швеллерковый сепаратор,
3 – узкий входной канал на модели 0,7*0,7 м

Для определения локального теплообмена использовались миниатюрные датчики, описанные в [11].

Экспериментальные данные о локальном теплообмене свидетельствуют, о существенном влиянии плотности потока (объемной концентрации) и размеров частиц. Расположение датчика по высоте установки (при постоянной объемной концентрации) не влияет на теплоотдачу. Изменение скорости воздуха также не приводит к существенному изменению теплоотдачи. По-видимому, при увеличении скорости газа теплообмен конвекцией увеличивается. Однако при большой концентрации в пристенной зоне характерная структура газового потока нарушается, при этом конвективная составляющая теплообмена становится близкой к расчетной для пузырькового кипящего слоя. Последняя не зависит от скорости газа, а определяется размерами частиц.

Теплообмен к настенным экранам тесно связан с гидродинамикой топки, в особенности с движением потока вблизи стен топки. Полное описание и вывод расчетных зависимостей для конвективно-кондуктивного теплообмена приведены в [12], [4]. Новыми подходами в предложенных моделях является учет конвективного теплообмена при низких концентрациях потока по обычным зависимостям для конвекции при продольном омывании поверхностей нагрева и расчет контактного теплообмена по объемной концентрации в пристенной зоне.

Разработанная методика расчета конвективно-кондуктивного теплообмена [12] учитывает конвективную теплоотдачу (в зависимости от режима движения), теплообмен при соударении со стенкой и контактное сопротивление, которое существенно только при больших концентрациях потока (>300 кг/м^3). При этом в качестве определяющей принята объемная концентрация в непосредственной близости от стен (1-ε_c). Для подтверждения положений разработанной модели были определены значения концентраций в пристенной зоне на основе опытных данных о локальном теплообмене при значениях объемных концентраций, характерных для надслоевого пространства котлов ЦКС (0,2-2 %). Результаты этих расчетов в виде зависимости объемной концентрации в пристенной зоне от средней концентрации приведены на рисунке 4.

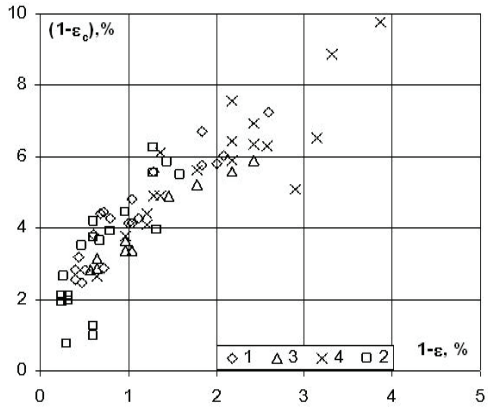

Рис.4 Результаты расчета объемной пристенной концентрации (1-ε_c) по данным исследований теплообмена

Обозначения:
1 – песок 230 мкм нижний датчик,
2 – песок 230 мкм верхний датчик,
3 – анионит 700 мкм,
4 – анионит 550 мкм

Исходя из анализа структуры потока в пристенной зоне, можно считать, что при высоких объемных концентрациях (переходная зона и турбулентный кипящий слой) концентрация в пристенной зоне близка к средней по сечению. При уменьшении средней концентрации уменьшается ширина пристенной зоны, ухудшается перемешивание по сечению и концентрация в пристенной зоне возрастает по отношению к средней [13].

Изложенные выше материалы позволили создать новый базовый подход к расчету гидродинамики и теплообмена в котлах с ЦКС.

РАСЧЕТ СЕПАРАТОРОВ ЗОЛЫ И СИСТЕМЫ ВОЗВРАТА. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ КОТЛА С ЦКС

Характерной чертой котлов с циркулирующим кипящим слоем является наличие устройств для улавливания циркулирующей золы и систем возврата материала в топку. Эффективность работы этих устройств оказывает определяющее влияние на большинство показателей котла. Важным является наличие определенного количества циркулирующих частиц, которые могут выноситься из топки, улавливаться и возвращаться в слой. Фактически эффективность золоуловителя определяет кратность циркуляции и размер частиц. При высоком КПД уловителей (порядка 99,5 %) изменение КПД всего на 0,1 % увеличивает циркуляцию в 1,2 раза.

В работе [14] рассмотрены вопросы сепарации частиц в аппаратах циклонного типа, а также в швеллерковых уловителях. Кроме того, выполнены исследования условий работы опускных стояков и пневматических клапанов, позволившие определить их пропускную способность и дать рекомендации по расчету и эксплуатации.

Основная часть исследований проведена на аэродинамическом стенде ОАО «ВТИ», снабженным циклоном диаметром 0,54 м и высотой 1,44 м. Отвод материала осуществляется с помощью стояка сечением 0,15×0,15 м и пневматического клапана. В последней серии опытов на выходе из топки в горизонтальном газоходе был установлен швеллерковый уловитель с собственным бункером, стояком и L-клапаном. В процессе опытов скорость воздуха в топке менялась от 2,5 м/с до 7,7 м/с, а концентрация на входе в уловитель от 0,07 до 3,5 кг/м^3. Эффективность улавливания во всех режимах превышала 99 %.

Анализ многочисленных отечественных и зарубежных зависимостей для расчета фракционного КПД показал, что одной из наиболее общих моделей является трехзонная модель движения, получившая свое развитие в [15] для высокотемпературных циклонов. В этой модели рассматривается три зоны: зона входа, опускного потока и подъемного потока. Турбулентное смешение определяется по профилю радиальных концентраций в каждой зоне с учетом обмена частиц. Таким образом, в анализ включаются реальная геометрия циклона, учитывается обмен частиц между зонами 2 и 3, распределение времени релаксации. При этом в зонах 1 и 2 газ и частицы движутся вниз, а в зоне 3 вектор скорости газа направлен преимущественно вверх. Обработка собственных данных и данных других авторов позволила получить ряд эмпирических коэффициентов, обеспечивших удовлетворительное соответствии расчетов и опытов по фракционному КПД. Для улавливания в швеллерковых сепараторах предложены опытные зависимости.

Работа системы возврата уловленной в сепараторах золы во многом определяет надежность работы котла ЦКС. Обычно система возврата состоит из вертикального стояка, пневмозатвора и короткой течки возврата золы в топку. Важным является правильный выбор размеров (диаметр, высота) стояков и режимов псевдоожижения. Визуальные наблюдения за движением материала в стояке свидетельствуют о том, что в его нижней части происходит движение в плотной фазе, а выше уровня слоя в разбавленной фазе. В ряде опытов на песке (при низком уровне слоя в стояке и большой массе песка в топке) наблюдается скачкообразный режим движения с возникновением пузырей и проскоком газа вверх. Границы предельных режимов, при которых возникают крупномасштабные пульсации, могут быть оценены с помощью уравнений движения по контуру циркуляции

Исходя из опытных данных, можно сделать важный практический вывод о необходимости поддержания уровня слоя в стояке не более 0,4 от его высоты при ограничении скорости воздуха на псевдоожижение в стояке порядка 3-6 W_{mf}. В рекомендуемых режимах пропускная способность стояка достигала 1800 т/ч·м^2 (большие значения не были получены по причине перегрузки циклона). Для расчета диаметра стояка можно рекомендовать значение опускной скорости материала ≈0,1 м/с.

Результаты работы заложили основы отечественных методов проектирования систем возврата котлов с ЦКС.

В нашем подходе к расчету котла с ЦКС, также как и известной программе CFBCAD [16] применяется метод экспертной оценки и выбора ряда параметров (недожог, температура на выходе из топки, избыток воздуха, доля первичного воздуха, доля золы уноса и другие) в зависимости от вида топлива и модификации технологии ЦКС. Эти рекомендации основаны на результатах опытного сжигания топлив и зарубежном опыте эксплуатации котлов с ЦКС. В разработках использовались Данные УПИ, института угольных технологий НАН Украины, включая недавние работы [17, 18], в которых показаны возможности и условия эффективного сжигания низкореакционных топлив в ЦКС. Метод расчета выгорания топлива, учитывающий, по крайней мере, в первом приближении эти сложные процессы был разработан в [19] как применительно к стационарной задаче, так и в нестационарной постановке. Также предложены рекомендации и зависимости для оценки экологических показателей, расходу известняка.

Общий подход к расчету котла базируется на рекомендациях нормативного метода теплового расчета паровых котлов. При этом учитываются потери тепла на реакциях разложения известняка и образования сульфата кальция. При поверочном расчете конвективных поверхностей нагрева рекомендовано использование известной программы «Бойлер-дизайнер». Расчеты, выполненные в соответствии с указанными методиками, показали возможность определения основных характеристик проектируемых котлов и удовлетворительную сходимость данных поверочного расчета. Рекомендации и программы расчета будут уточняться по мере накопления опыта сжигания отечественных углей на экспериментальных установках и промышленных котлах.

ВЫВОДЫ

- На основе исследований гидродинамики и теплообмена в моделях котлов с ЦКС с учетом обобщения ряда зарубежных данных предложен базовый подход к расчету топок котлов с ЦКС.
- Разработаны рекомендации по определению основных размеров и показателей уловителей золы и системы возврата котлов с ЦКС.
- Расчеты, выполненные в соответствии с указанными методиками, показали возможность определения основных характеристик проектируемых котлов и удовлетворительную сходимость данных поверочного расчета. Рекомендации и программы расчета будут уточняться по мере накопления опыта сжигания отечественных углей на экспериментальных установках и промышленных котлах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов Г.А., Фоломеев О.М. Исследование гидродинамики и массообмена на экспериментальной установке с циркулирующим кипящим слоем. Теплоэнергетика, №6, 1998 г., стр. 8÷12.
2. Рябов Г.А., Курочкин А.И., Фоломеев О.М. Исследование теплообмена к настенным экранам на аэродинамической модели котла ЦКС, Теплоэнергетика, №8, 1999 г.
3. Evseev A.R., Orlov V.A., Ryabov G.A. Measurements of velocity and concentration of particles in circulating fluidized bed by differential Doppler anemometer with fiber optics. Proc. of the 7-th Int. Conf. on Laser Anemometry, Sept. 8÷11, Karlsruhe, Germany, 1997.
4. Фоломеев О.М., Трухачев С.Н., Рябов Г.А. Исследование гидродинамики и тепломассообмена применительно к условиям работы надслоевого пространства котлов с циркулирующим кипящим слоем., Теплоэнергетика №10, 2000 г.
5. Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Трухачев С.Н. Экспериментальное исследование процессов теплообмена и гидродинамики на аэродинамической модели котла с ЦКС. Минский международный форум по тепломассообмену. ММФ-4, г. Минск, май 2000 г.
6. G.A. Ryabov, O.M. Folomeev, S.N. Trukhachev, D.A. Shapochnik, Solid mass fluxes in the exit region of CFB furnace, Proc. of 7th Int. Conf. on CFB, Niagara Falls, Ontario, Canada, 2002.
7. D.Shi, L.Reh, Wall-to-Bed Heat Transfer in Circulating Fluidized Bed, 5th Int. Conf. on CFB, 1997.
8. Leretaille P.-Y., Werther J., Briand P., Montat D. Modeling of hydrodynamics of large scale atmospheric circulating fluidized bed coal combustion. 15-th Int. Conf. on Fluid. Bed Comb., May 16-19, Savannah, USA.
9. Ge W., Lueche K., Hartge E.-U. , Yang L., Werther J. Prediction of 3-d flow structure in circulating fluidized bed boilers. Proc. of the 6-th Int. Conf. on CFB, Wurzburg, Germany, August 22L27, 1999, pp. 303÷308.
10. G.A. Ryabov, O.M. Folomeev, D.A. Shaposhnik, Solid separation in upper part of CFB riser, Proc. of the 8-th Int. Conf. on CFB, Hangzgou, China, May 10-13, 2005.
11. Г.А. Рябов, Курочкин А.И., Фоломеев О.М. Исследование теплообмена к настенным экранам на аэродинамической модели котла ЦКС, Теплоэнергетика, № 8, 1999 г.
12. Трухачев С.Н., Рябов Г.А. Инженерная методика расчета теплообмена к настенным поверхностям нагрева в топке с ЦКС. Минский международный форум по тепломассообмену. ММФ-4, г. Минск, май 2000 г., том VI, стр.24÷33.
13. Ryabov G.A., Folomeev O.M., Trukhachev S.N., "An Experimental Study of Hydrodynamics and Heat- Mass Transfer in CFB Model", Proc. of the 6th Int. Conf. on CFB, Wurzburg, Germany, August 22-27, pp. 373-378.
14. Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Шапошник, Исследование систем улавливания и возврата

на установках с циркулирующим кипящим слоем, Теплоэнергетика, № 8, 2002г.

15. Abrahamson J., Allen R.W.K. The Efficiency of Conventional Return-flow Cyclone at High Temperatures. Int. Chem. Eng. Symposium Series, № 99, Pergamon Press, 1987, pp 31-43.
16. Lafanechere L., Basu P., Jastin L., The effect of steam parameters on the size on the size and configuration of CFB boiler, Proc 13th Int Conf on FBC, Asme, Orlando, Florida, 1995.
17. Ю. П. Корчевой, А. Ю. Майстренко, Н. В. Чернявский и др., Сжигание углеродосодержащей золы уноса антрацитовых ТЭС в циркулирующем кипящем слое, Экотехнологии и ресурсосбережение, № 1, 2008, стр. 3 – 12.
18. А. Ю. Провалов, Сжигание отходов углеобогащения в циркулирующем кипящем слое, автореферат диссертации на соискание звания кандидата технических наук, Киев, ИУЭ НАН Украины, ноябрь 2008.
19. Кадников Б.Л., Давыдов Н.И., Рябов Г.А., Шмуклер Б.И. Моделирование физико-химических процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем. Теплоэнергетика, №5, 1994, стр. 64÷70.