

УДК 662.929+66.096.5

## **НАПРАВЛЕННОЕ ВЕРТИКАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ТОПКЕ КОТЛА С КИПЯЩИМ СЛОЕМ**

**В.А. Микула, Е.И. Левин, Б.В. Берг, П.В.Осипов, Т.Ф.Богатова**

*Уральский государственный технический университет – УПИ, г.Екатеринбург, Россия*

Одной из основных проблем, возникающих при использовании технологии кипящего слоя, является сложность обеспечения времени, требуемого для полного сгорания подаваемого горючего материала в объем кипящего слоя, обусловленная несовершенством существующих способов загрузки топлива.

Для управления временем пребывания топлива в слое по технологии авторов в его объем встраивается вертикальный клиновидный канал, состоящий из нескольких ярусов наклонных пластин.

Выполнены эксперименты на холодной плоской модели [1], которые проводились для выяснения механизма формирования направленного движения зернистого материала и определения диапазона изменения скоростей направленного движения, определяющих указанное время пребывания, и факторов, оказывающих на него наибольшее влияние. Установлено, что основные конструктивные и режимные факторы, оказывающие наибольшее влияние на направленное движение дисперсного материала, это: ширина канала; величина зазора между пластинами одного ряда; количество ярусов пластин; соотношение площадей горизонтального сечения канала и свободного слоя; высота кипящего слоя; объем порции подаваемого топлива; вертикальное расстояние между ярусами; скорость псевдооживления; размеры частиц слоя и топлива. Получены зависимости влияния этих факторов на скорость направленного движения дисперсного материала [1-4].

Эксперименты по определению влияния размеров аппарата и температуры кипящего слоя на время пребывания подаваемого в кипящий слой материала были проведены с целью проверки применимости данных, полученных на холодной плоской модели для установок по сжиганию (т.е. для установок больших размеров, работающих при высоких температурах).

Наблюдения за движением метки в кипящем слое с клиновидным каналом проводились на плоской и цилиндрической установках. В качестве метки (по которой определялась интенсивность направленного движения) использовались деревянные бруски размерами 15x15x10 мм.

Конструкция плоской установки поперечным сечением 650x22 мм, которая была выполнена из оргстекла, представлена на рис.1, опыты на ней проводились при комнатной температуре. Высота установки – 600 мм. Толщина установки – 22 мм выбрана с расчетом, чтобы на прозрачной стенке было бы хорошо видно движение порции исследуемого материала. Материалом кипящего слоя являлся кварцевый песок со средним размером частиц 0,35 мм. Для создания направленного движения в псевдооживленном слое размещались симметрично два вертикальных ряда наклонных пластин [5] толщиной 6 мм размером 100x22 мм каждая, образующих клиновидный канал.

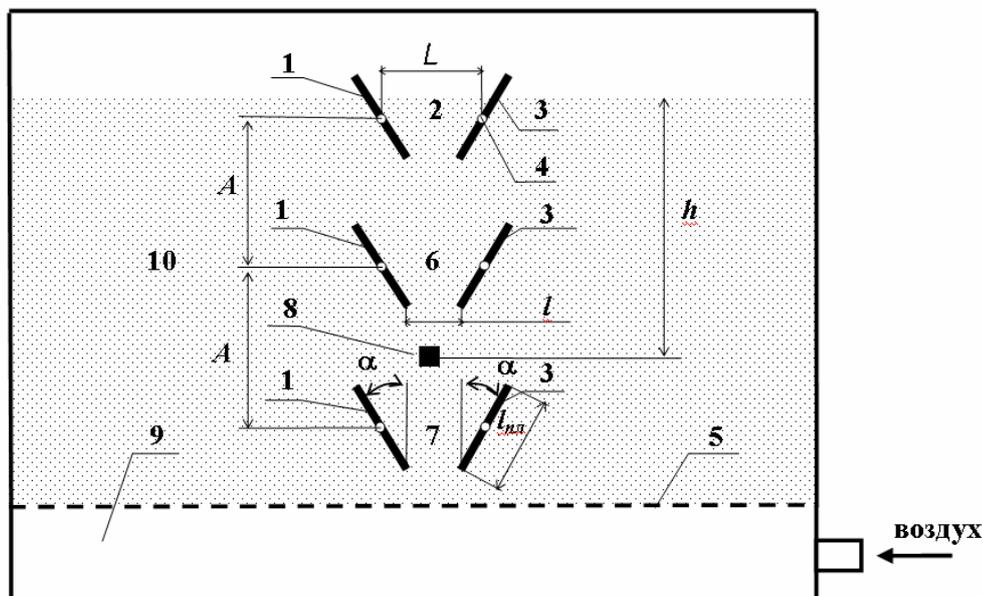


Рис.1. Схема «холодной» экспериментальной установки: 1, 3 – вертикальные ряды пластин; 2, 6, 7 – 1-, 2- и 3-й ярусы пластин; 4 – ось вращения пластины; 5 – воздухораспределительная решетка; 8 – деревянный брусок; 9 – короб подвода воздуха; 10 – псевдооживленный слой;  $L$  – горизонтальное расстояние между осями пластин одного яруса;  $l$  – эффективная ширина канала;  $l_{пл}$  – длина пластины.

Конструкция цилиндрической установки (топки) диаметром 200 мм представлена на рис. 2. В объем кипящего слоя помещался клиновидный канал 6, выполненный из металла. Геометрические характеристики канала: толщина канала 50 мм; вертикальное расстояние между ярусами наклонных пластин  $A = 100$  мм; горизонтальное расстояние между осями пластин  $L = 100$  мм; угол наклона пластин  $\alpha = 15^\circ$ ; 3 яруса.

Время циркуляции (время движения метки по контуру «верх канала – низ канала – поверхность свободного кипящего слоя») в цилиндрической установке определялось при изменении температуры кипящего слоя от 20 до 800 °С.

Значения времени циркуляции метки в плоской холодной установке находятся в том же диапазоне, что и в объемной установке: от 15 до 40 секунд (рис.3).

Эксперименты, результаты которых приведены на рис.3, показали, что установка клиновидного канала позволяет обеспечить устойчивое направленное движение топлива в глубинные зоны топки с кипящим слоем и при температурах более 260 °С. Кроме того, при высоких температурах сохраняется циклическое движение топлива по контуру *верх канала – низ канала – поверхность свободного кипящего слоя – верх канала*.

Среднее значение времени циркуляции метки  $\tau_{ц}$  изменяется с 30 до 60 секунд при росте температуры от 20 до 750 °С, поэтому можно считать, что скорость направленного движения в топке с кипящим слоем уменьшается вдвое по сравнению со скоростями, полученными на холодной плоской экспериментальной установке (соответственно, время пребывания топлива в канале увеличивается).

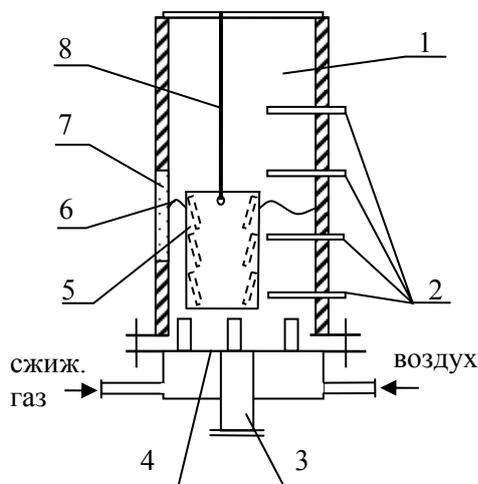


Рис. 2. Схема установки клиновидного канала в камеру сгорания топki экспериментальной установки:  
1 – топка с кипящим слоем; 2 – термопары; 3 – канал для спуска слоя; 4 – воздухораспределительная решетка; 5 – клиновидный канал; 6 – поверхность кипящего слоя; 7 – кварцевое стекло

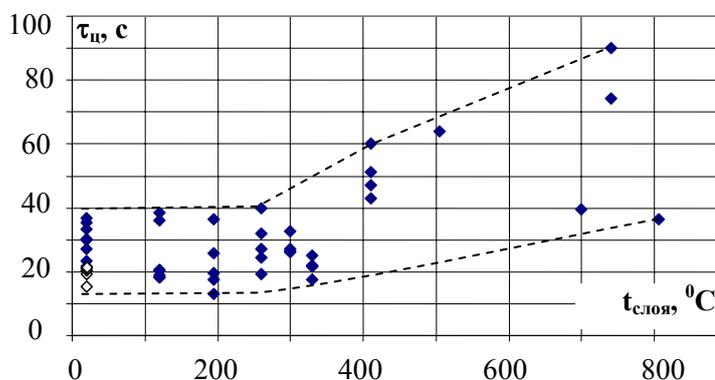


Рис.3. Исследование направленного движения зернистого материала при различных температурах слоя: 3 яруса;  $d_{ч}^{chl} = 0.35$  мм;  $W = 2,5 \div 3,5$ ;  $A = 100$  мм;  $L = 100$  мм;  $\alpha = 15^\circ$ ; метка – деревянный брусок  $15 \times 15 \times 10$  мм;  $\blacklozenge$  - цилиндрическая установка  $\varnothing 200$  мм;  $\diamond$  - плоская холодная установка; [---] - область экспериментальных значений

Для проектирования новых конструкций топок с кипящим слоем (для котлов тепловых электрических станций) были проведены оценки сжигания топлива в кипящем слое с клиновидным каналом. Для увеличения доли теплоты, которая выделяется в объеме кипящего слоя, а не в надслоевом пространстве, необходимо чтобы большее количество топлива выгорало в канале – при условии, что будет обеспечен необходимый для горения объем воздуха в канале.

Введем коэффициент  $K$ , который определяет степень выгорания топлива в канале:

$$K = \frac{m_m^{выг}}{m_m^0}, \quad (1)$$

где  $m_m^{выг}$  – масса выгоревшего в канале топлива,  $m_m^0$  – масса топлива, поданного в канал.

По полученным ранее экспериментальным данным (изменение скорости направленного движения, площади и периметра вертикального сечения угля в канале) были сделаны оценки степени выгорания угля в канале. При этом для определения размера частицы, до которого она выгорает в момент выхода из канала (через время  $\tau$ ), была использована формула А.И. Тамарина с сотрудниками [6,7], полученная на основании обработки экспериментальных данных по сжиганию коксовых частиц.

По разнице между исходным размером частицы угля и  $d_{ч}^m$  определялась масса выгоревшего в канале топлива  $m_m^{выг}$ .

На рис. 4 представлены результаты расчета коэффициента  $K$  для монофракционного топлива при различном количестве ярусов пластин клиновидного канала и различных диаметрах частиц топлива. Проведенные расчеты показали, что изменение объема загружаемой порции не оказывает значительного влияния на степень выгорания топлива. Это означает, что полученными зависимостями для расчета коэффициента  $K$  можно пользоваться с достаточной точностью как для случая непрерывной подачи топлива, так и при его подаче в виде отдельных частиц.

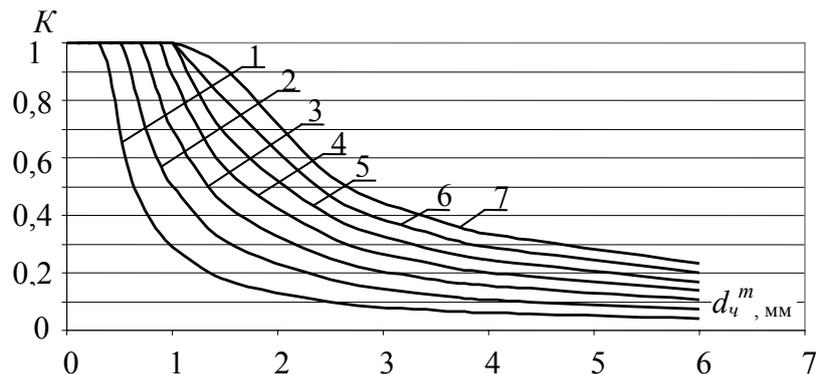


Рис. 4. Зависимость степени выгорания топлива в канале от размера частиц топлива и числа ярусов пластин канала:  $V_0 = 100 \text{ см}^3$ ; цифры над кривыми – число ярусов канала

Увеличение числа ярусов пластин клиновидного канала позволяет увеличить время пребывания топлива в канале, а значит, и повышается степень выгорания топлива (что подтверждается данными на рис.4).

Получены графические зависимости, позволяющие оценить улучшение выгорания топлива в кипящем слое с направленным движением топлива и в свободном слое без искусственно созданного канала. Как показывают опытные данные [1-4], часть теплоты топлива, сгорающего в свободном слое, может выделяться над слоем.

Также проведена оценка уменьшения уноса мелких топливных частиц при загрузке топлива через верхнюю часть канала (по сравнению со случаем подачи топлива на поверхность слоя без клиновидного канала). При этом снижаются потери теплоты, обусловленные уносом этих частиц. Сделанные расчеты показали, что для принятой скорости воздуха унос и недожог с ним могут быть полностью устранены при использовании частиц со средним размером более 0,4 мм.

С использованием полученных экспериментальных данных были разработаны рекомендации по использованию подачи материала (топлива) через клиновидный канал в топках котлов ТЭС. Предложенная схема топливоподачи может быть использована для котлов тепловых электрических станций малой мощности, сжигающих местные и низкокачественные виды топлив, на которых установлены паровые котлы паропроизводительностью до 20 т/ч. Котлы такой производительности будут использоваться не только в котельных, но и на ТЭС в связи с программой реконструкции котельных в ТЭС, закрепленной в материалах по энергетической стратегии России.

Для Бийского котельного завода на основе экспериментальных данных и полученных расчетных зависимостей была разработана схема реконструкции топок котлов ДКВР паропроизводительностью от 4 до 20 т/ч. Ниже представлена схема реконструированной топki на примере котла ДКВР-4-13 (рис. 5). Уголь забрасывателем 3 подается на поверхность слоя, попадает в один из каналов (сразу, либо через определенное время – из-за фонтанирования слоя) и, за счет направленного движения, проходит клиновидный канал 2. После выхода из канала недогоревшие частицы угля могут вновь подняться к поверхности слоя, но снова попадут в один из каналов. То есть, в кипящем слое создаются несколько контуров принудительной циркуляции. На основе экспериментальных данных и полученных расчетных зависимостей определены оптимальная конструкция и количество клиновидных каналов, что должно обеспечить максимальное рассеяние в канале, стабильную скорость направленного движения угля и равномерное распределение горючих по объему кипящего слоя.

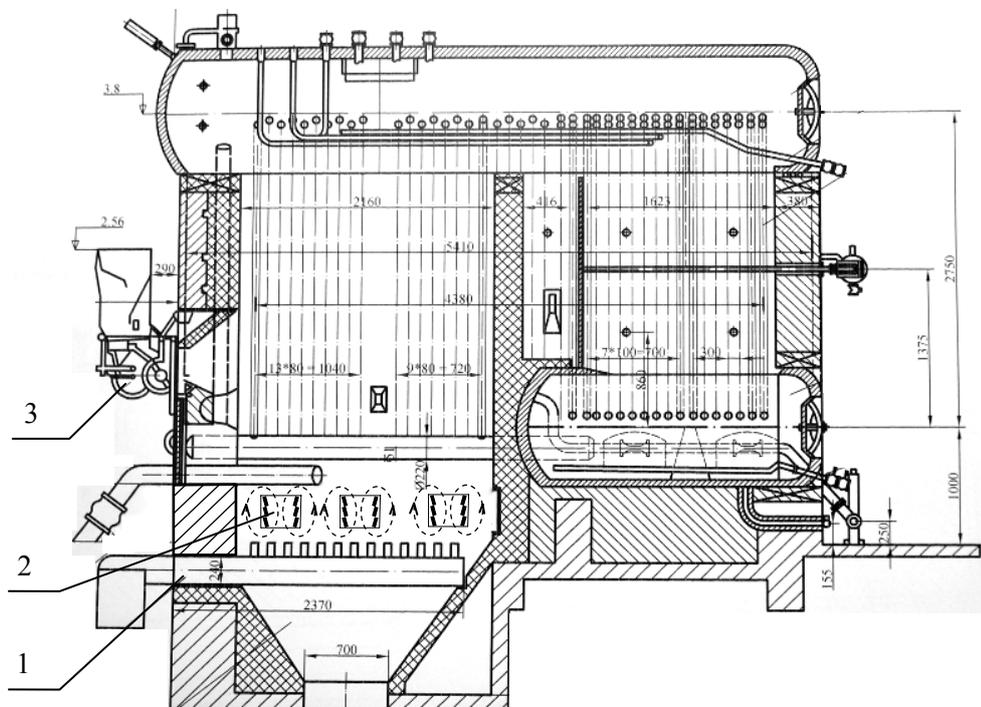


Рис. 5. Схема реконструкции топki котла ДКВР-4-13: 1– воздухораспределительная решетка; 2 – клиновидный канал; 3 – забрасыватель угля. Пунктиром показаны контуры принудительной циркуляции в кипящем слое

Установка девяти клиновидных каналов в топку котла ДКВР-4-13 позволит обеспечить горение угля во всем объеме слоя при подаче топлива забрасывателями на поверхность кипящего слоя. В этом случае в кипящем слое создаются несколько контуров принудительной циркуляции, и топливо, попадая на поверхность слоя, забрасывается в канал за счет фонтанирования. Выигрыш от использования такой схемы подачи топлива заключается в том, что выделение теплоты от сгорания угля происходит во всем объеме слоя; появляется возможность сжигания местных низкокачественных топлив.

Для использования осадков сточных вод, скапливающихся в отстойниках, в качестве топлива котлов выбрана соответствующая конструкция канала, позволяющая сократить объем дополнительного топлива, добавляемого для поддержания температуры кипящего слоя. При этом вытесняется дополнительное высококачественное топливо, необходимое для сжигания низкокачественных местных топлив и горючих отходов (например, осадков сточных вод) и происходит снижение удельного расхода высококачественного топлива до значения 150 г у.т./кВт·ч.

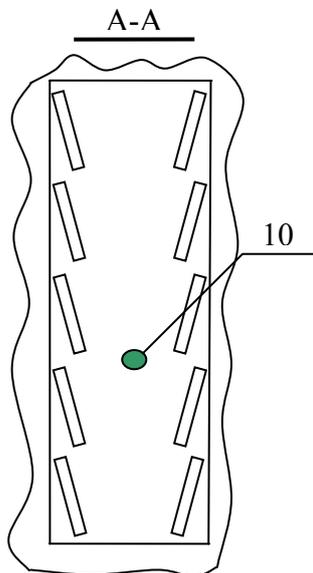
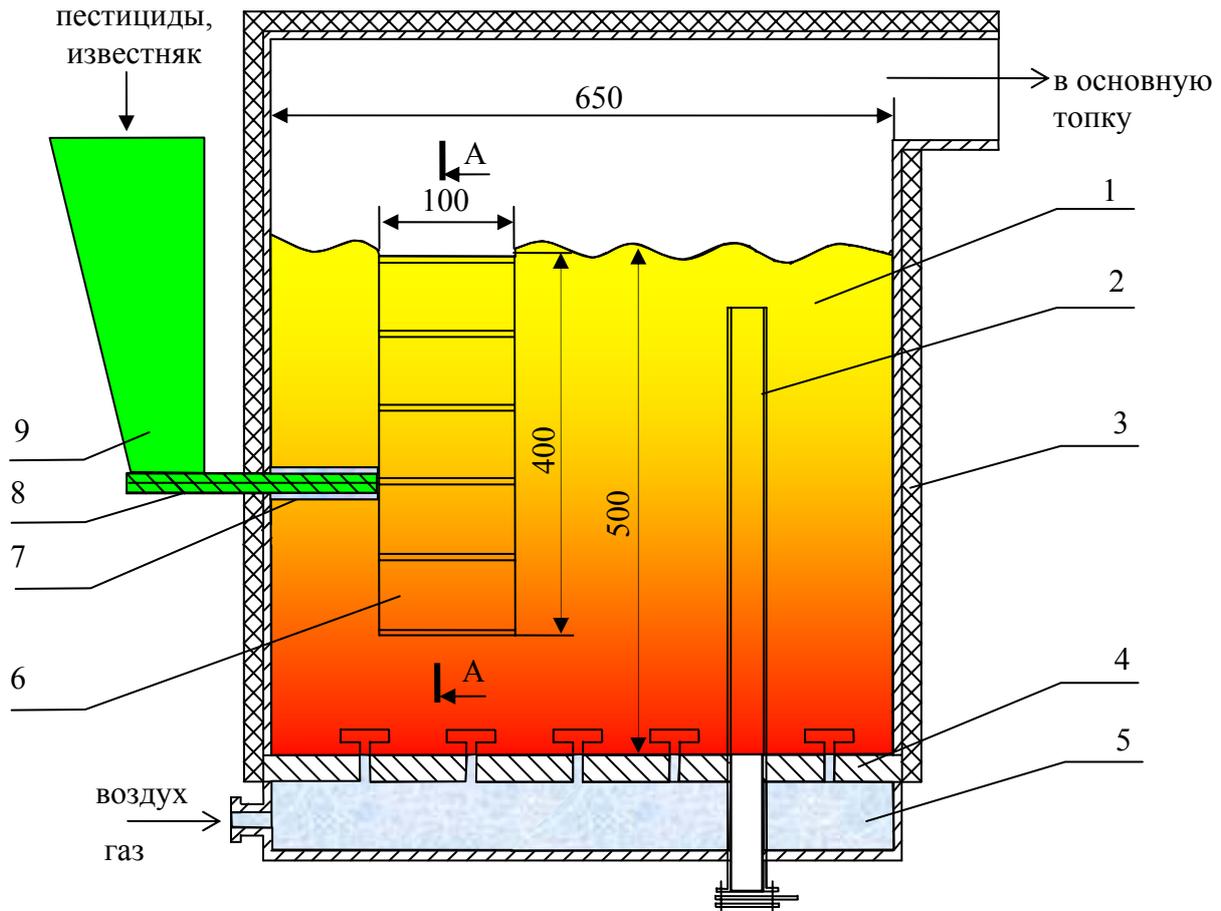
Также предложена конструкция предтопка для обезвреживания в котлах тепловых электрических станций запрещенных к использованию (или с истекшим сроком хранения) сельскохозяйственных пестицидов. Использование клиновидного канала позволит обеспечить необходимое для обезвреживания время пребывания пестицидов в зоне высоких температур.

Пестициды подаются в клиновидный канал из бункера 9 (рис. 6) шнековым питателем 8. Продукты сгорания пестицидов после двух - секундного пребывания в кипящем слое (необходимого для обезвреживания диоксинов) направляются в основную топку на дожигание. Для связывания образующихся оксидов серы вместе с диоксинами в предтопок подается известняк. Для поддержания температуры кипящего слоя 850 °С вместе с воздухом через воздухораспределительную решетку 4 подается горючий газ.

Предтопок имеет тепловую изоляцию 3. Для исключения перегрева пестицидов часть шнекового питателя оборудована водоохлаждаемой рубашкой 6. В установке предусмотрена возможность уменьшения высоты слоя через канал 2 для спуска слоя.

При создании направленного движения, без предварительного дробления осадков сточных вод, увеличение эффективности их сжигания, по сравнению со сжиганием в свободном слое, может составить до 10% [1]. При дроблении осадка до 1 мм перед подачей его в слой эффект может составить до 50%.

Сжигание пестицидов в топке с кипящим слоем при создании направленного движения позволит эффективно их обезвредить. Эффективность использования технологии сжигания в кипящем слое заключается в возможности сжигания сухих пестицидов, а также и в общеизвестных преимуществах кипящего слоя - таких, как более равномерное распределение температур по объему кипящего слоя, снижение выбросов токсичных оксидов азота, серы и диоксинов.



Конструктивные характеристики клиновидного канала:  
Длина пластины  $l_{пл}=100$  мм;  
Ширина между центрами пластин (по горизонтали)  $L=100$  мм;  
Угол поворота пластин  $\alpha =15^0$ ;  
Количество ярусов – 5.

Рис.6. Схема предтопка с кипящим слоем для обезвреживания пестицидов. 1 – кипящий слой; 2 - канал для спуска слоя; 3 - тепловая изоляция; 4 - воздухораспределительная решетка; 5 – подрешеточная камера; 6 - канал для создания направленного движения; 7 - водоохлаждаемая рубашка; 8 - шнековый питатель; 9 - бункер; 10 - ввод пестицидов.

## Условные обозначения

$d$  – диаметр,  $V$  - объем порции,  $W=w/w_k$  - число псевдоожижения,  $w$  - скорость псевдоожижения,  $w_k$  – скорость на пределе устойчивости слоя.

Индексы: 0 – начальный, п- пузырь; сл – слой; уг – уголь; ч – частицы.

## Список литературы

- [1] Левин Е.И. Управление загрузкой топлива в топку котлов с кипящим слоем: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.- Екатеринбург, 2006.-198 с.
- [2] Берг Б.В., Микула В.А., Левин Е.И. Организация направленного вертикального движения дисперсного материала в псевдоожиженном слое // V Минский международный форум по тепло- и массообмену. Тез. докл. и сообщений. - Том 2. - Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, 2004. С. 110-112.
- [3] Берг Б.В., Микула В.А., Левин Е.И. и др. Управление потоком угля в топке с кипящим слоем // Вестник УГТУ-УПИ: Теплоэнергетика. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – С. 186-194.
- [4] Микула В.А., Левин Е.И., Берг Б.В. и др. Направленная циркуляция в кипящем слое, как средство совершенствования процесса сжигания осадков очистных сооружений // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов четвертой Всерос. научно-техн. конф. с международным участием. - Благовещенск: изд-во Амурского госуд. университета, 2005.- С. 484-489.
- [5] А.с. № 823752, СССР. Топка с кипящим слоем. Берг Б.В., Баскаков А.П., Степанов Л.В. Бюлл. №15. 23.04.81.
- [6] Тамарин А.И., Галерштейн Д.М., Шуклина В.М. и др. Исследование конвективного переноса между горячей частицей и псевдоожиженным слоем // Тепломассообмен- VI.-Минск: Б.и., 1980.-Т.6, Ч.1.-С.4-49.
- [7] Тамарин А.И., Галерштейн Д.М. Тепло- и массообмен между псевдоожиженным слоем и горячей угольной частицей // Проблемы тепло- и массообмена в процессах горения.-Минск: Б.и., 1980.- С.104-121.