

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С КИПАЩИМ СЛОЕМ

Ю.А. Алтухов, А.Г. Гроссман, Г.П. Пронь

Приводится краткий обзор проблем, возникающих при математическом моделировании процессов переноса в топках с кипящим слоем и обсуждается методика разработки математической модели топки, ориентированной на применение в инженерных расчетах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представляется, что ближайшее будущее теплотехники будет связано с широким применением топок с кипящим слоем для сжигания высокозольного и влажного топлива. Применение технологии сжигания топлива в кипящем слое позволяет в принципе разрешить такие противоречивые проблемы энергетики, как повышение эффективности сжигания влажного и высокозольного топлива и снижение выбросов золы, окислов азота и серы, а также позволит создавать более маневренные котлоагрегаты и увеличить степень утилизации минеральной части топлива. При этом важно подчеркнуть, что помимо новых проектных разработок установки кипящего слоя могут применяться для модернизации и реконструкции существующих парогенераторов с угольными топками.

Вместе с тем в процессе стендовых и опытно-промышленных испытаний выявился ряд существенных недостатков метода сжигания в кипящем слое. Основными из них является повышенный унос золы и недогоревшего топлива и интенсивный абразивный износ поверхностей нагрева. Сжигание полидисперсного высокозольного топлива в низкотемпературном или циркулирующем кипящем слое приводит к резкому возрастанию выброса твердых частиц. Концентрация их в дымовых газах достигает 20 - 50 г/м³. Для снижения на 50 - 80% выбросов диоксида серы в топку с кипящим слоем вводят известняк в количестве 300 - 400 кг/т сжигаемого топлива, что также увеличивает запыленность дымовых газов. Однако эти недостатки не являются фатальными. Так, одним из путей преодоления этих трудностей является разработанная на кафедре котло- и реакторостроения АлтГТУ перспективная технология сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое в виде гранул [1]. По экологической чистоте эта технология не имеет аналогов, не уступая другим технологиям сжигания твердого топлива по остальным параметрам.

Таким образом, одним из перспективных направлений развития энергомашиностроения является разработка новых технологий сжигания твердого топлива в топках с кипящим слоем, проектирование и оптимизация конструкций таких топок, а также оптимизация режимов их работы. Однако в настоящее время теоретическая база для решения этих проблем явно слаба. При проектировании и реконструкции парогенераторов с топками с кипящим слоем инженерам - конструкторам приходится принимать ответственные решения при отсутствии достаточно развитой теории кипящего слоя, при отсутствии апробированной методики расчета топок с кипящим слоем и при практической невозможности физического моделирования процессов в топке из-за масштабных эффектов и трудностей, связанных с относительно высокими температурами горения топлива. Возможности проведения натуральных экспериментов также обычно весьма ограничены. По этим причинам топки с кипящим слоем относятся к тем объектам, для которых математическое и численное моделирование оказывается важнейшим и, зачастую, единственным средством для обоснованного выбора технического решения.

С целью развития теоретической базы для проектирования и оптимизации топочных устройств с кипящим слоем перед лабораторией физических процессов в котельных установках при кафедре котло- и реакторостроения АлтГТУ была поставлена задача разработки комплексной математической модели горения твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое. Эта модель должна удовлетворять следующим требованиям:

- в математической модели должны учитываться особенности подачи ожижающего агента, циркуляционные течения, пузыреобразование, сепарация и унос, межфазный и внутрифазный тепло- и массообмен, теплообмен между кипящим слоем и поверхностями нагрева, а также образование экологически вредных веществ;

- математическая модель должна обеспечивать выявление конструкционных, технологических и физических параметров, оказывающих определяющее влияние на процесс горения топлива в кипящем слое и позволяющих эффективно управлять этим процессом;

- модель может содержать некоторое количество эмпирических констант, однако значения этих констант должны определяться с помощью доступных физических и натуральных экспериментов;

- модель должна быть надежна, по возможности проста и ориентирована на выполнение инженерных расчетов.

Возможные области применения математической модели:

- проектирование топочных устройств с кипящим слоем и разработка оптимальной технологии сжигания конкретных топлив в этих устройствах;

- использование в системах управления и регулирования технологическими процессами в топочных устройствах с кипящим слоем.

Кратко рассмотрим важнейшие из проблем, с которыми приходится сталкиваться при разработке подобных математических моделей.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОК С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

В литературе, посвященной теории и моделированию процессов в псевдооживленном слое, излагаются главным образом результаты экспериментальных исследований, а также различные технологические аспекты применения псевдооживленного слоя для реализации тех или иных тепло- и массообменных процессов (см., например, [2-7]). Подавляющее большинство встречающихся в этих монографиях теоретических задач решается на полуэмпирическом уровне. Такой подход к исследованию псевдооживленного слоя дал возможность получить ряд практических, полезных формул для расчета важных с инженерной точки зрения характеристик этой физической системы - скорости начала псевдооживления, гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя, расширения слоя и т.п. Эти эмпирические и полуэмпирические результаты позволили на первых этапах удовлетворить потребности инженеров в методах приближенного расчета аппаратов с псевдооживленным слоем и, несомненно, продолжают играть полезную роль. Но в настоящее время этого уровня понимания процессов в кипящем слое уже недостаточно и для обеспечения нужд проектирования разнообразных по назначению топков с кипящим сло-

ем стало необходимым дальнейшее продвижение в области теории кипящего слоя и методов математического и численного моделирования разнообразных физико-химических процессов в кипящем слое.

Казалось бы, что для математического моделирования процессов переноса в кипящем слое не должно быть особых препятствий. Поскольку кипящий слой вместе с надслоевым пространством представляет собой двухфазную среду газ - твердые частицы (частицы золы и топлива), то топку с кипящим слоем можно рассматривать как единую систему с распределенными параметрами, состояние которой описывается полями порозности, плотностей, скоростей и других локальных характеристик состояния фаз (например, их температур и т.п.). Математическая модель топки с кипящим слоем тогда может строиться, например, как система феноменологических уравнений переноса для каждого из этих независимых полей, которые замыкаются соответствующими полуэмпирическими или чисто эмпирическими соотношениями, определяющими плотности "микроскопических" потоков для различных полей (типа плотности диффузионного, теплового потока или потока импульса), а также крайними и начальными условиями.

Уравнения переноса, входящие в математическую модель, отражают фундаментальные законы сохранения массы, импульса, момента импульса, энергии и второе начало термодинамики для каждой из фаз или двухфазной среды в целом, а выражения для плотностей потоков выбираются в соответствии с законами механики и неравновесной термодинамики с учетом специфики описываемых процессов. Краевые условия для этих уравнений ставятся на границах двухфазной среды - на поверхностях труб, погруженных в кипящий слой или омываемых газозоловым потоком в надслоевом пространстве, на различных ограждающих поверхностях и т.п. Уравнения переноса модели должны быть независимы друг от друга, а образуемая ими система должна быть корректна в том смысле, что вместе с выражениями для плотностей "микроскопических" потоков, крайними и начальными условиями она должна однозначно определять все интересующие поля, причем получаемые решения должны быть устойчивы. Выполнение требования корректности, однако, обычно очень трудно проверить теоретически и корректность модели обычно проверяется практикой численного моделирования.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Математические модели, подобные описанным выше, принято называть микромоделями (микроскопическими моделями) по той причине, что в этих моделях рассматривается внутренняя, "микроскопическая" структура объекта моделирования. Соответственно под микроскопическим или структурным подходом в математическом моделировании понимается метод построения модели, который основывается на явном рассмотрении внутренней структуры объекта моделирования, а микромоделированием называют разработку микромоделей объекта. Математические модели объектов, в которых их внутренняя структура явно не рассматривается, называют макромоделями. Под макроскопическим подходом имеют в виду метод построения макромоделей объекта без явного рассмотрения его внутренней структуры, а макромоделированием принято называть разработку макромоделей объекта. Макромоделей всегда менее полны, чем микромоделей. Обзоры практически используемых макромоделей кипящих слоев можно найти в монографиях [2-8]. Обзор микромоделей и методов микромоделирования псевдооживленных слоев приведен в [8].

Несмотря на естественность описанного выше подхода микромоделирование всей топки с кипящим слоем в целом не применяется. Дело в том, что двухфазное течение в кипящем слое и в надслоевом пространстве различаются настолько сильно, что их удобнее описывать в рамках качественно различных математических моделей.

Малость объемной концентрации твердого вещества в надслоевом пространстве при описании движения фаз позволяет пренебречь механическим взаимодействием частиц твердой фазы и использовать математические модели типа модели пневмотранспорта или более сложные математические модели, учитывающие сепарацию частиц золы, турбулентность течения в надслоевом пространстве и т.п. Здесь важно подчеркнуть, что хотя двухфазное течение в надслоевом пространстве кипящего слоя и турбулентно, но ввиду малости объемной концентрации твердого вещества эта турбулентность близка к той классической турбулентности, с которой имеют дело в гидро- и газодинамике и поэтому общие подходы к математическому моделированию этого течения достаточно очевидны. Определенную сложность здесь представляет лишь сравнительно малоизученные вопросы о сепарации частиц, транспортирующей способности потока и влиянии турбулентности на транспор-

тирующую способность потока. Кроме того, возникает проблема учета подавления турбулентности частицами, выносимыми из кипящего слоя в надслоевое пространство, однако эффект подавления турбулентности частицами в какой-то мере уже научились учитывать в различных математических моделях турбулентных течений.

Для математического моделирования псевдооживленного слоя обычно используются иные микромоделей, в которых явно учитываются механические взаимодействия и несжимаемость частиц [8-10]. Однако надо иметь в виду, что ламинарные течения в псевдооживленных слоях обычно наблюдаются только в случаях, когда оживающим агентом является жидкость с плотностью, близкой по порядку величины к плотности твердых частиц. Течения же в кипящих слоях - псевдооживленных слоях, оживаемых газом, обычно являются турбулентными, что объясняется, видимо, гидродинамической неустойчивостью ламинарных течений в таких слоях [8]. Специфическая турбулентность, которая наблюдается в кипящих слоях, проявляется, в частности, в наличии в слое газовых пузырей и пакетов частиц, в проскоках газа через слой, в выбросах частиц в надслоевое пространство и т.п. [4,8].

Видимо с этой же неустойчивостью связан и периодический характер численных решений, полученных при локальном микромоделировании газовых струй в кипящем слое в работах [9,10]. Следует подчеркнуть, что качественно вполне аналогичные результаты были получены ранее экспериментально [11] (см. также ссылки в [9,10]). Согласно результатам этих работ турбулентность в кипящем слое зарождается уже при истечении газовых струй в кипящий слой, когда периодически, после достижения этими струями определенной длины, их верхние части отрываются в виде воздушных пузырей, которые далее всплывают к поверхности кипящего слоя, увеличиваясь в размерах по мере подъема. Не исключены также и иные дополнительные механизмы порождения турбулентности.

Несмотря на очевидный успех применения микромоделей турбулентности в работах [9,10], подобные модели в настоящее время можно широко использовать лишь для микромоделирования локальных течений в кипящем слое. Попытки их применения ко всей области занятой кипящим слоем были бы вполне аналогичны попыткам расчета естественной турбулентной конвекции в слое ки-

пещей ньютоновской жидкости, занимающей ту же область, при интенсивном подогреве этого слоя снизу. Очевидно, что при множественном образовании пузырей численное решение такой задачи невозможно из-за нехватки машинных ресурсов. Поэтому для микро моделирования течений фаз во всем объеме кипящего слоя необходимо вместо уравнений работ [9,10] (или подобных им уравнений) использовать соответствующие им уравнения для осредненных полей порозности, скоростей фаз и т.п., которые по своему смыслу будут вполне аналогичны уравнению Рейнольдса классической турбулентности. Однако проблема замыкания подобных осредненных уравнений еще далека от решения.

Кроме этих основных проблем при моделировании топок с кипящим слоем необходимо разработать и ряд других моделей.

МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ

Для решения поставленной задачи предполагается использовать следующие общие подходы и методы.

Для совместного моделирования физически различных процессов, происходящих в разных областях топки, представляется единственно возможным использовать блочно - иерархический подход. В рамках такого подхода математическая модель кипящего слоя строится в виде иерархической структуры, состоящей из отдельных блоков - согласованных по своим входам и выходам математических моделей, которые описывают функционирование отдельных частей топки с кипящим слоем или даже отдельные процессы, происходящие в этих частях. При этом для реализации различных блоков могут использоваться разнотипные математические модели, различающиеся как по уровню детализации описания, так и по используемому математическому аппарату. Так, один и тот же процесс может параллельно описываться в нескольких блоках (например, одной локальной микро моделью и одной макро моделью). Полная модель топки комплектуется из отдельных блоков, набор которых диктуется конкретным содержанием поставленной задачи.

Представляется, что основные блоки модели целесообразно привязать к тем трехмерным областям и ограничивающим их поверхностям, в которых или на которых свойства двухфазной среды газ - твердые частицы описываются с помощью одинаковых уравнений и/или соотношений. Исходя из

этих соображений, можно выделить следующие объекты, расположенные внутри топки или образующие ее границу, к которым должны быть привязаны основные блоки комплексной модели топки:

- кипящий слой;
- сепарационное пространство (зона динамических выбросов);
- зона установившегося пневмотранспорта в надслоевом пространстве;
- газораспределительная решетка;
- погруженные в кипящий слой поверхности нагрева;
- условная граница раздела между кипящим слоем и сепарационным пространством;
- омываемые дымовыми газами поверхности нагрева в надслоевом пространстве;
- остальные поверхности, ограничивающие кипящий слой и надслоевое пространство.

При разработке математических моделей, реализующих отдельные блоки комплексной модели, пробелы теории предполагается, насколько это удастся, преодолевать полуэмпирическими или чисто эмпирическими методами, используя физическое моделирование на крупномасштабных моделях топок кипящего слоя (в том числе, на огневых экспериментальных установках) и натурные эксперименты. В тех же случаях, когда и это окажется невозможным, разработку модели следует проводить на основе обобщения накопленного опыта проектирования и эксплуатации парогенераторов с топками с кипящим слоем.

Некоторые из блоков комплексной модели фактически уже реализованы.

Так, проблема математического моделирования газораспределительного устройства в целом уже решена. Для расчета отдельной газовой струи, истекающей из колпачка газораспределительной решетки в кипящий слой, уже в настоящее время в зависимости от целей моделирования можно ограничиться макро моделированием и использовать простейшие полуэмпирические расчетные формулы типа применявшихся в работах [11,17,18] или использовать локальное микро моделирование на базе дифференциальных математических моделей, которые применялись в работах [9,10].

На основании изложенных методик разработаны компьютерные программы для расчета параметров газовых струй, истекающих в кипящий слой.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Предложен теоретически и экспериментально обоснованный подход к разработке методики инженерного расчета "козырька" в изотермическом кипящем слое ("козырек" используется для разогрева и растопки топочных устройств с кипящим слоем и для подачи в объем слоя мелкого топлива и уловленного уноса в рабочем режиме топки). Получена формула для расчета газа через "козырьки" типичной конструкции. Схема поперечного разреза козырька представлена на рисунке 3.

Одним их перспективных методов разогрева и растопки топочных устройств с кипящим слоем является подача и сжигание растопочного топлива в объеме слоя под специально сконструированным устройством - "козырьком". В рабочем режиме это устройство может использоваться для подачи в объем слоя мелкого топлива и уловленного уноса.

Рассмотрена задача разработки инженерного расчета "козырька" применительно к рабочему режиму, при котором распределение температуры в топке кипящего слоя является приблизительно изотермическим. Предлагается теоретически и экспериментально обоснованный подход к расчету "козырька" в изотермическом кипящем слое. На основе этого подхода получена формула, которая позволяет рассчитывать расход газа через "козырьки" типичной конструкции по их геометрическим параметрам кипящего слоя. Она может быть использована не только для расчета расхода газа через "козырек", но также и для решения других задач, возникающих при проектировании топочных устройств с кипящим слоем.

Данная методика позволяет определить необходимое количество отверстий и их правильное расположение на стенках "козырька" при заданном расходе газов через "козырек" и заданной высоте газовой полости внутри него, для вычисления по известным режимным и конструктивным параметрам высоты образующейся внутри него газовой полости и т.д. Наблюдения и специально поставленные эксперименты на стендах подтверждают, что расчет "козырька" с помощью этой формулы обеспечивает образование в нем газовой полости ожидаемых размеров и равномерное распределение по кипящему слою выходящих из него газов.

В дальнейшем для определенности будем рассматривать "козырек", представляющий собой перевернутый дном вверх и расположенный горизонтально длинный стальной короб с П-образным поперечным сечени-

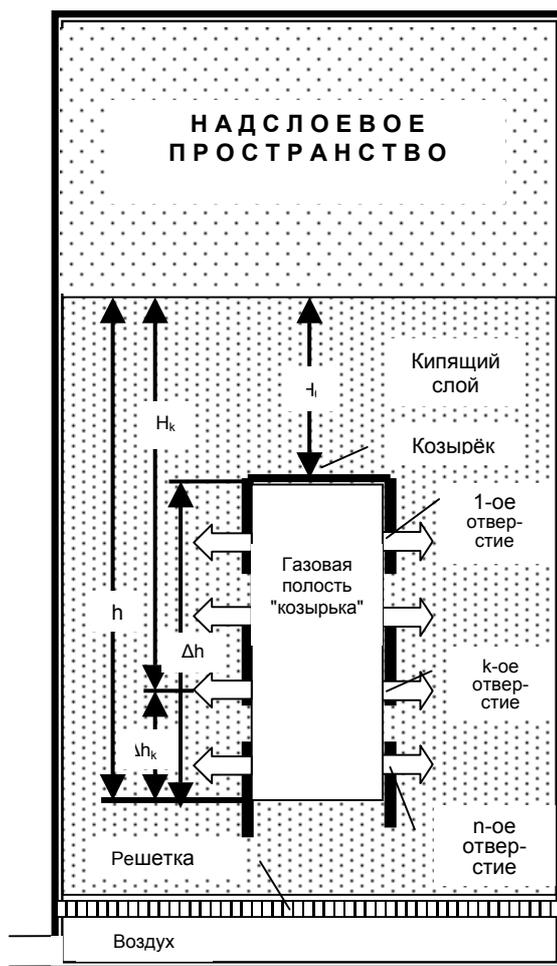


Рис. 3. Схема поперечного разреза растопочного "козырька" в кипящем слое

ем. В рабочих условиях "козырек" полностью погружен в кипящий слой, а в его верхней части образуется газовая полость - заполненный газами зазор между его "потолком" и свободной поверхностью кипящего слоя над ним. "Потолок" представляет собой цельную горизонтальную поверхность, а в его вертикальных боковых стенках имеются горизонтальные ряды одинаковых отверстий, через которые из газовой полости "козырька" в кипящий слой вытекают газовые струи. Расположение отверстий на обеих боковых стенках "козырька" одинаково. В рабочем режиме газ поступает в газовую полость "козырька" только от расположенных под ним колпачков газораспределительной решетки через его открытое "дно", проходя сквозь кипящий слой. При растопке кипящего слоя нагретые газы поступают в газовую полость "козырька" также и через один из его "торцов". Отверстия на боковых стенках "козырька" располагаются горизонтальными рядами.

Рассмотрим теперь теоретическое обоснование для подхода, использованного при расчете расхода газа через описанный выше "козырек".

В соответствии с картиной, подробно описанной в [18] для струйного истечения газа из колпачка в псевдооживленный слой, следует ожидать, что при достаточно высоком давлении газа в полости "козырька" он будет истекать из круглого отверстия в стенке "козырька" в виде так называемой круглой горизонтальной газовой струи. Приближенно ее можно рассматривать как изобарическую, а давление в ней на ее горизонтальном участке принять равным среднему давлению в кипящем слое на уровне отверстия, из которого она истекает. Так как кипящий слой по своим свойствам во многом похож на слой жидкости, это дает основание приближенно рассматривать истечение газа через отверстие в стенке "козырька" в кипящий слой как стационарное истечение газа через малое круглое отверстие в вертикальной тонкой стенке в пространство, затопленное жидкостью при давлении, равном давлению в кипящем слое на уровне этого отверстия. Далее, как известно (например, [17]), для истечения капельной жидкости или газа при слабой степени его сжатия через малое отверстие при постоянном напоре под уровень той же или иной жидкости наблюдаются следующие закономерности. Скорость истечения u через малое отверстие из большого резервуара с постоянным уровнем при малом влиянии вязкости (т.е. при больших числах Рейнольдса вытекающей струи, вычисляемых по диаметру отверстия) определяется формулой

$$u_o = \sqrt{2p/\rho}, \quad (3)$$

где p - перепад давлений на уровне отверстий между резервуаром, из которого жидкость вытекает, и внешней средой;

ρ - плотность вытекающей жидкости.

В общем случае при вычислении скорости истечения следует учитывать потери напора на вход в отверстие, которые для малого отверстия зависят только от числа Рейнольдса для вытекающей струи. Это число обычно вычисляется по формуле

$$Re = u_o D / \nu, \quad (4)$$

где u_o - скорость, рассчитываемая по формуле (3.6);

D - диаметр отверстия;

ν - коэффициент кинематической вязкости вытекающей жидкости.

Массовый расход жидкости через это отверстие рассчитывается по формуле

$$G = \rho \mu F, \quad (5)$$

где μ - коэффициент расхода, зависящий лишь от числа Re ;

F - площадь отверстия.

Используя аналогию со случаем истечения газа в затопленное пространство и применяя формулы (3) - (4), можно получить следующее выражение для массового расхода G газа через отверстия "козырька":

$$G = 2\rho_\Gamma \sum_{k=1}^K N_k \mu_k F_k \sqrt{2p_k/\rho_\Gamma}, \quad (6)$$

где K - количество рядов отверстий в боковой стенке "козырька", расположенных выше уровня кипящего слоя в полости "козырька" (общее количество рядов отверстий в боковой стенке "козырька" вместе с рядами затопленных отверстий может быть и больше K , но затопленные отверстия существенного влияния на течение в кипящем слое не оказывают и здесь не учитываются);

N_k - общее количество отверстий в ряду k одной стенки "козырька" ($k=1,2,\dots,K$);

μ_k - коэффициент расхода газа через отверстие для отверстия ряда k ; рассчитываемый по обычным формулам или таблицам, используемый в технической гидродинамике;

F_k - площадь одного отверстия в ряду k отверстий;

ρ_Γ - плотность газа в полости "козырька";

p_k - перепад между давлением газа в полости "козырька" и давлением в кипящем слое на уровне k отверстий.

Перепады давлений можно рассчитать из соотношений:

$$P_k = \rho g h_k (k = 1, 2, \dots, K), \quad (7)$$

где ρ - средняя плотность кипящего слоя;

g - ускорение свободного падения;

h_k - разность уровней ряда k отверстий в боковой стенке "козырька" и кипящего слоя в полости "козырька".

Разности уровней можно выразить также в виде

$$h_k = H - H_k (k = 1, 2, \dots, K), \quad (8)$$

где H - разность уровней кипящего слоя в топке и в полости "козырька";

H_k - глубина кипящего слоя на уровне ряда k отверстий в стенке "козырька".

Необходимая для расчета перепадов давления средняя плотность кипящего слоя рассчитывается как

$$\rho = (1 - \varepsilon)\rho_T + \varepsilon\rho_\Gamma, \quad (9)$$

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

где ρ_r - кажущаяся плотность материала твердой фазы;

ε - средняя порозность кипящего слоя в его верхней части глубиной H , равной разности уровней кипящего слоя в топке и в полости "козырька".

Из равенства (5) следует соотношение:

$$G = 2 \sum_{k=1}^K N_k \mu_k F_k \sqrt{2 \rho_r \rho g h_k}. \quad (10)$$

Это соотношение вместе с соотношениями (8), (9) позволяет вычислять расход газа через "козырек" по геометрическим параметрам "козырька" и режимным параметрам слоя. Для решения задач, обратных этой из соотношения (10) можно легко вывести соответствующее уравнение.

Рассмотрим, задачу о вычислении высоты h газовой полости внутри "козырька"

$$h = H - H_0, \quad (11)$$

где H_0 - глубина расположения потолка "козырька" под поверхностью кипящего слоя.

С учетом соотношений (9), (10) для этой величины из равенства (11) можно получить следующее уравнение:

$$\sum_{k=1}^K N_k \mu_k F_k \sqrt{h - (H_k - H_0)} = G / (2 \sqrt{2 \rho_r \rho g}). \quad (12)$$

При $K=1$ (т.е. при одном "работающем" ряде отверстий) из последнего уравнения следует квадратичная зависимость высоты газовой полости в "козырьке" от расхода газа через него, что хорошо подтверждается экспериментально.

Для проверки соотношения были проведены изотермические продувки "козырька" с П-образным сечением 240 x 330 мм. Число псевдооживления в экспериментах изменялось от 1 до 3, с одного из торцов "козырька" дополнительно подавался сжатый воздух. В качестве наполнителя слоя применялись частицы полистирола и котельный шлак. Изменялись высота h газовой полости внутри козырька, а также давление под "козырьком" и на уровне его отверстий. Расход воздуха через "козырек" принимался равным тому его количеству, которое проходило через расположенные под ним колпачки. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по высоте полости оказались примерно 10-15 %.

В заключение следует отметить, что наблюдения и специально поставленные опыты подтверждают достаточную точность расчетов, производимых на основе рассматриваемого подхода. Поэтому представляется, что предложенный подход может быть положен в основу инженерных методик расчета подобных устройств.

В значительной мере решена проблема микромоделирования слабозапыленных двухфазных потоков в зоне пневмотранспорта надслоевого пространства и в газовых трактах котельных агрегатов [12-16]. Для моделирования движения частиц золы можно использовать как полуэмпирическую численно - экспериментальную методику, так и чисто вычислительную методику, основанную на численном моделировании турбулентных течений запыленного газа в газовых трактах котельных агрегатов на базе двухпараметрической диссипативной модели турбулентности ((К,Е)-модели).

Проводились также работы по математическому моделированию процесса растопки кипящего слоя [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Малкин Б.М., Пронь Г.П., Фурсов И.Д., Гусаченко Л.К., Зарко В.Е. Установка для сжигания гранулированного топлива в кипящем слое // Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной переработки. Аналитические обзоры. - Новосибирск, 1995.
2. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. - М.: Химия, 1967.
3. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. - Л.: Химия, 1968.
4. Кунии Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. - М.: Химия, 1976.
5. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. - Л.: Химия, 1981.
6. Ейтс Дж. Основы механики псевдооживления. - М.: Мир, 1986.
7. Псевдооживление / Ред. В.Г. Айнштейн, А.П. Баскаков. - М.: Химия, 1991.
8. Протодьяконов И.О., Чесноков Ю.Г. Гидромеханика псевдооживленного слоя. - Л.: Химия, 1982.
9. Бойлард Дж.К., Лычковский Р.В., Гидаспов Д. Распределение пористости в кипящем слое с погруженным препятствием // Экспресс-информация ВИНТИ: Процессы и аппараты химических производств и химическая кибернетика. - 1990, №17.
10. Gidasпов D. Hydrodynamics of fluidization and heat transfer: Supercomputer modelling // Appl.Mech.Rev. - 1986, V.39, №1.
11. Бувеч Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдооживление. - М.: Химия, 1984.
12. Гроссман А.Г., Малкин Б.М., Яцкарь И.Я. Моделирование движения частиц золы в турбулентном потоке газов в трактах котельных агрегатов // Проблемы загрязнения и очистки наружных поверхностей нагрева паровых котлов: Тезисы докладов Республиканской конференции. - Батуми, 1988.

13. Гроссман А.Г., Малкин Б.М., Яцкарь И.Я. Формирование уноса горючих частиц при сжигании твердого топлива в кипящем слое //Техника псевдооживления (кипящего слоя) и перспективы ее развития: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции (Ленинград - Поддубская, 27 - 30 сентября 1988 г.). Черкассы: отделение НИИТЭХИМ, 1988.

14. Гроссман А.Г., Малкин Б.М., Яцкарь И.Я. Разработка численно - экспериментальной методики оптимизации газовых трактов парогенераторов, работающих на твердых топливах // Теплообмен в парогенераторах: Тезисы докладов Всесоюзной конференции (28 - 30 июня 1988 г.). - Новосибирск, 1988.

15. Алтухов Ю.А., Грин В.М., Гроссман А.Г., Малкин Б.М. Численное моделирование двухфазных потоков в газовых трактах котельных агрегатов // Проблемы аэродинамики газоздушных трактов котельных агрегатов: Тезисы докладов

Всесоюзной научно - технической конференции (10 - 12 октября 1989 г.). Барнаул. - Барнаул, 1989.

16. Алтухов Ю.А., Малкин Б.М. Численное моделирование аэродинамики слабозапыленных потоков и оптимизация геометрии газовых трактов котельных агрегатов // Теплообмен в парогенераторах: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции. - Новосибирск, 1990.

17. Гроссман А.Г., Пронь Г.П. Газовые струи в кипящем слое // Исследование и конструирование паровых котлов: Межвузовский сборник.- Томск, 1993.

18. Гроссман А.Г., Пронь Г.П. Расчет "козырька" в топочных устройствах кипящего слоя // Теплоэнергетика. - 1996, №2.

19. Malkin B.M., Pron G.P., Fursov I.D., Zarko V.E., Gusachenko L.K. Novel technique for the burning of granulated fuel in a fluidized bed //New developments in heat exchangers: 1993 ICHMT International Symposium.- Lisbon, 1993.