

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ АППАРАТОВ С КИПАЮЩИМ СЛОЕМ

На экспериментальной установке с холодной моделью исследуется гидродинамика аппаратов с кипящим слоем. Из сравнения опытных данных с расчетными сделан вывод, что только в экспериментальных условиях можно получить качественную картину процесса псевдооживления для частиц угля разного фракционного состава, найти интервалы оптимальных скоростей, обеспечивающих хорошее псевдооживление и малый унос частиц, и определить направления оптимизации параметров воздухо-распределительных решеток.

Ключевые слова: кипящий слой, гидродинамика, кривые псевдооживления, холодная модель, воздухо-распределительные решетки, ирша-бородинский уголь.

Эффективность сжигания и термической переработки твердых видов топлива в аппаратах с кипящим слоем (КС) существенным образом определяется гидродинамическими характеристиками.

Кипящим или псевдооживленным слоем называют взвешенное состояние слоя материала при пропускании через него газа (воздуха). В зависимости от скорости оживляющего газа различают следующие режимы:

- 1) пузырьковый, подобный кипящей жидкости с пузырьками пара;
- 2) циркуляционный с интенсивным перемешиванием частиц в слое;
- 3) циркуляционный с уносом твердой фазы и возвращением ее в слой после сепаратора.

В многосекционных топочных камерах могут поддерживаться различные гидравлические режимы.

Основная задача исследования гидродинамики КС заключается в определении скоростей и соответствующих им перепадов давлений газа, обеспечивающих устойчивый кипящий слой.

Для аппаратов с вертикальными стенками псевдооживление начинается, если вес слоя материала уравновешивается силой трения газа (перепадом давления в слое ΔP), т.е. выполняется условие:

$$\Delta P = g(\rho_m - \rho_g)(1 - \varepsilon_{кр})H_{кр}, \quad (1)$$

где ρ_m , ρ_g – плотность материала и газа; $\varepsilon_{кр}$, $H_{кр}$ – порозность (доля объема пустот между частицами в объеме слоя) и высота слоя в начале псевдооживления.

Скорость газа, при которой достигается это состояние, называется скоростью начала псевдооживления или первой критической скоростью $w_{кр}$. Различают идеальное и реальное псевдооживление. Зависимости перепада давления ΔP от скорости газа (кривые псевдооживления) для этих случаев приведены на рис. 1 и 2.

Для идеальной кривой псевдооживления, свойственной гладким сферическим частицам одного размера, можно выделить три интервала скоростей. Первый — от 0 до $w_{кр}$ (линия 1 на рис. 1) — соответствует режиму фильтрации газа через слой. При ламинарном режиме линия 1 — прямая, при турбулентном — парабола. Второй интервал — от начала оживления до выноса частиц — характеризует состояние псевдооживления (рост порозности или

расширения слоя пропорционален скорости газа), при этом высота слоя увеличивается, а перепад давлений остается постоянным.

Реальные кривые псевдооживления (см. рис. 2) отличаются от идеального режима перепадами давлений, обусловленными силами сцепления между частицами и их трением о стенки аппарата (всплеск ΔP и гистерезис на рис.2,а). Из рис. 2,б видно, что для полидисперсного материала начало псевдооживления размыто, т.к. каждая фракция будет иметь свое значение $w_{кр}$.

Третий интервал скоростей характеризует вынос частиц из слоя, т.е. верхний предел существования КС. Скорость витания частиц (вторая критическая скорость) w_y зависит от размера, формы, шероховатости и других физических параметров.

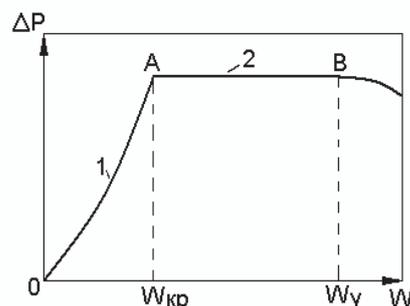


Рис. 1. Идеальная кривая псевдооживления [1]:
1 — фильтрация агента сквозь стационарный слой;
2 — псевдооживленное состояние ($\Delta P = const$).

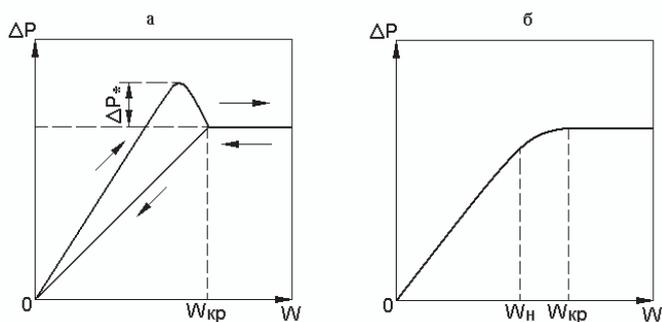


Рис. 2. Реальные кривые псевдооживления [1]:

а — кривая псевдооживления со всплеском ΔP и гистерезисом;
б — кривая псевдооживления для полидисперсного материала.

Для моделирования гидродинамики кипящего слоя предложено достаточно большое количество расчетных зависимостей. Некоторые соотношения для определения скорости начала псевдооживления приведены в табл. 1.

Таблица 1
Расчетные зависимости для определения скорости начала псевдооживления

№	Формулы для расчета	Литературный источник
1	$Re_{кр} = \frac{Ar}{150(1-\varepsilon_{кр})/\varepsilon_{кр}^3 + \sqrt{1,75Ar/\varepsilon_{кр}^3}}$	[1]
2	$Re_{кр} = \sqrt{a^2 + bAr} - a$ $a = 42,85(1-\varepsilon_{кр})/\Phi$ $b = 0,571\varepsilon_{кр}^3\Phi$	[2]
3	$Re_{кр} = 0,0736Ar^{0,625}\varepsilon_{кр}\left(\frac{d_{max}}{d_3}\right)^{0,375}$ $20 < Re < 1500$	[1]

Здесь $Re_{кр} = \omega_{кр} d/v$ – число Рейнольдса; d – диаметр частиц; v – коэффициент кинематической вязкости; $Ar = gd^3 \cdot (\rho_m / \rho_e - 1)/\nu^2$ – критерий Архимеда; Φ – геометрический коэффициент формы; d_3, d_{max} – эквивалентный и максимальный диаметр частиц.

Из представленных выражений видно, что $w_{кр}$ зависит от порозности слоя, поэтому необходимо правильное задание этой величины. Практически во всех топочных камерах и аппаратах для термической переработки твердого топлива (пиролизерах, газификаторах) используется уголь полидисперсного состава, для которого величина $\varepsilon_{кр}$ неизвестна, поэтому в расчетах ее чаще всего либо принимают [2], либо рассчитывают из приближенных выражений для несферических частиц [1]:

$$\frac{f}{\varepsilon_{кр}^3} \approx 14; \tag{2}$$

$$\frac{f^2(1-\varepsilon_{кр})}{\varepsilon_{кр}^3} \approx 11 \tag{3}$$

Значения геометрического коэффициента формы f для некоторых материалов приведены в [1]. Для угольной размельченной пыли $f = 1,37$; для угольной естественной пыли, антрацита и других острозернистых и шероховатых частиц $f = 1,54$.

Представленные в табл. 1 расчетные зависимости имеют свои ограничения. В [1] отмечается, что формулу (1) можно использовать для расчета первой критической скорости слоя полидисперсного материала только одинаковой плотности с небольшим показателем полидисперсности (d_{max}/d_{min}), правда, не указываются значения этого

показателя. Вместо d в формулу (1) (для расчета числа Рейнольдса и критерия Архимеда) подставляется эквивалентный диаметр d_3 . Формула (3) получена для полидисперсных систем, но область ее применения ограничена.

Для расчета скорости уноса частиц наиболее универсальной считается формула Тодеса:

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \tag{4}$$

Установлено [1], что при увеличении высоты пространства над поверхностью слоя до какой-то определенной величины, интенсивность уноса падает, при этом дальнейшее увеличение этой высоты на унос практически не влияет.

При расчетах гидродинамики кипящего слоя следует учитывать влияние температуры и давления газа. От них зависят плотность и вязкость оживающего газа, а также величина порозности слоя. При увеличении температуры снижается ρ_e , но в бóльшей степени растет ν , а также увеличивается $\varepsilon_{кр}$.

Изменение величины $w_{кр}$ при варьировании температуры зависит от размера частиц. Установлено [1,2], что для мелких частиц ($Ar < 10^4$) с ростом температуры $w_{кр}$ снижается; для частиц диаметром 2...3 мм скорость начала псевдооживления сначала возрастает (примерно до $Re_{кр} = 45$), а затем уменьшается.

В целом, анализ расчетных зависимостей показывает, что они по-разному учитывают дисперсность частиц, неправильность их формы и другие физические параметры, что не позволяет однозначно определять $w_{кр}$, поэтому параметры псевдооживления надежнее определять экспериментальным путем.

Изучение гидродинамики кипящего слоя проводилось на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рис.3 (в экспериментах принимал участие к.т.н, доцент Ханхалов В.А.). В изготовленную из оргстекла модель топки с КС 1 воздуховкой 3 подавался воздух, используемый в качестве оживающего агента. Расход газа регулировался входным шибером 4, предварительно отградуированным по расходу воздуха. Перепады давления измерялись дифференциальными манометрами 6 и 7 через отборники давления 8. Замеры давления производились под воздухораспределительной решеткой, в средней части слоя, над слоем на высоте 180 и 235 мм. Перепады давления измерялись U-образными дифманометрами с точностью ± 1 мм вод ст. Скорость воздуха измерялась чашечным анемометром. Высота неподвижного слоя варьировалась от 30 до 70 мм.

Особенность конструкции модели состояла в возможности изменения в достаточно широких пределах формы рабочего пространства, сечений выходной камеры и воздухораспределительной решетки.

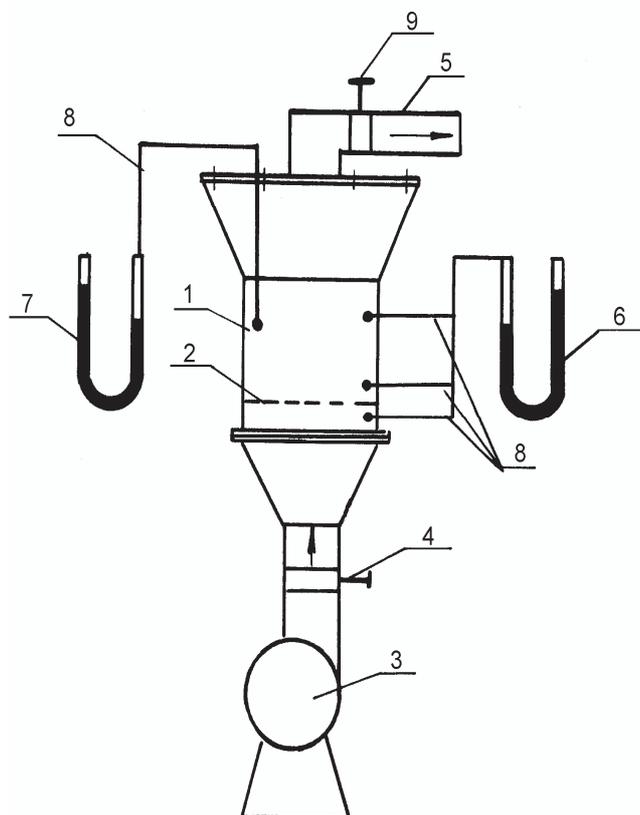


Рис.3. Схема экспериментального стенда с холодной моделью.
 1 — модель топki; 2 — воздухораспределительная решетка;
 3 — воздуходувка; 4 — входной шибер; 5 — выходная камера;
 6, 7 — дифференциальные манометры; 8 — отборники давления;
 9 — выходной шибер.

При конструировании модели особое внимание было уделено воздухораспределительной решетке, которая является одним из важнейших элементов топki с КС и оказывающей значительное влияние на надежность, качество термической переработки топлива. Ее назначение состоит в обеспечении равномерного и достаточного объема воздуха для устойчивого и однородного псевдооживления слоя и предотвращения провала частиц.

Из всех известных конструкций решеток наиболее распространены три типа: перфорированные, колпачковые и трубчатые. На лабораторных стендах используют в основном первый тип, в промышленных установках чаще всего применяют газораспределительные колпачки и трубы [2].

Поскольку в настоящее время отсутствуют надежные расчетные методики выбора типа и параметров газораспределительных решеток, целесообразно эти данные получать эмпирическим путем.

Для холодной модели топki с КС была выбрана плоская перфорированная решетка. Установлено, что гидродинамика кипящего слоя во многом зависит от аэродинамического сопротивления решетки ΔP_p , увеличение которого ведет к улучшению качества псевдооживления. Но это, в то же время, ведет к росту требуемого напора дутьевого вентилятора и расхода электроэнергии на дутье. Обычно сопротивление решетки принимается как определенная доля от сопротивления слоя (например, 10 % [2]), что чаще всего не обеспечивает оптимальные условия псевдооживления.

Для перфорированных газораспределительных решеток важнейшими параметрами являются площадь живого сечения и диаметр отверстий. Выбор оптимальных значений этих параметров для конкретных условий пока не формализован, а потому требует экспериментальных исследований.

В опытах использовались две перфорированные решетки, отличающиеся площадью сечения и диаметром отверстий (табл.2), что позволило оценить влияние параметров решетки на гидродинамику кипящего слоя. Перед испытаниями модели на угле были сняты рабочие характеристики решеток (рис. 4). В табл. 3 для одного из значений расхода воздуха — 0,1 м³/с сопоставлены значения сопротивлений решеток, полученных экспериментальным и расчетным (по рекомендуемым в [3] соотношениям) путем.

Представленные данные свидетельствуют о том, что фактические сопротивления решеток существенно ниже расчетных значений, причем при увеличении расхода воздуха расхождения возрастают еще в большей степени. Это указывает на необходимость экспериментального определения характеристик решеток данного типа и корректировки методики расчета.

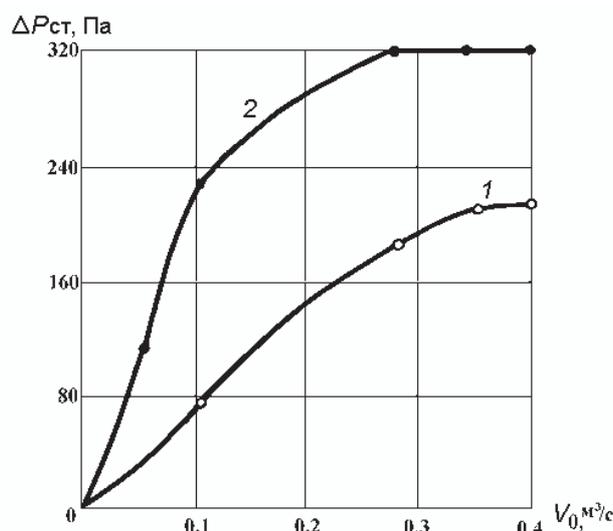


Рис. 4. Рабочие характеристики воздухораспределительных решеток.
 1 — $d_{отв} = 2,5$ мм; 2 — $d_{отв} = 4,5$ мм.

Таблица 2

Параметры воздухораспределительных решеток

Решетка	Диаметр отверстий, мм	Число отверстий, шт	Живое сечение решетки	
			м ²	%
1	2,5	722	0,0035	18,2
2	4,5	324	0,0052	26,4

Таблица 3

Аэродинамические сопротивления воздухораспределительных решеток

Метод получения данных	Аэродинамическое сопротивление ΔP , Па	
	$d_{отв} = 2,5$ мм	$d_{отв} = 4,5$ мм
Расчет	1005	455
Эксперимент	220	70

В экспериментах на холодной модели использовался ирша-бородинский уголь различного фракционного состава: 10...20 мм ($d_s = 0,015$ м), 5...10 мм ($d_s = 0,0075$ м) и полифракционная смесь.

Следует отметить, что из рабочей смеси полифракционного состава была исключена фракция угля < 0,6 мм из-за полного ее уноса в начальной стадии испытаний. В ходе проведения экспериментов для поддержания постоянной высоты слоя было необходимо производить добавки угля.

Результаты экспериментов, выполненных на холодной модели с двумя перфорированными решетками, показали, что уменьшение площади живого сечения F и диаметров отверстий d_0 обеспечивает более устойчивое и равномерное псевдооживление. Это можно объяснить, более высоким аэродинамическим сопротивлением решетки (табл. 3), которое в ходе экспериментов составляло от 8 до 20 % от сопротивления слоя.

При увеличенном диаметре отверстий $d_0 = 4,5$ мм и малой загрузке угля ($H_c = 30$ мм) наблюдались очаги фонтанирования с интенсивным выносом частиц. Установлено [4], что при увеличении диаметра отверстий повышается дальнобойность и мощность струй воздуха, что вызывает увеличение интенсивности соударения и, как следствие, истирания и «раскалывания» частиц. Таким образом, для получения сравнительно однородного псевдооживления и минимального истирания частиц следует выбирать решетки с возможно меньшими значениями площади живого сечения и диаметра отверстий.

На рис. 4 показаны некоторые кривые изменения сопротивления решетки и слоя угля различного фракционного состава в зависимости от скорости воздуха в аппарате. Графики построены для перепадов статического давления:

$$\Delta P_{ст1} = P_0 - P_1 \quad \Delta P_{ст2} = P_0 - P_2;$$

где P_0, P_1, P_2 — давление под воздухораспределительной решеткой, в слое на высоте 25 мм и над слоем на высоте 235 мм от воздухораспределительной решетки соответственно.

Вид полученных эмпирических зависимостей качественно совпадает с кривыми псевдооживления (см. рис. 2) и данными других исследователей. Так, для частиц угля фракции 10...20 мм и полифракционного состава (при высоте слоя 50 мм) граница начала псевдооживления получается достаточно плавной. Ярко выраженный «всплеск» давления имеет место для угля полифракционного состава лишь при высоте неподвижного слоя 65 мм, что можно объяснить, по-видимому, значительными силами сцепления между частицами при уплотнении слоя большой высоты. Величина максимального сопротивления, соответствующего началу псевдооживления (см. рис. 2) превышает сопротивление слоя в режиме развитого псевдооживления на 4 %, что согласуется с данными [1]. Незначительная величина «всплеска» давления при подборе дутьевого оборудования позволяет его пренебречь.

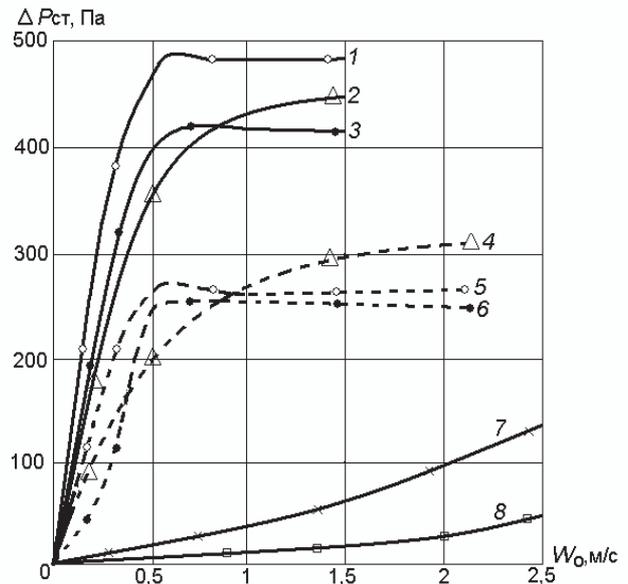


Рис. 4. Кривые псевдооживления угля и гидравлическое сопротивление решеток.

1, 3, 5, 6 — уголь полидисперсного состава: 1, 3 — для $\Delta P_{ст2}$ (1 — при $H_c = 65$ мм, 3 — при $H_c = 50$ мм); 5, 6 — для $\Delta P_{ст1}$ (5 — при $H_c = 65$ мм, 6 — при $H_c = 50$ мм); 2, 4 — уголь с $d_s = 15$ мм: 2 — для $\Delta P_{ст2}$, 4 — для $\Delta P_{ст1}$; 7, 8 — решетка: 7 — с $d_{отв} = 2,5$ мм, 8 — с $d_{отв} = 4,5$ мм.

С увеличением скорости газа (в диапазоне псевдооживления), при незначительном росте ΔP решетки, суммарное сопротивление слоя остается практически постоянным, что можно объяснить, вероятней всего, незначительным выносом частиц из слоя и соответственно снижением его сопротивления.

Кривые псевдооживления, полученные в глубине слоя и над ним, качественно совпадают, что свидетельствует о равномерном его оживлении по высоте и отсутствию сегрегации (расслоения частиц по размерам).

Представленные на рис. 4 данные позволяют выделить интервалы оптимальных скоростей газа, обеспечивающих хорошее псевдооживление и малый унос частиц: для угля фракции 10...20 мм — 1,5...2,0 м/с, полифракционного состава 0,3...0,5 м/с.

Рассмотрим возможности применения расчетных зависимостей при описании гидродинамики кипящего слоя угольных частиц. Для этого сравним экспериментальные данные со значениями $w_{кр}$, полученными по формулам табл. 1. Расчеты проведем для частиц $d_s = 0,015$ м при температурах 300 и 1173 К и для различных значений $\epsilon_{кр}$:

- 1) $\epsilon_{кр} = 0,4$ по [1];
- 2) $\epsilon_{кр} = 0,455$ — расчет по (2);
- 3) $\epsilon_{кр} = 0,48$ по [1] и расчету по (3).

Результаты сведены в табл. 4, из которой видны большие расхождения расчетных значений с экспериментальными. Наиболее точной оказалась формула Тодеса (формула (1) в табл. 1).

При значении $\epsilon_{кр} = 0,4$ (округлые частицы) расхождение составляет более 60 %, а при учете коэффициента формы $f = 1,54$ и $\epsilon_{кр} = 0,48$ расчетное значение $w_{кр}$ превышает более чем в 2 раза экспериментальные значения.

Таблица 4
Скорость начала псевдоожигения

Метод получения данных	Значение $w_{кр}$, м/с	
	при 300 К	при 1173 К
Эксперимент	1,5	–
Формула (1) $\epsilon_{кр} = 0,4$ $\epsilon_{кр} = 0,455$ $\epsilon_{кр} = 0,48$	2,5 3,0 3,3	4,6 5,7 6,2
Формула (2) $\epsilon_{кр} = 0,4$ $\epsilon_{кр} = 0,455$ $\epsilon_{кр} = 0,48$	2,7 3,6 4,1	5,0 7,1 8,2
Формула (3) $\epsilon_{кр} = 0,4$ $\epsilon_{кр} = 0,455$ $\epsilon_{кр} = 0,48$	4,7 5,2 5,5	6,2 7,1 7,5

Полученные результаты свидетельствуют о низкой надежности расчетных зависимостей по определению $w_{кр}$ для угольных частиц и ограниченной области их применения в практических расчетах.

Обобщая проведенные на холодной модели исследования гидродинамики топки с КС, отметим, что только в экспериментальных условиях можно получить качественную картину процесса псевдоожигения для частиц угля разного фракционного состава, найти интервалы оптимальных скоростей, обеспечивающих хорошее псевдоожигение и малый унос частиц, и определить направления оптимизации параметров воздухораспределительных решеток.

Литература

1. Расчеты аппаратов кипящего слоя : справ. / под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. — Л. : Химия, 1986. — 352 с.
2. Баскаков, А. П. Котлы и топки с кипящим слоем / А. П. Баскаков, В. В. Мацнев, И. В. Распопов. — М. : Энергоатомиздат, 1996. — 352 с.
3. Дребин, В. А. Свободное истечение сыпучих сред через одно- и многодырчатые днища и шаровые неподвижные насадки / В. А. Дребин, Д. М. Галерштейн, С. С. Забродский // ИФЖ. — 1981. — № 6. — С. 997-1007.
4. Разработка и создание каталитических генераторов тепла (КГТ) и разработка и внедрение технологических процессов на их основе : СКБ «Энергохиммаш». — Новосибирск, 1981. — 155 с.