

УДК 66.096.5

Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем

А.В. Митрофанов¹, К. Tannous², В.Е. Мизонов¹

¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²University of Campinas, Brazil

E-mail: mizonov46@mail.ru, katia@feq.unicamp.br

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время биомасса все шире используется в качестве топлива на электростанциях в топках с кипящим слоем. Однако эффективная организация сжигания биотоплива встречает немало трудностей из-за малой теоретической и экспериментальной изученности процесса. В частности, это относится к гидродинамике частиц биотоплива и инертного компонента, определяющей собственно процессы горения. В связи с этим необходимо исследование процесса псевдооживления смесей эвкалипта (топливо) и песка (инертный материал) и установление коэффициентов аэродинамического сопротивления частиц при их различной концентрации.

Материалы и методы: В качестве исследуемой биомассы использованы частицы эвкалипта в бинарной смеси с инертным материалом (песком). Эксперименты проведены в акриловой колонне с внутренним диаметром 0,92 м при соотношении эквивалентных диаметров частиц биомассы и инертного материала 1,5 к 6,0 и процентном содержании биомассы в смеси 5–15 %.

Результаты: Определены коэффициенты межфазного трения воздух-песок и воздух-эвкалипт как функция числа Рейнольдса. Измерены расширение слоя, расходная скорость воздуха и перепад давления.

Выводы: Установленные коэффициенты трения позволяют прогнозировать расширение псевдооживленного слоя песка с биомассой, а также могут быть использованы для описания структуры слоя с помощью ячеечных моделей.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, бинарная смесь частиц, биомасса, коэффициент аэродинамического сопротивления.

Experimental study of hydrodynamics of biofuel particles in a fluidized bed furnace

A.V. Mitrofanov¹, K. Tannous², V.E. Mizonov¹

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²University of Campinas, Brazil

E-mail: mizonov46@mail.ru, katia@feq.unicamp.br

Abstract

Background: Nowadays, biomass is used more and more often as a fuel at power plants in fluidized bed furnaces. However, it is difficult to organize fuel combustion efficiently as there are not enough theoretical and experimental data about the process. In particular, it concerns hydrodynamics of biofuel and inert particles, which determines the combustion process. Therefore, it is necessary to investigate fluidization of eucalyptus mixtures (biofuel) and sand (inert material) and to determine the drag coefficient for these particles at their various concentrations.

Materials and methods: The biomass studied was eucalyptus wood (*Eucalyptus grandis*) forming binary mixtures with an inert material (sand). The experiments were carried out in a 0,92 m inner diameter acrylic column. The ratio of average diameters of biomass/inert material was 1,5 to 6,0 and the mass fractions were 5–15%.

Results: The interfacial drag coefficients in gas–sand and gas–eucalyptus media were determined as a function of the Reynolds number. The fluidized bed expansion, superficial gas velocity and pressure drop were measured.

Conclusions: The values obtained for the drag force coefficients allow predicting the fluidized bed expansion of sand-biomass mixtures and can be used in cell models to describe the fluidized bed structure.

Key words: fluidized bed, binary mixture of particles, biomass, aerodynamic drag coefficient.

Уменьшение запасов ископаемого топлива, рост стоимости его добычи, увеличение потребления энергии на фоне ужесточения экологических требований побуждают человечество к более широкому использованию возобновляемых энергоресурсов, в том числе твердых видов топлива биологического происхождения. Сырье для производства биотоплива отличается большим разнообразием: оно может представлять собой отходы деревообрабатывающей промышленности (щепа, опилки, стружки и т.д.) или сельского

хозяйства (солома, лузга, шелуха и т.д.), а также твердые бытовые отходы [1].

Однако такой широкий спектр используемого сырья требует создания достаточно универсальных технологических решений для переработки различных видов топлива в широком диапазоне его характеристик. Указанному требованию в наибольшей степени отвечают топочные устройства с псевдооживленным (кипящим) слоем [1]. Техника псевдооживления наиболее приспособлена также и для совместного

сжигания различных видов топлива, в том числе биомассы в смеси с углем или инертным твердым материалом. Необходимость введения последнего обусловлена или невозможностью создания устойчивого псевдоожиженного состояния зернистого материала, состоящего только из частиц биомассы, или образованием псевдоожиженного слоя низкого качества (неустойчивого, с образованием сквозных каналов, поршнеобразованием и т.п.) [1, 2].

Универсальные зависимости для расчета гидромеханических параметров работы аппаратов с псевдоожиженным слоем практически отсутствуют, поэтому, учитывая крайне небольшой объем сведений о гидродинамических особенностях псевдоожижения многих видов твердого биотоплива, представляется актуальным вопрос их изучения.

Целью настоящего исследования является установление некоторых закономерностей псевдоожижения силикатного песка и частиц эвкалипта. Способность к быстрому росту и высокая теплота сгорания (4641 ккал/кг) [1] создают предпосылки для использования древесины эвкалипта в энергетике, которые лимитируются трудностями псевдоожижения частиц эвкалипта.

Ранее нами была предложена ячейная модель псевдоожиженного слоя, основанная на теории цепей Маркова [3]. В разработанной модели миграции частиц между ячейками рассчитывались с учетом стесненности их обтекания и взаимодействия друг с другом. Модель позволила рассчитать распределение концентраций частиц и локальных скоростей газа по высоте аппарата в установившемся режиме и показала удовлетворительную точность прогноза этих характеристик. Также было установлено, что расширение слоя определяется детерминированным конвективным переносом частиц.

В настоящем исследовании не рассматриваются вопросы неравномерности распределения твердой фазы в объеме слоя, поэтому слой рассматривается как одна ячейка идеального смешения, что не должно мешать расчету его расширения.

Режим обтекания частиц j -й фракции в слое определяется числом Рейнольдса:

$$Re_j = \frac{U d_j}{\nu}, \quad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость оживающего агента; d_j – диаметр частиц j -й фракции; скорость воздуха в слое U определяется соотношением

$$U = \frac{U_0}{1 - \varepsilon \frac{S_j}{S_{\max}}}, \quad (2)$$

где U_0 – скорость воздуха в пустом аппарате; U – скорость воздуха в слое при объемном со-

держании частиц всех фракций $S = \sum_{j=1}^m S_j$; $S_{\max}$ –

содержание частиц в объеме слоя при плотной упаковке (с учетом порозности).

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде (рис. 1).

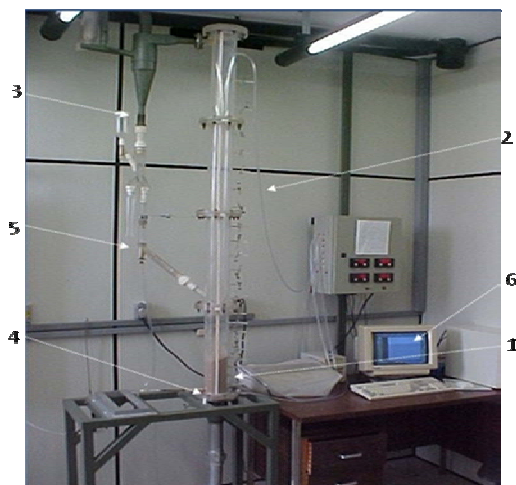


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – акриловая колонна; 2 – мембранные датчики давления; 3 – циклон; 4 – стальная решетка; 5 – кран для отбора сыпучего материала и организации рецикла; 6 – устройство обработки сигналов от датчиков давления

Реактор кипящего слоя был выполнен в виде цилиндрической акриловой колонны высотой 2 м с внутренним диаметром $D = 0,92$ м. В аппарат загружалась смесь песка и эвкалипта массой 0,8 кг. Массовая доля частиц эвкалипта варьировалась от 0 до 15 % с шагом 2,5 %. Эквивалентный диаметр частиц песка составлял $d_1 = 0,332$ мм, эквивалентный диаметр частиц эвкалипта – $d_2 = 0,986$ мм. Для каждой смеси фиксировалась высота слоя H_{fb} при различных скоростях оживающего агента.

Обработка результатов эксперимента включала в себя следующие этапы. Для известной высоты слоя H_{fb} рассчитывалось значение объемного содержания частиц всех фракций S . Затем по формуле (2) рассчитывалась фактическая скорость прохождения воздуха через слой U , а по формуле (1) определялось соответствующее этой скорости значение числа Рейнольдса для j -й фракции Re_j ($j = 1, 2$).

Аэродинамическая «крупность» фракции представлена через скорость витания частиц V_{Sj} , которая для состояния псевдоожижения должна быть равна скорости воздуха в слое U .

С другой стороны, скорость витания для частиц j -й фракции может быть выражена через коэффициент межфазного трения между газом и частицами [3]:

$$\lambda_j Re_j^2 = \frac{4}{3} Ar_j, \quad (3)$$

где Ar_j – число Архимеда для частиц j -й фракции.

Коэффициент сопротивления зависит от режима осаждения и в формуле (3) является единственной неизвестной. Таким образом, при известной высоте кипящего слоя зависимости (1)–(3) позволяют установить значения коэффи-

коэффициентов сопротивления частиц, которые обеспечивают указанное расширение слоя.

Полученные таким образом коэффициенты сопротивления частиц песка приведены на рис. 2.

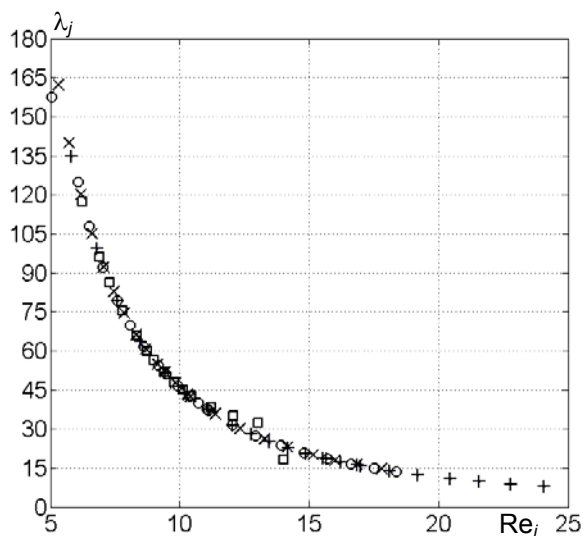


Рис. 2. Коэффициенты сопротивления частиц песка: x – чистый песок; o – смесь песка и эвкалипта (5% частиц эвкалипта по массе); □ – смесь песка и эвкалипта (10 % частиц эвкалипта по массе); + – смесь песка и эвкалипта (15 % частиц эвкалипта по массе)

Аналогичный расчет для частиц эвкалипта дает меньшие величины коэффициентов сопротивления и обеспечивает более высокие значения скоростей витания при том же режиме движения оживающего воздуха через слой. В качестве примера на рис. 3 показаны расчетные значения скоростей осаждения частиц эвкалипта и песка при оживлении их в смеси с процентным содержанием эвкалипта 10 % по массе.

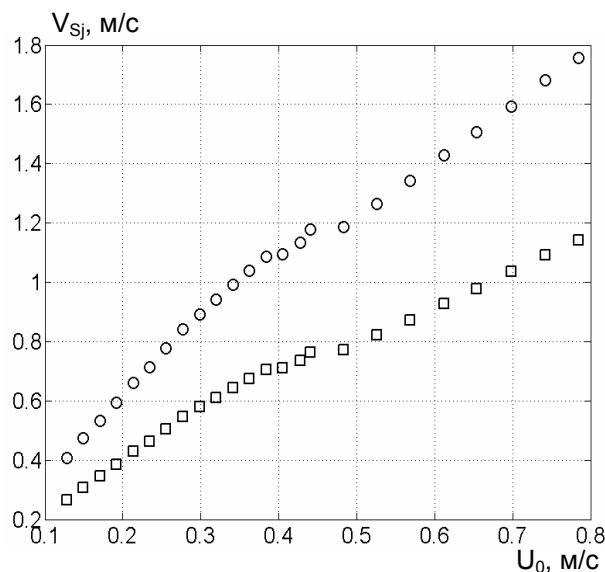


Рис. 3. Скорости витания для частиц песка и эвкалипта при псевдооживлении смеси с процентным содержанием эвкалипта 10 % по массе: o – для частиц эвкалипта; □ – для частиц песка

Анализ полученных значений (рис. 3) показывает, что скорости витания частиц эвкалипта при всех экспериментальных режимах псевдооживления больше скоростей обтекания их воздухом, которые устанавливаются равными скоростям осаждения частиц песка.

Расчетная однородность слоя является допущением, сделанным при моделировании; экспериментально же слой не являлся однородным. Визуально было отчетливо видно, что на любой высоте слоя присутствуют частицы всех фракций, так как «кипящий» песок перемешивает и частицы эвкалипта. Дальнейшее исследование структуры слоя требует привлечения в дополнение к зависимостям (1)–(3) ячеечной методологии.

Список литературы

1. Vale A.T. et al. Produção de energia do fuste de Eucalyptus grandis hill ex-maiden e Acacia mangium wild em diferentes níveis de adubação // SP: Revista Cerne. – Jan./mar. 2000. – Vol. 6. – № 001.
2. Cui H., Grace J.R. Fluidization of biomass particles: a review of experimental multiphase flow aspects // Chem. Eng. Sci. – 2007. – Vol. 62. – P. 45–55.
3. Математическая модель псевдооживления бинарной смеси частиц / А.В. Митрофанов, А.В. Огурцов, В.А. Марницкий и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 45–47.

References

1. Vale, A.T. et al. Produção de energia do fuste de Eucalyptus grandis hill ex-maiden e Acacia mangium wild em diferentes níveis de adubação. Lavras, SP: Revista Cerne, jan./mar. 2000, vol. 6, no. 001.
2. Cui, H.; Grace, J.R. Fluidization of biomass particles: a review of experimental multiphase flow aspects. Chem. Eng. Sci., 2007, vol. 62, pp. 45–55.
3. Mitrofanov, A.V., Ogurtsov, A.V., Magnitskii, V.A., Mizonov, V.E., Tannous, K. Mitrofanov A.V., Ogurtsov A.V., Magnitskiy V.A., Mizonov V.E., Tannous K. Matematicheskaya model' psevdoozhivleniya binarnoy smesi chastits [Mathematical model of fluidized binary particle mixture]. Vestnik IGEEU, 2012, issue 1, pp. 45–47.

Митрофанов Андрей Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,
e-mail: and2mit@mail.ru

Tannous Katia,
University of Campinas, Brazil,
Dr.-Eng., Professor, Chemical Engineering School,
e-mail: katia@feq.unicamp.br

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
e-mail: mizonov46@mail.ru