

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДМОДЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ГИДРОДИНАМИКУ ГАЗИФИКАТОРА БИОМАССЫ С ФОНТАНИРУЮЩИМ СЛОЕМ

Аннотация. В работе выполнено численное исследование влияния моделей сопротивления на гидродинамику газификатора биомассы с фонтанирующим слоем. По литературным данным была построена CFD-модель и проведены расчёты гидродинамики без учета химического реагирования и теплообмена. При вычислениях использовались подмодели сопротивления *GidaspowErgunWenYu*, *SyamlalObrien* и *GidaspowSchillerNaumann*. Сравнение полученных результатов проводилось с работой, в которой проведено моделирование этого же эксперимента. Из полученных данных видно, что результаты расчёта, в котором используется подмодель сопротивления *GidaspowErgunWenYu*, имеют гидродинамику движения частиц схожую с литературным моделированием эксперимента. При этом градиент порозности отличается, что может быть связано с проведением расчетов без учета газо-выделение из фонтанирующего слоя, отсутствием теплообмена и постоянством свойств газовой среды.

Ключевые слова: газификация, биомасса, фонтанирующий слой, CFD-моделирование, модель сопротивления.

Abstract. In this work, a numerical study of the influence of drag models on the hydrodynamics of a biomass gasifier with a spouting bed is performed. According to the literature data, a CFD model was built and hydrodynamic calculations were carried out without taking into account the chemical reaction and heat and mass transfer. The resistance submodels *GidaspowErgunWenYu*, *SyamlalObrien*, and *GidaspowSchillerNaumann* were used in the calculations. The obtained results were compared with the work in which the simulation of the same experiment was carried out. From the data obtained, it can be seen that the results of the calculation, which uses the *GidaspowErgunWenYu* drag submodel, have particle motion hydrodynamics similar to the literature simulation of the experiment. At the same time, the porosity gradient is different, which may be due to the calculations without taking into account the gas release from the spouting layer, the absence of heat transfer and the constancy of the properties of the gaseous medium.

Key words: gasification, biomass, spouted bed, CFD-modeling, drag model.

Биомасса используется в качестве сырья в различных технологиях для производства топлива, энергии и тепла, для ее преобразования в газообразное топливо используются газификаторы. Конические газификаторы с фонтанирующим слоем работают лучше, чем обычные газификаторы с псевдооживленным слоем, поскольку интенсивная циркуляция твердых частиц позволяет использовать более крупные частицы, со средним диаметром 1 мм или более, что способствует лучшему теплообмену между фазами [1]. Для глубокого понимания процессов, происходящих в газификаторе, важным моментом является их численное моделирование, правильно построенная модель может способствовать дальнейшей оптимизации, масштабированию и интенсификации процессов.

Начальные данные для эксперимента взяты из статьи Т. Song [2], где приводятся экспериментальные исследования по получению водорода с помощью газификации биомассы во взаимосвязанных псевдооживленных слоях. По имеющимся данным строится газификатор и создается его полигональная сетка, используемая для симуляции фонтанирующего слоя с использованием модели сопротивления, полученные данные сравниваются с работой S. Yang [3], где используется идентичная сетка и модель сопротивления. Далее рассматриваются другие модели сопротивления для определения наиболее удовлетворительного результата. В данной работе рассматривается только гидродинамическая модель газификатора, где не учитываются реакции и не происходит газо-выделение из слоя.

Модель фонтанирующего слоя представляет собой псевдо 2D газификатор, с высотой 1700 мм из которых 200 мм – высота конического сечения с углом 62° . Поперечное сечение газификатора 230 мм на 40 мм, входное сечение имеет ширину 20 мм (рис. 1).

На рисунке 1, *а* представлена геометрия псевдо 2D газификатора, используемого в работе, на рисунке (*б*) показана его полигональная сетка.

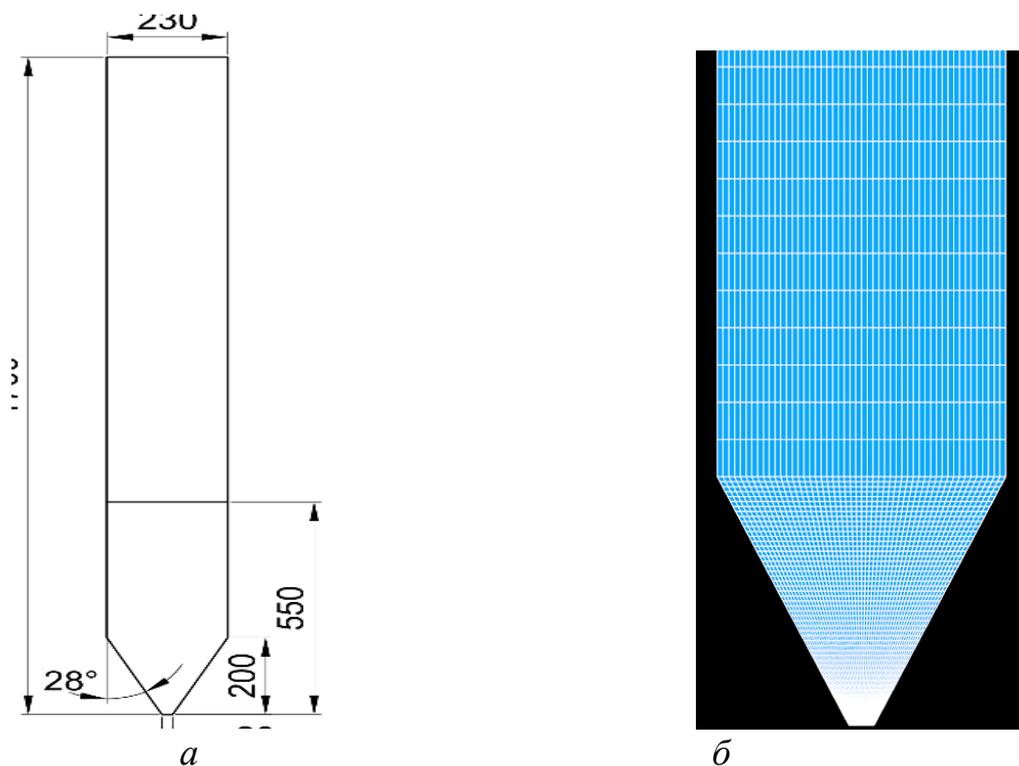


Рис. 1. Рассматриваемый в работе газификатор: *а* – геометрия псевдо 2D газификатора; *б* – полигональная сетка газификатора

Основной частицей в установке, образующей начальную высоту слоя, является песок. Во входное отверстие влетают пар и частицы биомассы. Все имеющиеся для эксперимента параметры представлены в таблице 1.

Параметры, использующиеся для создания симуляции

Параметр, ед. измерения	Значение
Плотность песка, кг/м ³	2500
Плотность пара, кг/м ³	0.343
Диаметр частиц песка, нм	350
Диаметр частиц биомассы, нм	1500
Объемная доля песка	0.6
Скорость пара, м/с	3.61
Высота фонтанирующего слоя, м	0.55
Температура пара на входе, К	640
Массовый расход пара на входе, кг/ч	3.6

Для моделирования поставленной задачи используется OpenFOAM, представляющий собой свободно распространяемый инструментальный для решения задач вычислительной гидродинамики.

В качестве решателя используется twoPhaseEulerFoam предназначенный для системы из двух нереагирующих фаз сжимаемой жидкости. Одна фаза в этой системе всегда является дисперсной, что является хорошим решением для моделирования псевдооживленных и фонтанирующих слоев в системах жидкость-твердое тело.

Поведение частиц в фонтанирующем слое во многом зависит от модели сопротивления, препятствующей движению частиц в жидкостях, решатель twoPhaseEulerFoam позволяет использовать порядка десяти различных моделей, в данной работе будет рассмотрены три из них.

В стандартном виде сопротивление можно представить в виде формулы (1):

$$F_D = \frac{C_D \rho_f A |V_r| V_r}{2}, \quad (1)$$

где C_D – коэффициент сопротивления; ρ_f – плотность среды, кг/м³; V_r – относительная скорость между двумя фазами, м/с; A – площадь частицы.

Коэффициент сопротивления, как и его формула, варьируется в зависимости от используемой модели.

Для модели SyamlalO'Brien, описанной в [4], коэффициент сопротивления представлен в виде формулы (2):

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re}{V_r}}} \right)^2, \quad (2)$$

где Re – число Рейнольдса,

Модель GidaspowSchillerNaumann использует коэффициент сопротивления описанный в [5] и записывается в виде формулы (3):

$$\begin{cases} C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}, \quad (3)$$

Данная модель повторяет модель SchillerNaumann за исключением того, что она включает в себя функцию коррекции пористости в функцию коэффициента сопротивления, где $f = \beta_{air}^{-2,65}$. Таким образом, модель может быть использована не только для систем газ-жидкость и жидкость-жидкость, но и для систем жидкость-твердое тело.

Модель GidaspowErgunWenYu представляет собой сочетание моделей сопротивления Ergun и WenYu, которая подробно описана в [6] в ней коэффициент сопротивления записывается, как и в случае с моделью GidaspowSchillerNaumann, в виде формулы (3), при этом в зависимости от значений фракции твердой фазы β используется либо коэффициент корреляции Ergun ($\beta < 0.8$), либо WenYu ($\beta \geq 0.8$).

Все три задачи считаются на протяжении 20 секунд в результате чего появляется возможность рассмотреть движение частиц в конце (рис. 2).

На рисунке 2 и 3 представлен фонтанирующий слой после 20 секунд и 1 секунды симуляции для всех трех моделей сопротивления.

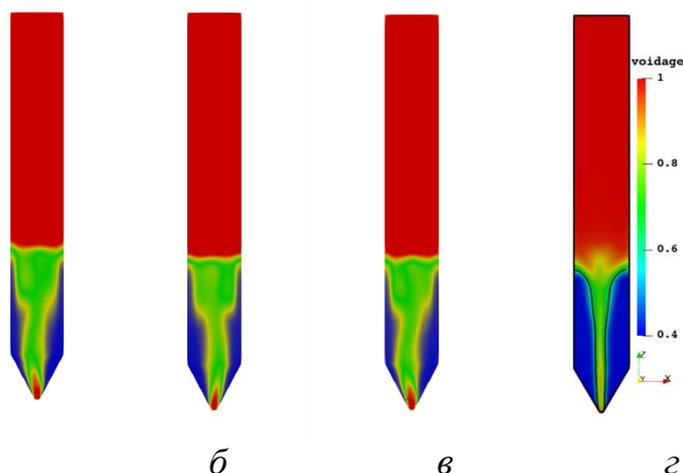


Рис. 2. Фонтанирующий слой в конце симуляции с соответствующими моделями сопротивления: *a* – GidaspowErgunWenYu; *б* – SyamlalObrien; *в* – GidaspowSchillerNaumann; *г* – GidaspowErgunWenYu в эксперименте Yang S. [3]

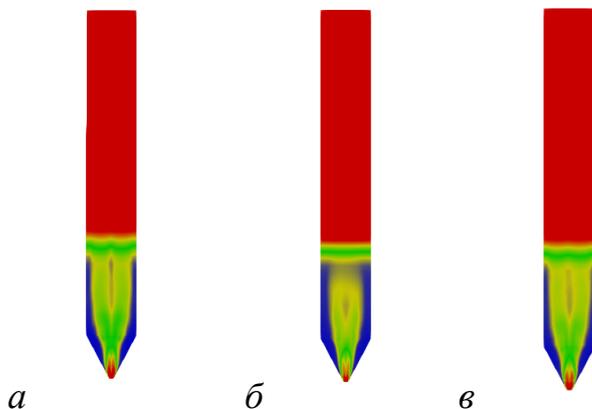


Рис. 3. Фонтанирующий слой после 1 сек. симуляции с соответствующими моделями сопротивления: *a* – GidaspowErgunWenYu; *б* – SyamlalObrien; *в* – GidaspowSchillerNaumann

Из полученных данных видно, что результаты расчёта, в котором используется подмодель сопротивления GidaspowErgunWenYu, имеют гидродинамику движения частиц схожую с литературным моделированием эксперимента. При этом градиент порозности отличается, что может быть связано с проведением расчетов без учета газовой выделением из фонтанирующего слоя, отсутствием теплообмена и постоянством свойств газовой среды.

При сравнении данных, полученных при использовании других моделей сопротивления, видно, что частицы ведут себя аналогичным образом, при этом, при симуляции с использованием модели SyamlalObrien высота фонтанирования немного уменьшается, так же при рассмотрении результатов по прошествии одной секунды с момента начала симуляции, можно заметить, что само фонтанирование также происходит позднее. При заданных параметрах модели GidaspowErgunWenYu и GidaspowSchillerNaumann ведут себя идентично, полученные в дальнейшем данные могут отличаться, при изменении соотношения расхода пара к расходу биомассы, также отличия могут возникнуть при учете происходящих в расчете химических реакций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список использованных источников

1. Makibar J., Alava I., Fernandez-Akarregi A.R. Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot-plant draft tube conical spouted bed reactor // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2011. Vol. 50. Iss. 8. Pp. 790-798.
2. Song T., Wu J. Experimental investigation on hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds // BIOMASS AND BIOENERGY. 2012. Vol. 36. Pp. 258-267.
3. Yang S., Fan F., Wei Y., Jianhang H. Three-dimensional MP-PIC simulation of the steam gasification of biomass in a spouted bed gasifier // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 210. Art. 112689.
4. Syamlal M. Hydrodynamic Theory // MFIX Documentation Theory Guide. 1993. Pp. 6-30.
5. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions // Academic Press, New York. 1994.
6. Enwald H., Peirano E., Almstedt A. EULERIAN TWO-PHASE FLOW THEORY APPLIED TO FLUIDIZATION // Int. J. Multiphase Flow. 1996. Vol. 22. Pp. 21-66.