

Однако с уверенностью можно сказать, что в дальнейшем производство чугуна с использованием альтернативных способов несомненно будет развиваться.

Эта тенденция будет способствовать вовлечению неподготовленного железорудного сырья и дешевых углей в производство металла, вовлечению мелких железных руд или хвостов обогащения железных руд, которые неэффективно и экономически невыгодно подвергать окускованию и в дальнейшем использовать в доменной плавке, а также переработке различных металлургических отходов на предприятиях полного цикла.

Список использованных источников

1. Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. и др. Высокотемпературное углетермическое восстановление сидеритовых руд в электрической дуге // Металлург. 2016. № 11. С. 31-34.

2. Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г., Епишин А.Ю., Артов Д.А., Спиринов Н.А. Лабораторные исследования дефосфорации железной руды месторождения Gara Djebilet (Алжир) пирогидрометаллургическим способом. Сталь. 2020. С. 14-15.

3. Патент 2612330 РФ, МПК5 C21B13/10. Способ прямого восстановления материалов, содержащих оксиды металлов, с получением расплава металла и устройство осуществления способа / Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю. и др.: - № 2014154385; заявл. 30.12.2014; опубл. 07.03.2017, Бюл. № 7.

УДК 608.4

М. И. Ершов^{1,2}, А. Ф. Рыжков¹, В. Г. Тупоногов¹, Р. И. Шарипов¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

² Группа компаний «ПЛИМ Урал», г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА

Аннотация. Была произведена валидация математической модели обтекания одиночных частиц на основе результатов экспериментов Роу и Хенвуда. Произведено численное моделирование с использованием различных профилей скорости на входе. Относительное расстояние между шариками (x/d) равнялось 5, 11, 17 и 23. Моделирование показало, что с ростом числа Рейнольдса монотонно растет относительное межсферное расстояние (x/d), при котором отношение сил $F_2/F_1 = 0,95$. Максимальная концентрация дисперсного потока увеличивается с уменьшением плотности частиц.

Ключевые слова: моделирование, CFD, число Рейнольдса, сфера, Space Claim Direct Modeler.

Abstract. A mathematical model of the flow around single particles was validated based on the results of the experiments of Rowe and Henwood. Numerical simulations were performed using various input velocity profiles. The relative distance between the balls (x/d) was 5, 11, 17 and 23.

The simulation showed that with an increase in the Reynolds number, the relative interspherical distance (x/d) monotonically increases, at which the ratio of forces $F_2/F_1 = 0.95$. The maximum concentration of the dispersed flow increases with decreasing particle density.

Key words: *mathematical modeling, CFD, Reynolds number, sphere, Space Claim Direct Modeler.*

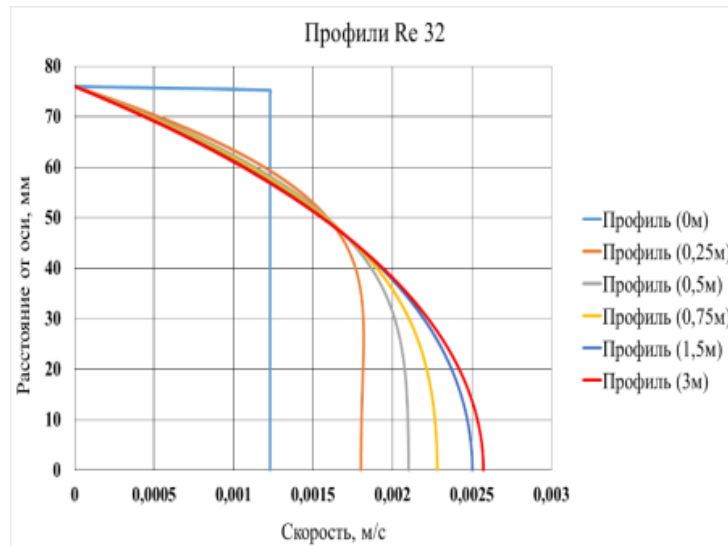
Реакторы с пневмотранспортом мелких частиц применяются для проведения обжига, газификации, сушки и других технологических процессов, эффективность которых в значительной мере определяется гидродинамикой дисперсного потока. В данной работе было изучено влияния параметров частиц на максимальную объемную концентрацию частиц, при которой еще реализуется устойчивый режим пневмотранспорта частиц. Была произведена валидация математической модели обтекания одиночных частиц на основе результатов экспериментов Роу и Хенвуда [2].

В опытах [2] две закрепленные полиэтиленовые сферы диаметром 12,7 мм омываются ламинарным потоком воды при различных расстояниях, и сравнивается сила, действующая на вторую сферу с силой, действующей на одиночную сферу. Основа установки – открытый сосуд из оргстекла длиной 915 мм и поперечным сечением 152×152 мм. Скорость потока измерялась только на оси канала по возмущению струи красителя. Измерение силы давления потока на сферу проводилось по отклонению нихромовой проволоки, на которую были подвешены сферы.

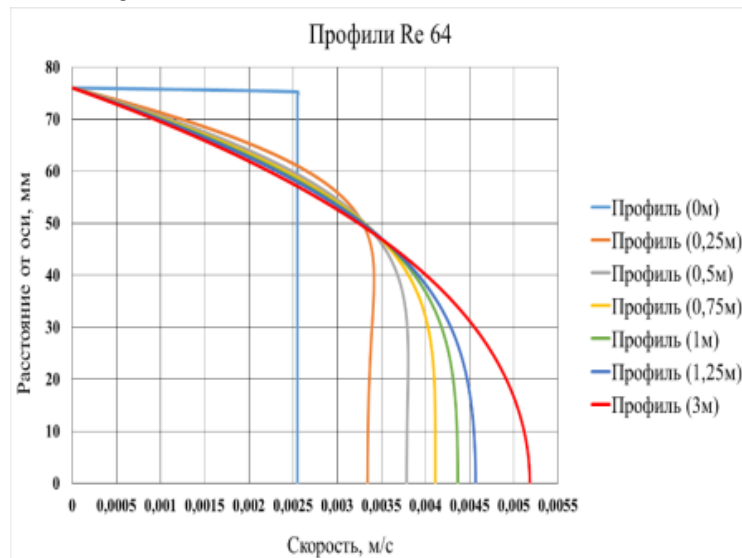
В выполненных нами численных исследованиях геометрия расчетной области моделировалась в программе Space Claim Direct Modeler. Был построен канал с поперечным сечением 152×152 мм, длина канала 915 мм. Расстояние от входа до первой сферы 100 мм. Расстояние между центрами сфер от 76,2 мм до 304,8 мм. Для каждого последующего случая сфера отдалается от первой на 76,2 мм. В каждом случае сферы зафиксированы на месте и не двигаются. При моделировании с помощью CFD было установлено, что благодаря симметричности потока можно моделировать 1/4 часть канала и шариков почти без потери точности расчета, тем самым снижая размерность сетки в 4 раза. Принималось, что скорость установившегося потока в районе оси 0,0025; 0,0050; 0,0075 м/с, что соответствует числам Рейнольдса 32, 64 и 96. Вязкость среды моделировалась в ламинарной постановке. Гравитация не учитывалась из-за отсутствия перепада высот в системе.

На рисунке 1 показаны профили скорости вдоль перпендикулярной линии от оси до стенки и расстояние от входа потока до рассматриваемой плоскости. Приводится зависимость скорости от расстояния до оси. Здесь мы можем заметить, как поток трансформируется из плоского до параболического состояния. Чем ниже скорость, тем быстрее происходит данный процесс.

a



б



в

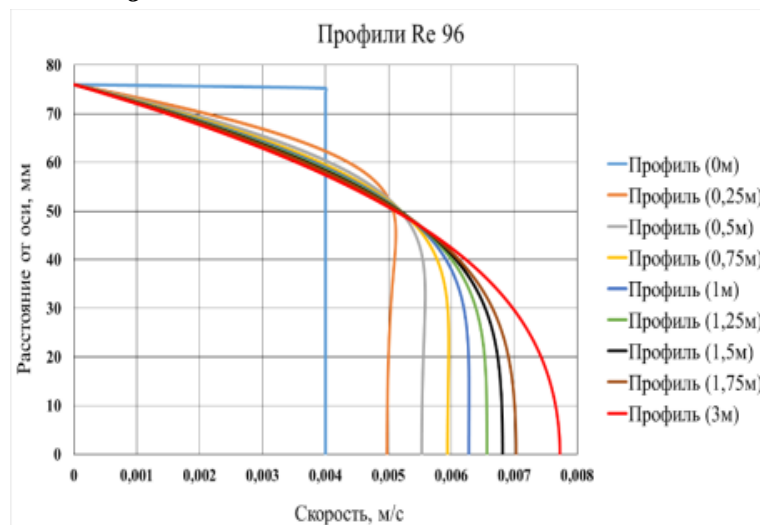


Рис. 1. Возможные профили скорости при числах Рейнольдса 32 (*a*), 64 (*б*) и 96 (*в*)

Произведено численное моделирование с использованием различных профилей скорости на входе. Относительное расстояние между шариками (x/d) равнялось 5, 11, 17 и 23. Результаты зависимости отношения сил от x/d показаны на рис. 2. Полученные в CFD точки для различных чисел Рейнольдса были смещены на $0,4 x/d$ влево или вправо, чтобы избежать их слияния.

Расчет CFD показал, что при использовании профиля скорости, сформировавшегося через 3 метра после входа потока с плоским профилем в канал, чем меньше число Рейнольдса, тем выше отношение сил при одинаковом относительном расстоянии между сферами. При этом использование наиболее развитого профиля течения даёт результаты значительно ниже, чем в эксперименте (красные маркеры). Использование других профилей показало гораздо лучшее сходство с экспериментом по уровню отношения сил, а также по независимости от Рейнольдса, в особенности профили скорости, снятые на отметках длины канала 0,5 и 0,75 м (подсвечены желтым и фиолетовым, соответственно). Однако при x/d менее 10 отклонение от эксперимента ещё достаточно ярко выражено.

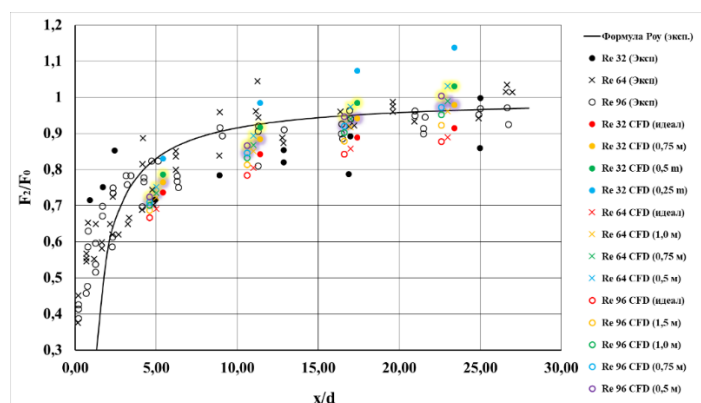


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных результатов [2] (черные маркеры и линия) с результатами численного моделирования при различных профилях

Была также отмечена возможность возникновения отношения сил давления больше 1 при использовании сильно неустановившихся профилей. Это обусловлено тем, что преодолевая расстояние между сферами, поток ускоряется в районе оси канала и приходит ко второму шарiku с большей скоростью, чем к первому.

Далее, для выявления зависимости объёмной концентрации частиц, при которой аэродинамическое влияние первой сферы на вторую снижается до 5 %, от их диаметра и плотности было рассмотрено 25 комбинаций диаметров и плотностей частиц.

Задача решалась в 2D-осесимметричной постановке. Область представляет из себя половину сечения цилиндра, причем внешние стенки заданы с проскальзыванием. Размеры области задавались относительно диаметра частиц. Для некоторых сочетаний диаметров и плотностей проводились проверки на сеточную независимость путем пересчета на сетке с размерами в 1,5-2 раза меньше, чем в исходном случае.

Результаты расчетов и корреляционная зависимость представлены на рис. 3. Моделирование показало, что с ростом числа Рейнольдса монотонно растет относительное межсферное расстояние (x/d), при котором отношение сил $F_2/F_1 = 0,95$. Следовательно, с ростом числа Рейнольдса будет монотонно убывать объёмная концентрация частиц, соответствующая искомому состоянию (рис. 3).

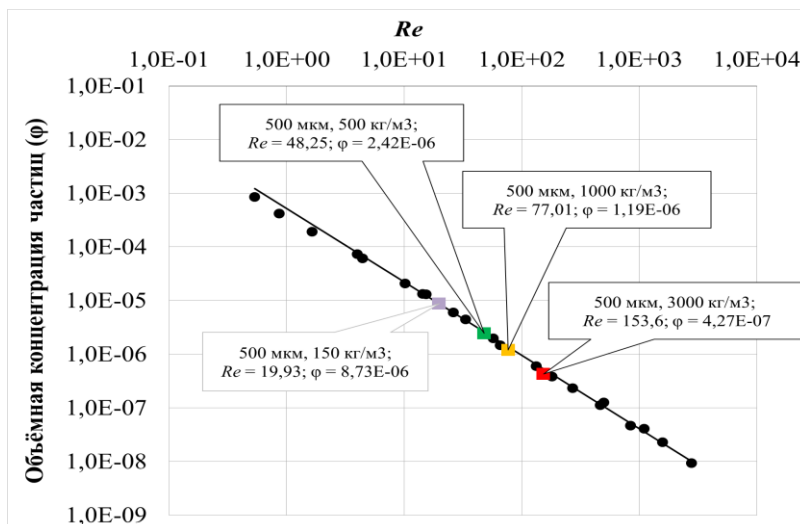


Рис. 3. Зависимость объёмной концентрации частиц при снижении влияния на вторую сферу до 5 % от числа Re для всех расчетных случаев (точки – результаты расчетов, кривая – аппроксимация)

На рис. 3 подсвечены точки, соответствующие частицам диаметром 500 мкм для исходной биомассы (зеленая, плотность 500 кг/м³), продуктов пиролиза биомассы (лиловая, плотность 150 кг/м³) и угля (оранжевая и красная, плотность в интервале 1000-3000 кг/м³). Согласно расчету, при переходе с угля на исходную биомассу при диаметре частиц 500 мкм, плотность газодисперсного потока может быть увеличена в 2-5 раз, а при переходе на продукты пиролиза биомассы – в 7-20 раз, что может обеспечить соответствующее снижение объема аппарата.

Полученные результаты показали:

1. CFD моделирование показывает, что с ростом числа Рейнольдса отношение сил давления снижается при фиксированном межсферном расстоянии.
2. Поток биомассы может быть более концентрированным, чем потоки материалов с большей плотностью.

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. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

2. Drag forces in a hydraulic model of a fluidized bed. Part I / P.N. Rowe, G.A. Henwood // Trans. Instn. Chem. Engrs. 1961. № 39. Pp. 43-54.

3. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.

УДК 669.046.44

А. Я. Журавлева, О. В. Матюхин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ И ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЕЧИ ОБЖИГА УГЛЕГРАФИТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. *Представлены результаты теплотехнических исследований шихты и электродных масс печи для обжига углеграфитовых материалов. Полученные результаты позволили построить более полную математическую модель распределения температур. А также были проведены исследования выхода летучих из электродных масс, благодаря чему можно сделать вывод, какую добавку в тепловой баланс дает сгорание выделившихся при обжиге летучих.*

Ключевые слова: *печь для обжига углеграфитовых материалов, теплотехнические свойства, выход летучих, пересыпка.*

Abstract. *The results of thermal engineering studies of the charge and electrode masses of the kiln for firing carbon-graphite materials are presented. The results obtained made it possible to construct a more complete mathematical model of the temperature distribution. And studies have also been conducted on the release of volatiles from the electrode masses, so that it can be concluded what kind of additive to the thermal balance is given by the combustion of volatiles released during firing.*

Key words: *kiln for firing carbon-graphite materials, thermal engineering properties, volatile output, refilling.*

Введение

Процесс обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах характеризуется значительной неравномерностью температурного поля в заготовках. Нагрев заготовок осуществляется за счет конвективного и радиационного теплообмена между дымовыми газами, проходящими через муфельные каналы, и теплопередачи через стенку муфеля и пересыпку к заготовкам. Распределение температуры по диаметру и высоте электродной заготовки в процессе обжига определяют условия теплообмена и пирогенетические изменения связующего [1].

В настоящей работе описаны исследования теплотехнических характеристик углеродсодержащих материалов и пересыпки печи обжига углеграфитовой продукции.