

Исследование циркуляции и сепарации бинарных смесей частиц в установках с химическими циклами сжигания и газификации твердых топлив*

Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Долгушин И.А.
ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”
г Москва, Российская Федерация
vti@vti.ru

Аннотация. Технология химических циклов сжигания и газификации топлив является одной из наиболее перспективных для улавливания CO_2 от энергетических объектов. При сжигании и газификации твердых топлив к оксидам металлов – носителям кислорода добавляется коксозольный остаток. Таким образом, поток состоит из частиц различной плотности. В этих условиях важно определить, как меняется циркуляция и как сепарируются частицы в циклонах контура циркуляции. Дано описание методики моделирования указанных процессов, экспериментальной установки и режимов проведения опытов. Приведены данные о влиянии скорости газа в реакторе с циркулирующим кипящим слоем на удельный расход циркулирующего материала. Показано, что влияние добавки легкой фракции (песка) в пределах 3...12 % к массе оксидов металлов (Al_2O_3) не существенно меняет этот расход. Эффективность улавливания в циклоне при высокой концентрации твердой фазы очень велика и превышает 99,99 %. С ростом концентрации она несколько увеличивается. Наблюдается сложная зависимость сопротивления циклона от массовой концентрации частиц. В результате анализа опытных данных настоящей работы, а также предыдущих исследований и зарубежных данных предложены формула для расчета поправки к сопротивлению циклонов на чистом потоке газа. Заметного влияния добавки песка в пределах 3...12 % к массе Al_2O_3 не обнаружено, что позволяет использовать разработанные ранее зависимости для расчета циркуляции и сепарации частиц в системах сжигания твердого топлива в химических циклах.

Ключевые слова: улавливание CO_2 , химические циклы сжигания и газификации топлив, оксиды металлов – носители кислорода, циркулирующий кипящий слой, бинарные смеси, гидродинамика слоя, сопротивление циклонов, эффективность улавливания частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее перспективных технологий улавливания CO_2 от энергетических котлов на органическом топливе является технология сжигания и газификации топлив в химических циклах. Суть ее сводится к такой организации процесса горения, когда переносчиком кислорода к топливу является не воздух, а оксид металла. Последний при взаимодействии с топливом в топливном реакторе восстанавливается до металла (или более низкого оксида) с образованием CO_2 и водяного пара. После этого металл окисляется в воздушном реакторе, и получившийся оксид вновь направляется в цикл. Выходящие

из топливного реактора газы после конденсации водяного пара представляют собой практически чистый CO_2 , который может быть направлен на захоронение или утилизацию. В результате затрат энергии для сепарации CO_2 от N_2 не требуется, именно поэтому потери на собственные нужды такой системы состоят в основном из затрат на сжатие CO_2 . В результате суммарное снижение КПД блоков с химическими циклами оказывается существенно меньше (около 4%) по сравнению с другими технологиями улавливания CO_2 [1].

Мировой эксплуатационный опыт сжигания топлив в химических циклах, включающих носители кислорода с основой на оксидах Ni, Fe, Mn, Cu и Co, насчитывает более 9000 часов [2]. В последнее время значительный интерес проявляется к использованию естественных дешевых минералов – ильменита и железомарганцевых минералов. Критическим в этой технологии является надежное обеспечение высокой кратности циркуляции материала между реакторами для поддержания заданной температуры процесса.

При сжигании и газификации твердых топлив к циркулирующим оксидам металлов неизбежно добавляется и коксозольный остаток. В этих условиях важно определить гидродинамические параметры оживления и граничные скорости начала движения бинарных смесей, исследовать режимы циркуляции в системе связанных реакторов. Учитывая, что до сих пор в мировой практике вопросы гидродинамики и сепарации частиц в условиях использования циркуляционных контуров связанных между собой реакторов с КС и ЦКС еще совершенно не изучены, актуальность и научная новизна таких исследований высока. Первые результаты работы, относящиеся к исследованию условий псевдооживления, представлены в [3]. Проведены также исследования массовых потоков по ширине реактора с ЦКС при различных долях легкой фракции. Настоящие исследования относятся к вопросам циркуляции и сепарации бинарных смесей частиц.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Важным вопросом является моделирование условий гидродинамики при использовании смесей частиц оксидов металлов и золы. При этом наиболее существенным является выбор размеров этих частиц. В [3, 4] рассмотрены

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00294\17

вопросы моделирования размеров частиц. Показано, что при моделировании процессов движения бинарных смесей следует применять широкие фракции песка со средним размером около 0,2 мм и узкие фракции оксидов металлов с близкими к песку размерами.

Важным является определение массы материалов в системе, прежде всего в реакторе с ЦКС, а также возможной доли легкой фракции (песка). В соответствии с [1] удельная масса оксидов металлов в топливном реакторе на один тепловой МВт составляет 360...750 кг. Так как воздушный реактор с ЦКС работает при скорости газов в 2...3 большей, чем топливный реактор, то удельная масса в нем должна составлять 150...250 кг/МВт. Крупнейшая экспериментальная установка [5] снабжена реактором с ЦКС сечением 0,273 м², на ней сжигался уголь с расходом 150 кг/ч. Масса оксидов в реакторе с ЦКС составляла около 200 кг, а высота насыпного слоя – 0,35 м. Для нашей экспериментальной установки с сечением 0,06 м² эквивалентная масса должны составлять 40...50 кг. Исходя из расхода и зольности угля в работе [5] в установку поступало примерно 20 кг/ч золы. Значительная ее часть выводилась в виде летучей золы и донной золы из ректора с КС. Грубые оценки дают примерный диапазон доли легкой фракции (золы или песка) на уровне 3...12 % от общей массы материала в реакторе с ЦКС.

Подробное описание установки и схемы размещения реакторов приведено в [6]. Реактор с ЦКС представляет собой вертикальную колонну сечением 0,2×0,3 м высотой 5,4 м, к верхней части которой присоединён патрубок циклона. Воздух из циклона сбрасывается в осадительную камеру, на выходе из которой установлен металлканевый фильтр. К конусной части циклона присоединен опускной стояк сечением 0,1×0,1 м. В средней части стояка установлен отсечной поворотный шибер, который используется для определения расхода материала по циркуляционному контуру. Стояк соединяется с верхним петлевым пневматическим затвором. Конструкция затвора позволяет направлять часть материала в реактор с ЦКС, а другую часть – через стояк с L-клапаном сечением 44×94 мм с длиной горизонтальной части 420 мм в нижнюю часть реактора с КС. Реактор с КС имеет нижнюю секцию сечением 0,28×0,2 м и высотой 0,5 м, переходный конус и верхнюю секцию сечением 0,4×0,4 м и высотой 1,5 м. Он соединен точкой, размещенной в конусной части реактора с петлевым затвором, направляющим поток материала в нижнюю секцию реактора с ЦКС.

Конструкция циклона представлена на рис. 1. Для повышения эффективности улавливания мелких частиц выхлопной патрубок циклона установлен эксцентрично со смещением от входного патрубка [7].

При проведении исследований измерялись расходы материала в опускном стояке под циклоном с помощью отсечного шибера. Расходы всех потоков воздуха измерялись с помощью предварительно оттарированных расходомерных шайб и ротаметров. Сопротивление циклона определялось по перепадам давления между верхней частью реактора с ЦКС и выхлопным патрубком перед входом в фильтр тонкой очистки, кроме того измерялся перепад давлений на участках реактор цилиндрическая часть циклона и цилиндрическая часть циклона – выхлопной патрубок. Величина уноса из циклона определялась весо-

вым способом – после 1 часа работы на постоянном режиме выгружался накопившийся материал и взвешивался. Пробы уноса и циркулирующего материала после каждого опыта подвергались определению гранулометрического состава. Мелкие частицы уноса анализировались на приборе фирмы Fitch. Доли оксидов алюминия и песка в отобранных пробах определялись с помощью рентгенофазового анализа на приборе VRA-30 с предварительной тарировкой на чистом оксиде алюминия и песке.

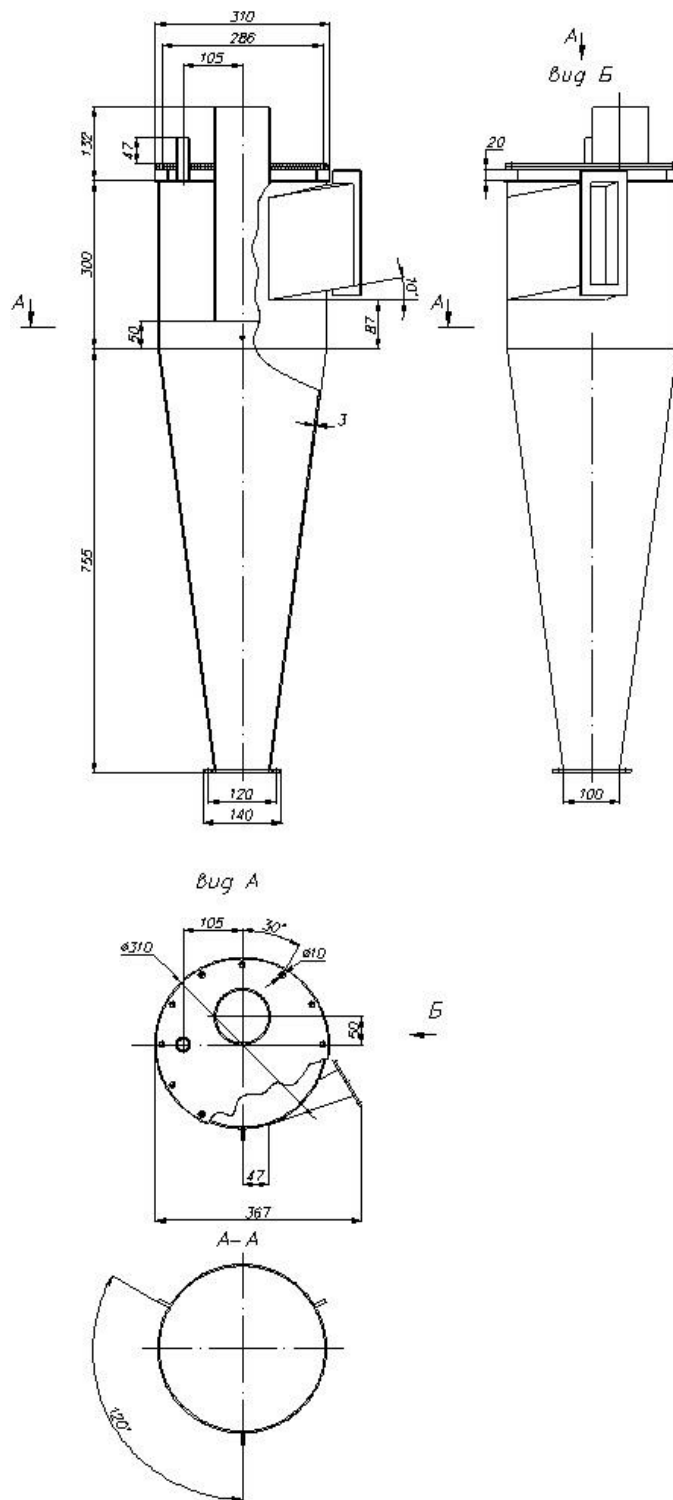


Рис. 1. Конструкция циклона

Средний по поверхности размер частиц оксидов алюминия составил 0,236 мм, истинная плотность 3940 кг/м³, насыпная плотность – 1970 кг/м³. В процессе опытов поддерживалась масса материала в реакторе с ЦКС 36...45 кг. Первоначально опыт проводился на чистом оксиде алюминия, затем в установку добавлялось около 1,5 кг песка (средний размер по поверхности 0,22 мм, истинная плотность 2600 кг/м³, насыпная плотность 1560 кг/м³). Диапазон доли песка от общей массы материала составил 3,5...12%. Основная часть исследований эффективности улавливания частиц проводилась с долей песка около 11%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 представлена зависимость удельного расхода циркулирующего материала, приведенного к сечению реактора с ЦКС, от скорости воздуха в нем. Рост скорости приводит к существенному увеличению расхода циркулирующего материала. Данные полученные при загрузке оксидами алюминия и смеси с песком (3...12% по массе) близки друг к другу. Несколько большие значения удельных расходов при загрузке установки только оксидами металлов и смесями с массовой долей 7% и менее связанны, по-видимому, с повышенной массой материала в реакторе с ЦКС (40...44 кг) по сравнению с опытами с долей песка 11% (36...40 кг). На этом же рисунке приведены данные наших исследований при загрузке песком. Они лежат выше данных настоящих исследований, что определяется как несколько меньшим средним размером частиц (0,18...0,2 мм), так и большей массой песка в реакторе с ЦКС (до 60 кг). Это подтверждает возможность использования разработанных ранее зависимостей [6, 8].

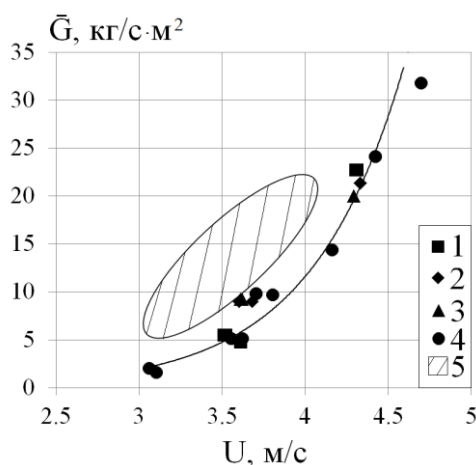


Рис. 2. Зависимость удельного расхода частиц от скорости ожигения при различных долях песка в смеси: 1 – чистый Al₂O₃; 2 – 3...4% песка; 3 – 6...7% песка; 4 – 10...12% песка; 5 – песок с размерами 0,18...0,2 мм, масса материала до 60 кг

Известно, что сопротивление циклона снижается с ростом массовой концентрации потока на входе в него. Это связано со снижением крутки потока и перераспределением кинетических энергий газа и твердой фазы [9, 10]. Сопротивление циклона может быть рассчитано по зависимости:

$$\Delta P_{\psi} = \psi_{\psi} \cdot \xi_{\psi} \cdot \frac{U_{\psi}^2 \cdot \rho_2}{2}, \quad (1)$$

где ψ_{ψ} – поправка на влияние входной концентрации потока,; ξ_{ψ} – коэффициент сопротивления циклона, приведенный к скорости в нем (U_{ψ}).

Наши данные по величине поправки на запыленность потока показали, что величина этой поправки находится в диапазоне 0,4...0,6 и увеличивается с ростом массовой концентрации от 0,3 до 0,8. Влияние доли легкой фракции (песка) не обнаружено.

Для расчета поправки на запыленность предложены несколько зависимостей. Наиболее представительная форма зависимости предложена в [11]. Такая форма дает значения поправки равное 1 при чистом потоке газа, при этом достигается минимум поправки при массовых концентрациях около 0,3 и дальнейший рост ее значения с ростом концентрации. Эта форма зависимости использована и при описании наших исследований в предыдущих работах [12].

В работе [13] анализируется ряд зависимостей для расчета поправки на запыленность. Экспериментальные данные [13] показали отсутствие влияния скорости газов и размеров частиц. На рис. 3 приведены наши данные и данные [13]. Они обобщаются единой зависимостью:

$$\psi_c = \frac{1}{25,8 \cdot \mu_c^{1,71} + 1} + 0,72 \cdot \mu_c \quad (2)$$

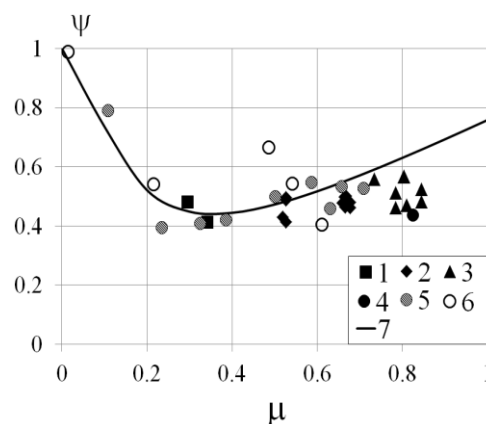


Рис. 3. Зависимость поправки на запыленность потока от массовой концентрации частиц

1 – скорость в реакторе с ЦКС, $U = 3,06...3,1$ м/с; 2 – $U = 3,55...3,8$ м/с; 3 – $U = 4,29...4,42$ м/с; 4 – $U = 4,7$ м/с; 5 – данные [13] ($d_p = 0,08...0,111$ мм); 6 – данные [13] ($d_p = 0,111...0,5$ мм); 7 – формула (2)

Эффективность улавливания в циклоне оказалась очень высокой – более 99,99%. Это связано как с относительно крупными частицами, так и с высокой их концентрацией. Поэтому, анализировать влияние факторов на полный КПД циклона лучше через величину уноса. На рис. 4 дана зависимость относительного уноса от массовой концентрации.

Унос заметно снижается при росте концентрации, так как мелкие частицы увлекаются более крупными к стенке циклона [10].

В дальнейшем предполагается уточнить значения фракционного КПД циклона и учесть влияние массовой концентрации и доли легкой фракции на разработанные

ранее зависимости для расчета циклонов в системах с циркулирующим кипящим слоем.

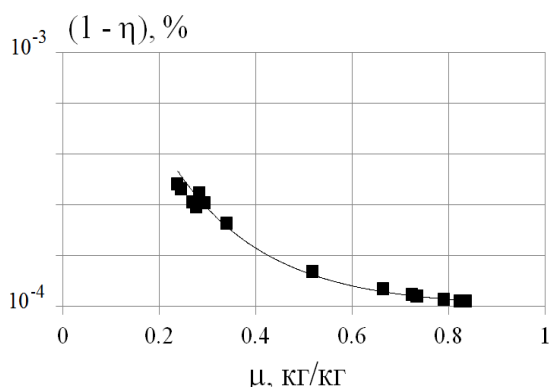


Рис. 4. Влияние массовой концентрации потока на относительный унос частиц (1-кпд)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании технологии сжигания и газификации твердых топлив в химических циклах на оксидах металлов – носителях кислорода с улавливанием CO_2 в контуре циркуляции происходит движение бинарной смеси твердых частиц с существенно различной плотностью. Вопросы гидродинамики движения смесей частиц и их сепарации в циклонах пока еще слабо изучены, что подтверждает актуальность проведенных исследований.

Показано, что рост скорости гвзлов в реакторе с ЦКС приводит к существенному увеличению расхода циркулирующего материала. Данные полученные при загрузке оксидами алюминия и смеси с песком (3...12% по массе) близки друг к другу. Это подтверждает возможность использования разработанных ранее зависимостей [6, 8].

Спротивление циклона при движении потока газа с высокой запыленностью существенно снижается по сравнению с незапыленным потоком. Обобщены данные наших и зарубежных исследований и предложена зависимость поправки на массовую концентрацию частиц, см. (2). Влияние доли легкой фракции (песка) не обнаружено.

Эффективность улавливания в циклоне оказалась очень высокой – более 99,99%. Это связано как с относительно крупными частицами, так и с высокой их концентрацией. Унос заметно снижается при росте концентрации, так как мелкие частицы увлекаются более крупными к стенке циклона.

В дальнейшем предполагается уточнить значения фракционного КПД циклона и учесть влияние массовой концентрации и доли легкой фракции на разработанные ранее зависимости для расчета циклонов в системах с циркулирующим кипящим слоем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Beal C. Chemical looping: a Breakthrough CO_2 Capture Technology / C. Beal, B. Epple, J. Strohle // Proc. of the 22nd Int. Conf. on Fluidized Bed Conversion (Turky, Finland, 12-14 June 2015). Turkey, Finland, 2015. – P. 871-878.
2. Chemical-looping technologies using circulating fluidized bed systems: status of development / T. Mattisson et al. // Proc. of 12th. Conference on fluidized bed Technology (Kra-

kow, Poland, 23-26 May 2017). – Krakow, Poland, 2017. – P. 23-34.

3. The Investigation of fluidization of solids mixture with different particles density / G. Ryabov et al. // Proc. of CFB12 (Krakow, Poland, 24-26 May 2017). – Krakow, Poland, 2017. – P. 179-186.

4. Исследование условий псевдооживления бинарных смесей частиц с различной плотностью применительно к сжиганию и газификации твердых топлив в химических циклах / Д.А. Санкин, Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, И.А. Долгушин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.4, №4. – С. 15-20.

5. Operation of a 1 MWth Chemical Looping Plant / P. Ohlemüller, J.-P. Busch, J. Ströhle B. Epple // Proc. of the 22nd Int. Conf on Fluidized Bed Conversion (Turku, Finland, 12-14 June). – Turku.

6. Результаты расчетных и экспериментальных исследований гидродинамики циркуляционных контуров в аппаратах с циркулирующим кипящим слоем и системах со связанными реакторами / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Санкин, Д.А. Мельников // Теплоэнергетика. – 2015. – №2. – С. 33-40.

7. Operating experience with measures for improvement of cyclone removal efficiency / B. Krohmer, B. Roper, J. Seeber, G.-N. Stamatelopoulos // Proc. of 19-th Int. Conf. on FBC (Vienna, Austria, 21-24 May 2006). – Vienna, Austria, 2006.

8. Рябов Г.А. Обоснование расчета топочного контура котлов с циркулирующим кипящим слоем / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев // Теплоэнергетика. – 2011. – №6. – С. 12-18.

9. Очистка промышленных газов от пыли. / В.Н. Ужов и др. – М.: Химия, 1981. – 344 с.

10. Knowlton T. Cyclone Systems in Circulating Fluidized Beds // Proc. of CFB12 (Krakow, Poland, 24-26 May 2017). – Krakow, Poland, 2017. – P. 47-64.

11. Долгов В.Н. Аэродинамика и теплообмен циклона – утилизатора теплоты запыленных газов: автореф. дис. канд. техн. наук. – Свердловск: УПИ, 1988. – 16 с.

12. Рябов Г.А. Исследование систем улавливания и возврата на установках с циркулирующим кипящим слоем / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Шапошник // Теплоэнергетика. – 2002. – №8. – С. 18-24.

13. Measurement of Solid Entrainment by Pressure Drop in the Cyclone / A. Martínez, P. Lisbona, Y. Lara et al. // Proc. of 21-th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion (Naples, Italy, 3-6 June 2012). – Naples, Italy, 2012. – P. 666-672.

Investigation of Circulation and Separation of Solids Binary Mixture in the Units with Chemical-Looping Combustion and Gasification of Solid Fuels

Ryabov G.A., Folomeev O.M., Dolgushin I.A.

JSC "All-Russia Thermal Engineering Institute"

Moscow, Russian Federation

vti@vti.ru

Abstract. The technology of chemical looping combustion and gasification of fuels is one of the most promising for CO₂ capturing from power plants. During the combustion and gasification of solid fuels, an ash-coke residue is added to the metal oxides - oxygen carriers. Thus, solid flux consists of particles with different density. In these conditions it is important to determine how the circulation is changing and how the particles are separated in cyclones of the circulation loop. A description of methodology for simulating these processes, the experimental setup, and the experimental conditions are given. Data on effect of the gas velocity in a reactor with a circulating fluidized bed on the specific solid flow rate of the circulating material are given. It is shown that the influence of addition of light weight fraction (sand) in range of 3...12% to the mass of metal oxides (Al₂O₃) does not significantly change specific solid flow rate. The capture efficiency of the cyclone at a high concentration of solids is very high and exceeds 99.99%. With increasing of solid concentration, it increases somewhat. A complex dependence of mass concentration of the particles on the cyclone resistance is observed. As a result of the analysis of the experimental data of this work, as well as previous studies and foreign data, a formula is proposed for calculating the correction to the cyclone resistance on a pure gas flow. The noticeable influence of sand additive in range of 3...12% to the mass of Al₂O₃ is not found, which allows using the previously developed dependences for calculating the circulation and separation of particles in the combustion systems of solid fuels in chemical looping systems.

Keywords: CO₂ capture, chemical-looping combustion and gasification of fuels, metal oxides - oxygen carriers, circulating fluidized bed, binary mixtures, bed hydrodynamics, cyclone resistance, particle capture efficiency.

REFERENCES

1. Beal C., Eppe B., Strohle J. Chemical looping: a Break-through CO₂ Capture Technology, *Proc. of the 22nd Int. Conf. on Fluidized Bed Conversion*, Turkey, Finland, 2015, pp. 871-878.
2. Mattisson T. et al. Chemical-looping technologies using circulating fluidized bed systems: status of development, *Proc. of 12th. Conference on fluidized bed Technology*, Krakow, Poland, 2017, pp. 23-34.
3. Ryabov G. et al. The Investigation of fluidization of solids mixture with different particles density, *Proc. of CFB12*, Krakow, Poland, 2017, pp. 179-186.

4. Sankin D.A., Ryabov G.A., Folomeev O.M., Dolgushin I.A. Investigation of fluidization of solids mixture with different particle density for chemical-looping combustion and gasification, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2016, vol.4, no.4, pp. 15-20. (in Russ.)

5. Ohlemüller P., Busch J.-P., Ströhle J., Eppe B. Operation of a 1 MWth Chemical Looping Plant, *Proc. of the 22nd Int. Conf on Fluidized Bed Conversion*, Turku.

6. Ryabov G.A., Folomeev O.M., Sankin D.A., Melnikov D.A. Results Of Theoretical And Experimental Studies Of Hydrodynamics Of Circulation Loops In Circulating Fluidized Bed Reactors And Systems With Interconnected Reactors, *Thermal Engineering*, 2015, vol.62, iss.2, pp. 110-116. DOI: 10.1134/S0040601515020081

7. Krohmer B., Roper B., Seeber J., Stamatelopoulos G.-N. Operating experience with measures for improvement of cyclone removal efficiency, *Proc. of 19-th Int. Conf. on FBC*, Vienna, Austria, 2006.

8. Ryabov G.A., Folomeev O.M. Substantiating the techniques for calculating the furnace circuit of circulating fluidized bed boilers, *Thermal Engineering*, 2011, vol.58, no.6, pp. 456-463. DOI: 10.1134/S0040601511060115

9. Uzhov V.N. et al. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Purification of industrial gases from a dust], Moscow, Chemistry, 1981, 344 p. (in Russ.)

10. Knowlton T. Cyclone Systems in Circulating Fluidized Beds, *Proc. of CFB12*, Krakow, Poland, 2017, pp. 47-64.

11. Dolgov V.N. *Aerodinamika i teploobmen tsyklona – utilizatora teploty zapylennykh gazov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Aerodynamics and heat exchange of the cyclone-heat recovery of dusty gases: author's abstract], Sverdlovsk, UPI, 1988, 16 p. (in Russ.)

12. Ryabov G.A., Folomeev O.M., Shaposhnik D.A. A study of systems for collecting and returning ash at installations with a circulating fluidized bed, *Thermal Engineering*, 2002, vol. 49, no.8, pp. 631-637.

13. Martínez A., Lisbona P., Lara Y. et al. Measurement of Solid Entrainment by Pressure Drop in the Cyclone, *Proc. of 21-th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion*, Naples, Italy, 2012, pp. 666-672.

Библиографическое описание статьи

Рябов Г.А. Исследование циркуляции и сепарации бинарных смесей частиц в установках с химическими циклами сжигания и газификации твердых топлив / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, И.А. Долгущин // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2017. – Т.5, №4. – С. 30-34. DOI: 10.24892/RIJIE/20170403

Reference to article

Ryabov G.A., Folomeev O.M., Dolgushin I.A. Investigation of circulation and separation of solids binary mixture in the units with chemical-looping combustion and gasification of solid fuels, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2017, vol.5, no.4, pp. 30-34. DOI: 10.24892/RIJIE/20170403