

УДК: 532.542.4:575.5, 519.63

Исследование влияния инжектирования воды на сепарационные характеристики гидроциклона

Л. Л. Миньков^{1,a}, Е. В. Пикущак¹, И. Г. Дик²

¹ ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
физико-технический факультет
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

² Университет Эрланген-Нюрнберг, Германия,
В-91052, г. Эрланген, ул. Пауля Гордона, д. 3

E-mail: ^alminkov@ftf.tsu.ru

Получено 27 августа 2012 г.,
после доработки 24 декабря 2012 г.

В данной работе на основе численного моделирования исследуются особенности закрученного турбулентного течения монодисперсной суспензии в гидроциклоне с инжектором. Для описания турбулентного поля течения суспензии используется модель рейнольдсовых напряжений и модель смеси для описания параметров частиц в двумерном осесимметричном приближении. Особое внимание уделяется выяснению механизмов воздействия вида инжекции на перестройку гидродинамических полей и в конечном итоге на механизмы классификации. Показано, что тангенциальный способ инжекции сильнее влияет на сепарационную кривую по сравнению с радиальным способом.

Ключевые слова: гидроциклон, инжекция, монодисперсная суспензия, вычислительная гидродинамика

Investigation of water injection influence on hydrocyclone separation performance

L. L. Minkov¹, E. V. Pikushchak¹, J. H. Dueck²

¹ Tomsk State University, 634050, Russia, Tomsk, Lenina av., 36

² Erlangen-Nurnberg University, Germany, D-91052, Erlangen, Paul Gordon st., 3

Abstract. — In this paper particularities of the swirling turbulent flow of monodisperse suspension in the hydrocyclone with injector are investigated on the base of the numerical simulation. The 2D axisymmetric approximation of Reynolds Stresses Model and model of mixture is used to describe the swirling turbulent flow field of suspension and particles parameters in the hydrocyclone. Special attention is paid to the clarification of mechanisms of injection influence on the reorganization of hydrodynamic field and finally on classification mechanisms. It is shown that tangential injection method stronger effects separation curve compared to the radial one.

Keywords: hydrocyclone, injection, monodisperse suspension, computational fluid dynamics

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 803–810 (Russian).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 12-08-90707-моб_ст, Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. Соглашение № 14.В37.21.0872

Введение

Для улучшения классификационных характеристик гидроциклона используют дополнительную инъекцию воды в нижней конической части гидроциклона в месте скопления нежелательно присутствующих мелких частиц перед выводом их из аппарата. Эта методика была впервые применена для обесшламливания горной руды [Dahlstrom, 1954]. В работе [Kelsall, Homes, 1960] было показано, что выход мелкого продукта с частицами меньше 10 мкм в нижний продукт обычного гидроциклона уменьшается с 48 % до 11.5 % после инжектирования водой. В дальнейшем система инжектирования водой была применена в бумажной промышленности для увеличения выхода древесного волокна в верхний продукт гидроциклона [Bradley, 1965]. Об улучшении классификации мелких частиц угля с использованием устройства водной инъекции сообщалось в работе [Firth et al., 1995]. Также улучшение классификации наблюдалось в 100 мм модельном гидроциклоне [Patil, Rao, 1999], оснащенном устройством инжектирования воды при обработке кварцевого песка. Метод инъекции эффективно применялся для удаления золы, образующую глинообразный материал, из мелкого угля [Honaker et al., 2001].

В работе [Udaya et al., 2005] была сделана попытка оценки характеристик классификации при обработке свинцово-оловянной руды. Было показано, что превышение расхода инжектированной воды над расходом воды через нижний слив ведет к резкому увеличению зерна разделения и, по-видимому, равенство этих расходов является оптимальным. Исследование влияния положения инжекционного устройства в гидроциклоне проводилось в [Farghaly et al., 2010].

Несмотря на то, что метод инжектирования известен достаточно давно, систематические исследования влияния параметров инъекции на характеристики гидроциклона стали проводиться недавно. Так, в [Minkov, Dueck, 2011] выявлены основные закономерности течения воды в гидроциклоне с инжектором, имеющим пять тангенциально направленных сопла. Моделирование проводилось на основе трехмерной RNG- $k-\epsilon$ модели. Численное моделирование и экспериментальное исследование влияния способа инжектирования на расходные характеристики гидроциклона, работающего на чистой воде, а также на поле турбулентности, выполнено в [Миньков и др., 2011а; Миньков и др., 2011б] на основе двумерной осесимметричной модели для закрученного течения, причем для нахождения турбулентных характеристик привлекалась модель Рейнольдсовых напряжений.

В предлагаемой работе на основе численного моделирования исследуется гидромеханика суспензии в гидроциклоне с двухсопловым инжектором и объясняются механизмы воздействия радиально и тангенциально направленной инъекции на процесс классификации твердых частиц.

Численное моделирование

Расчеты проводились для гидроциклона, схема которого дана на рис. 1, а. Участок L_3 на рисунке соответствует участку со встроенным инжекторным устройством. На рис. 1, б и 1, в схематично показаны способы радиальной и тангенциальной подачи инжектированной воды в аппарат.

Для понимания причин и путей влияния инъекции на гидродинамику течения воды внутри гидроциклона привлекалось численное моделирование, осуществленное с помощью пакета Fluent 6.3.26 [FLUENT 6.3 User's Guide, 2006].

Моделирование выполнялось в двумерном осесимметричном приближении для закрученных несжимаемых вязких турбулентных течений, которые описываются уравнением неразрывности и системой уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с привлечением модели Рейнольдсовых напряжений (RSM) [Миньков и др., 2011б].

Для численного решения определяющей системы уравнений проводилась дискретизация области на 41 252 четырехугольные ячейки с использованием предпроцессора Gambit 2.3.16.

Решение системы уравнений количества движения и системы уравнений напряжений Рейнольдса выполнялось с помощью противоположной схемы второго порядка точности с привлечением алгоритма PRESTO для расчета давления на гранях ячеек. Согласование между полем давления и полем скорости реализовано на основе алгоритма PISO.

Нижеприведенные расчеты получены при давлении в питающем патрубке равном 0.2 МПа, что обеспечивает расход основного потока через впускной канал 60 л/мин.

Расчеты потоков через оба отводных канала показывают качественное согласие с экспериментальными измерениями, и локальное количественное расхождение составляет не более 5%. На рис. 2 приведена зависимость сплит-параметра (отношение расхода жидкости через верхнее отверстие к расходу через нижнее отверстие) от расхода инжектирующей жидкости при разных способах инжектирования. Для радиального способа инжектирования численное моделирование позволяет предсказать монотонное снижение S с ростом Q_{inj} , полученное в эксперименте. Небольшое качественное расхождение в поведении кривых для тангенциального способа инжектирования лежит в пределах указанной выше погрешности.

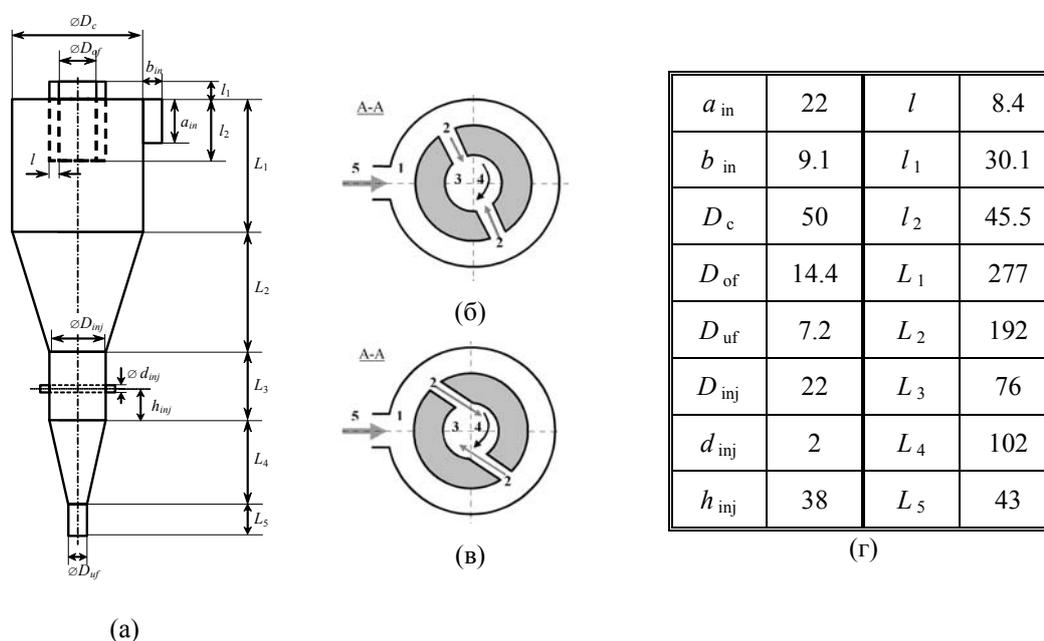


Рис. 1. Гидроциклон с инжектором. Схема гидроциклона (а); центральное поперечное сечение инжектора (б), (в); радиальный способ инъекции (б); тангенциальный способ инъекции (в); размеры в мм (г); 1 — распределительное кольцо; 2 — инжекционные входы; 3 — внутренняя полость гидроциклона в сечении инжектора, 4 — направление вращения основного потока, 5 — подвод инжектируемой воды

Небольшие расходы инжектирующей жидкости ($Q_{inj} < 2$ л/мин) слабо влияют на поле течения, рис. 3, б, е. При больших расходах способ инжектирования существенно влияет на картину течения в инжекторе. Радиальный способ инжектирования, рис. 3, в, з, ведет к увеличению скорости течения как в приосевой зоне — в сторону верхнего слива, так и в пристенной области — в сторону нижнего слива.

В случае тангенциального инжектирования, рис. 3, ж, з, происходит перестройка течения. В приосевой зоне жидкость направлена в сторону нижнего слива, рис. 3, з, а в пристенной зоне направление течения жидкости зависит от того, где расположен участок — над или под местом инжекции.

Расчеты показывают, что радиальное инжектирование приводит к росту расхода жидкости через нижний слив на величину, примерно равную половине расхода инжектирующей жидкости, в то время как тангенциальное инжектирование может даже уменьшать расход через ниж-

ний слив. В этом случае происходит оттеснение основного потока в гидроциклоне от нижнего слива или, иначе, его запирание, вызванное дополнительной подкруткой в инжекторе. Эти особенности течения хорошо отражаются в формулах таблицы 1.

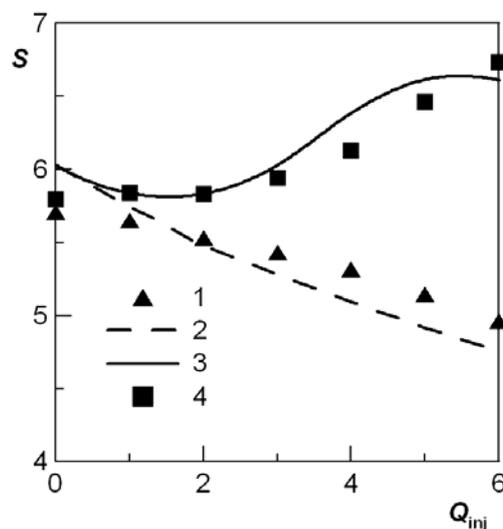


Рис. 2. Зависимость сплит-параметра инжекционного потока. 1, 4 — эксперимент [Миньков и др., 2011б]; 2, 3 — численное моделирование; 1, 2 — радиальная инжекция; 3, 4 — тангенциальная инжекция. Q_{inj} , л/мин

Сравнивая картины течения без инжекции и с радиальной инжекцией можно заключить, что влияние инжектируемой струи распространяется лишь в небольшой окрестности места инжекции. Инжектируемая жидкость, несколько оттесняя основной поток от стенки, выводится через нижний слив. Радиальная инжекция приводит к тому, что пристенные слои в большей степени направляются вниз, рис. 3, в, г. В целом же картина течения сохраняется.

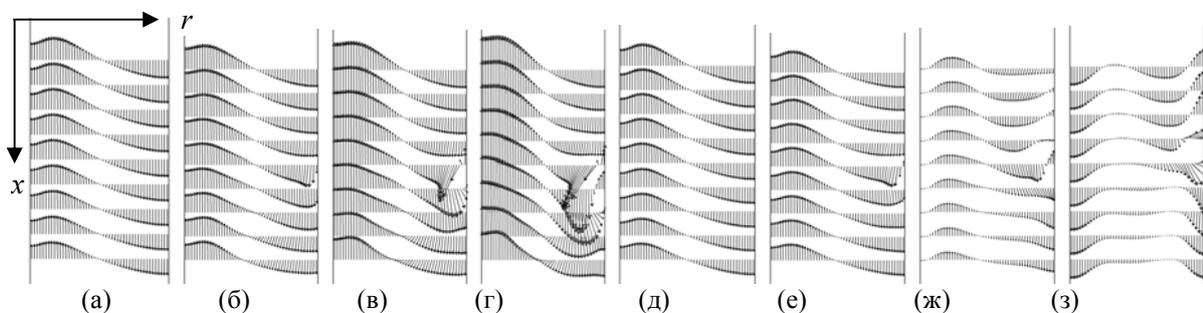


Рис. 3. Поле скоростей в инжекторе: а, б, в, г — радиальная инжекция; д, е, ж, з — тангенциальная инжекция; а, д $Q_{inj} = 0$ л/мин; б, е $Q_{inj} = 2$ л/мин; в, ж $Q_{inj} = 4$ л/мин; г, з $Q_{inj} = 6$ л/мин

При одинаковом расходе инжектирующей жидкости тангенциальный подвод гораздо сильнее деформирует основной поток в аппарате, чем радиальный, и над местом инжекции возникает заметный вихрь, направляющий пристенные слои жидкости в сторону входного патрубка. Отчетливо видно, что тангенциальная инжекция действует в значительной степени как запирающий слой, препятствующий основному потоку движению к нижнему выводному отверстию, рис. 3, з. При этом, жидкость от инжектора не покидает гидроциклон через верхний слив, а полностью вытекает через нижний слив.

Обычно влияние инжекции на функцию разделения связывают с изменением радиальной компоненты скорости в области инжекции. На рис. 4 показано, что при обоих способах инжекции радиальная компонента меняется по сравнению со случаем безынекционного режима

примерно одинаково, независимо от способа инъекции. Влияние инъекции сказывается в слое у стенки, толщина которого для $Q_{inj} = 6$ л/мин составляет порядка четверти радиуса поперечного сечения аппарата в области инжектора.

Таким образом, не различие в радиальной компоненте скорости является причиной большей эффективности тангенциальной инъекции по сравнению с радиальной.

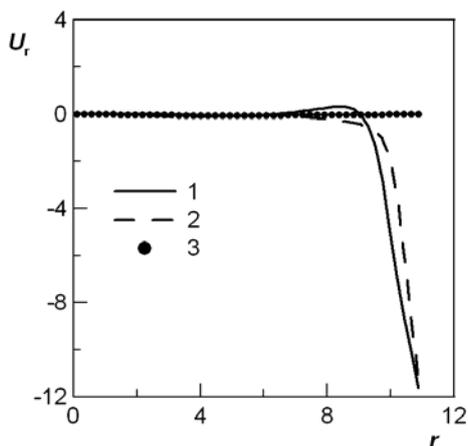


Рис. 4. Зависимость радиальной компоненты скорости в сечении инжектора. 1 — тангенциальная инъекция, 2 — радиальная инъекция, 3 — без инъекции; $Q_{inj} = 6$ л/мин; U_r , м/с; r , мм

Далее были проведены расчеты распределения концентрации частиц монодисперсного состава с использованием модели взаимопроникающих континуумов и эйлерова описания взаимодействия фаз [FLUENT 6.3 User's Guide, 2006].

Объемная доля частиц на входе в гидроциклон задавалась равной 0.01. Рассматривались два состава: суспензии с частицами размером 1 мкм и размером 10 мкм. Расход инжектируемой жидкости составлял 6 л/мин при давлении на входе 0.1 МПа.

В таблице приведены значения выводимых через нижнее отверстие долей частиц одного из размеров по отношению к их потку на входе в аппарат (одна точка сепарационной кривой).

Из таблицы можно видеть, что тангенциальное инжектирование уменьшает (по сравнению со случаем отсутствия инъекции) долю мелких частиц, выводимых через нижнее отверстие в 1.81 раз, а крупных — в 1.1 раз. Радиальная инъекция уменьшает сепарационную функцию в 1.08 раз, а крупных — в 1.01 раз.

Таким образом, вытеснение мелких частиц из нижнего слива в верхний гораздо эффективнее происходит при тангенциальной инъекции.

Таблица 1. Значение доли частиц, выводимой через нижнее отверстие

	Без инъекции		Тангенциальная инъекция		Радиальная инъекция	
	1	10	1	10	1	10
d, мкм	1	10	1	10	1	10
T(d)	0.185	0.824	0.102	0.749	0.171	0.815

На рис. 5 показаны поля объемной доли мелких частиц (1 мкм) в области инжектора. Место инъекции показано стрелкой. При течении без инъекции все частицы практически равномерно «размазаны» по всей области с объемной долей 0.01, за исключением пристенной области, где объемная доля более чем на 15 % выше начальной, и приосевой, где доля частиц на 15 % меньше начальной.

Тангенциальная инъекция существенно меняет картину. В области вихря и в пристеночной области в сторону нижнего слива от места инъекции образуется зона, свободная от частиц.

Над вихрем объемная доля частиц больше 15% начальной. На оси по-прежнему объемная доля частиц ниже начальной, равной 0.01. Видно, что в конической части, расположенной вниз по течению от инжектора, существует максимум объемной доли частиц в направлении радиуса (от оси к стенке), т. е. профили будут немонотонны.

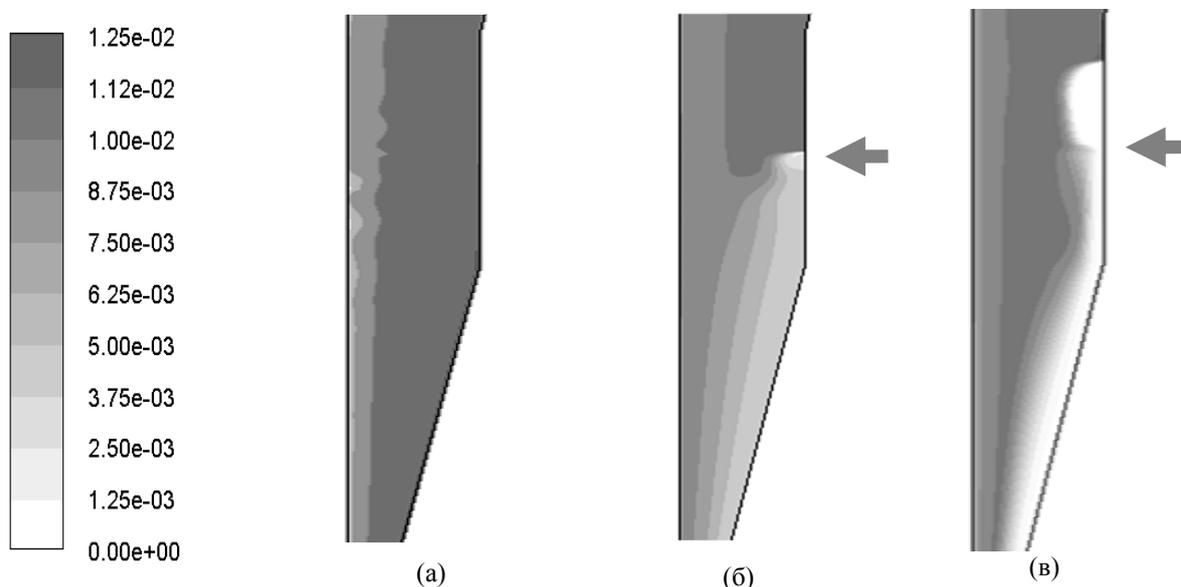


Рис. 5. Поле концентрации 1 мкм частиц (линейная шкала) без инъекции (а); радиальная инъекция (б); тангенциальная инъекция (в)

Таким образом, мелкие частицы, находящиеся в осевой области потока, увлекаются восходящим потоком и выводятся через верхнее сливное отверстие. Это обстоятельство также объясняет изменение концентраций в нижнем и верхнем сливных отверстиях с увеличением расхода инъекции. В этом лежит причина эффективности классификации, наблюдаемой при использовании тангенциальной инъекции.

Радиальная инъекция не создает в пристеночной области зоны свободной от частиц, хотя концентрация частиц у стенки заметно снижается по сравнению с концентрацией подаваемой суспензии. При этом в конической части объемная доля частиц монотонно падает от оси к стенке.

На рис. 6 представлены объемные доли крупных частиц, диаметром 10 мкм. В отсутствии инъекции все крупные частицы расположены вблизи стенки гидроциклона.

Радиальное инжектирование несколько оттесняет частицы к оси в области, расположенной несколько ниже места инжектирования.

Тангенциальное инжектирование вызывает запирающий эффект не только для жидкости, но и для крупных частиц, собирая их над вихрем. Здесь объемная доля частиц достигает максимального значения. В конической части частицы располагаются у стенки, а в цилиндрической (инжекторе) — оттесняются к оси.

При радиальном методе инъекции улучшение классифицирующего эффекта частиц суспензии заключается в воздействии силы, поперечно направленной к движению основного потока в виде струй инжектированной воды. При этом мелкие фракции вытесняются из пристенного слоя в центр аппарата, но в тоже время, поскольку тангенциальная скорость основного потока в области инжектора замедляется, часть мелких частиц вытекает в нижний слив, загрязняя нижний продукт. Вследствие этого изменение классифицирующего эффекта при радиальной инъекции из-за наложения двух описанных факторов является не столь эффективным, как при тангенциальной инъекции.

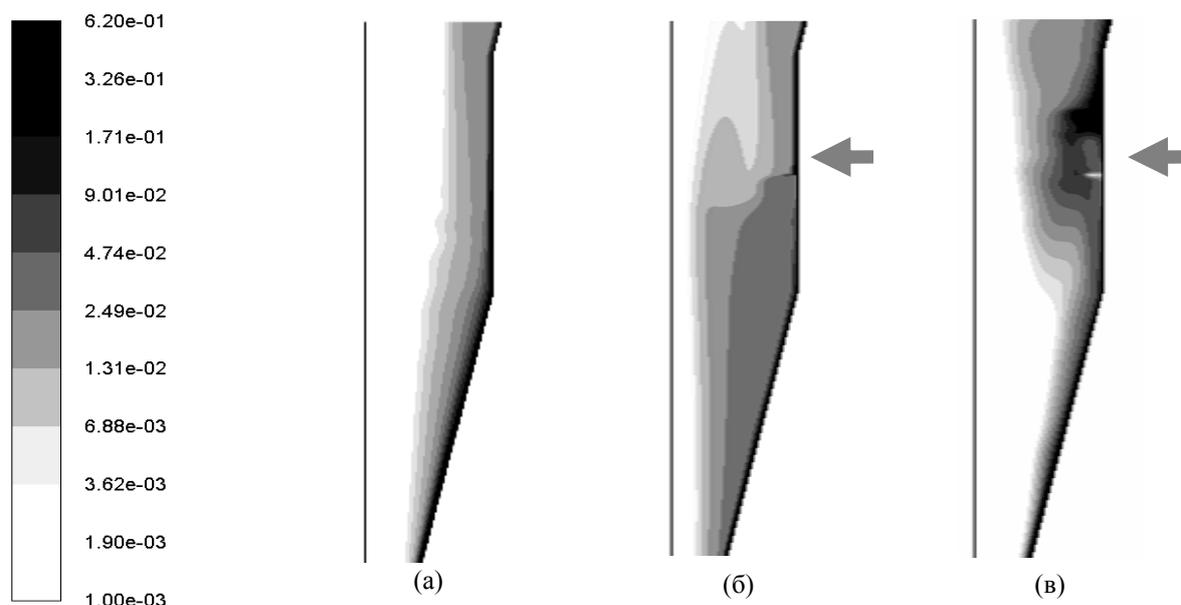


Рис. 6. Поле концентрации 10 мкм частиц (логарифмическая шкала) без инжекции (а); радиальная инжекция (б); тангенциальная инжекция (в)

Выводы

Дополнительная инжекция воды в гидроциклон имеет значительное влияние на характеристики сепарационной функции аппарата. Способ организации инжекции (тангенциальный или радиальный) имеет различное воздействие на качество классификации. В частности, при тангенциальной инжекции увеличение расхода инжектируемой воды ведет к снижению значения функции сепарации, в то время как при радиальной инжекции характеристики функции сепарации изменяются слабее.

На основании результатов численного моделирования предложены объяснения механизмов влияния тангенциальной и радиальной инжекции на характеристики классификации.

Список литературы

- Миньков Л. Л., Крохина А. В., Дик И. Г. Гидродинамические механизмы влияния инжекции на классификационные характеристики гидроциклона // ИФЖ. — 2011а. — Т. 84, № 4. — С. 747–758.
- Миньков Л. Л., Крохина А. В., Дик И. Г. Расходные характеристики гидроциклона со встроенным инжектором // Теплофизика и аэромеханика. — 2011б. — Т.18, №3. — С.413–426.
- Bradley D. The Hydrocyclone. Pergamon Press, London, 1965.
- Dahlstrom D. A. Fundamentals and applications of the liquid cyclone // Chemical Engineering Progress Symposium Series / American Institute of Chemical Engineers. 1954. Vol. 15, 50. P. 41.
- Farghaly M. G., Golyk V., Ibrahim G. A., Ahmed M. M., Neesse Th. Controlled wash water injection to the hydrocyclone underflow // Minerals Engineering. 2010. — Vol. 23, No. 4. P. 321–325.
- Firth B., Edwards D., Clarkson C., O'Brien M. The impact of classification on coal preparation performance // Proceedings of the 7th Australian Coal Preparation Conference, Paper E2, Australian Coal Preparation Society. 1995. P. 250–276.
- FLUENT 6.3 User's Guide. © Fluent Inc. 2006-09-20.

- Honaker R. Q., Ozsever A. V., Singh N., Parekh B. K.* Apex water injection for improved hydrocyclone classification efficiency // *Minerals Engineering*. 2001. — V.14, No. 11. — P. 1445–1458.
- Kelsall D. F., Homes J. A.* Improvement in classification efficiency in hydraulic cyclones by water injection // *Proceedings of the 5th Mineral Processing Congress, Paper vol. 9, Institute of Mining and Metallurgy*. 1960. — P. 159–170.
- Minkov L., Dueck J.* CFD-modeling of a flow in a hydrocyclone with additional water injection // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2011. — Т. 3, №1. — С.63–76.
- Patil D. D., Rao T. C.* Classification evaluation of water injected hydrocyclone. // *Minerals Engineering*. 1999. — Vol. 12, No.12. — P. 1527–1532.
- Udaya B. K., Govindarajan B., Barnwal J. P., Rao K. K., Gupta B. K., Rao T. C.* Classification studies of lead–zinc ore fines using water-injection cyclone // *International Journal of Mineral Processing*. 2005. — Vol. 77, No. 2. — P. 80-94.