

УДК 622.7:658.512; 622.766; 622.755

**В.А. Козлов, В.И. Новак, М.Ф. Пикалов**

## **РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ТЯЖЕЛОСРЕДНЫХ ГИДРОЦИКЛОНОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

*Рассмотрены результаты моделирования работы тяжелосредних гидроциклонов большого диаметра, выполненного в рамках исследовательской программы Угольной Ассоциации Австралии (ACARP) и Научного совета Австралии (ARC) в 2008-2010 гг.*

*Ключевые слова: обогащение угля, тяжелосредний гидроциклон, гранулометрический класс угля, плотность разделения, погрешность разделения.*

---

**Р**азмеры тяжелосредних гидроциклонов (DMC), коммерчески доступных на рынке оборудования (рисунок), существенно увеличились в последние годы и достигли диаметра 1500 мм. Так как выполнение исследований функционирования гидроциклонов таких больших размеров характеризуется высоким уровнем технической трудности и затрат, то для оценки их работы обычно используют различные математические модели, по которым определяются условия эффективной работы гидроциклонов [1-7]. Исследования показали, что гидроциклоны малого диаметра 610-760 мм более эффективно производят разделение угля, особенно, для частиц малого размера, вплоть до крупности 0,25 мм. Поэтому, концептуально, авторы [1] предлагают простой подход к решению одновременного увеличения производительности и эффективности работы гидроциклонов, используя комбинацию гидроциклонов большого и малого диаметра. Также считают, что применение меньшего диаметра гидроциклона DMC будет более эффективным для более мелких частиц (до

0,25 мм) и, таким образом, будет являться альтернативой гидросайзеру, спиральным сепараторам или рефлюкс-классификатору. С этим мы не можем согласиться, так как здесь не рассматривались эксплуатационные расходы, принятие во внимание которых говорит в пользу спиральных сепараторов при работе на широком классе шлама 0,04x1(2) мм. Но исследования [1-7] интересны тем, что моделирование процессов в гидроциклоне DMC позволяет понять некоторые тонкие моменты в специфике его работы, что представляет практический интерес.

Тяжелосредный гидроциклон является необходимой единицей в современных схемах углеобогатительных фабрик, но большие размеры DMC стали применяться только в последнее десятилетие, например, диаметры 1000 мм применяются с 2005 года [8], а диаметры 1500 мм с 2009 года [9, 10] и такие гидроциклоны получают все большее применение.

Фундаментальный подход к моделированию работы гидроциклона, предполагает развитие идей для правильного понимания работы DMC и



**Фотографии тяжелосредных гидроциклонов большого диаметра на обогатительных фабриках в Австралии**

преодоления трудностей с точностью измерения параметров его работы. Первоначально были использованы вычислительные методы гидрогазодинамики (CFD) к моделированию потоков в DMC [11-13]. В этих работах газ, жидкость и твердая фаза принимались в виде непрерывных фазных потоков и, предполагается, ведут себя как жидкость. Это предположение накладывает ограничения на применение теории к газовым и жид-

ким фазам и существенно исключает из рассмотрения твердые частицы, такие как уголь. Чтобы преодолеть это ограничение, угольные частицы представляются как дискретные единицы, к которым применяются законы движения Ньютона. Этот подход получил развитие в Методе Дискретных Элементов (DEM). Комбинируя метод CFD, чтобы смоделировать движение среды и метод DEM, чтобы смоделировать движение угольных частиц в DMC, можно получить более адекватный математический аппарат для описания процессов, происходящих в гидроциклоне. Этот подход успешно применялся к DMC и существенное продвижение за прошедшее десятилетие отражено в широко известных публикациях [1-17]. Заинтересованные читатели могут рассмотреть эти работы для понимания большего количества подходов к обозначенной проблеме. В итоге, с помощью моделирования было возможным отобразить

эмпирические данные в пределах 20-30 %-го отклонения.

В базовой модели DMC используются:

- семь геометрических параметров: диаметр, размер отверстия входа, диаметр сливной насадки, диаметр песковой насадки, длина цилиндрической части корпуса, длина сливной насадки, длина конической части корпуса;

- один ориентационный параметр: угол наклона оси гидроци克лона к горизонту;

- два параметра тяжелой среды: сорт магнетита, содержание немагнитной фракции;
- три операционных параметра: объемное отношение угля к суспензии, напор на входе, плотность магнетитовой суспензии;
- два зависимых параметра по питанию: размер твердых частиц, плотность твердых частиц.

Существующие модели, однако, имеют главный недостаток, касающийся скорости вычисления. Как правило, время вычислений, которое требуется для расчета одной модели для выбранного конкретного эксплуатационного условия работы DMC, определяется многими неделями и даже месяцами при использовании общедоступных скоростных процессоров. В рассматриваемом в статье проекте были рассчитаны больше чем 100 вариантов моделей, каждый раз с различным набором геометрических и эксплуатационных условий для DMC. В результате на основе базы данных была существенно развита многомерная модель, которая позволила получить упрощенные отношения между важными геометрическими и эксплуатационными параметрами. Используя эти математические отношения, на базе ноутбука был создан тренажер DMC, на котором подбираются различные параметры для конкретного промышленного применения [1-7].

С помощью тренажера DMC произведена оценка производительности DMC по пульпе. Расход зависит от диаметра DMC и рабочего давления, определяемым напором, измеряемым в целых числах диаметров DMC. Как и ожидалось, производительность пропорционально увеличивается с увеличением диаметра гидроцикла и рабочего давления на входе.

Типичная практика работы, предполагает давление на входе, соответ-

ствующее гидравлическому напору в 9D (девять диаметров гидроцикла). С таким давлением на входе, для DMC диаметром 1500 мм, объемная производительность составит 1350 м<sup>3</sup>/ч, а, например, для гидроцикла диаметром 760 мм при том же давлении производительность будет 260 м<sup>3</sup>/ч. Установлено, что существенное увеличение производительности может быть достигнуто увеличением рабочего давления на входе, например, увеличивая рабочий напор с 9D до 14D, производительность увеличивается на 46 % как для гидроцикла диаметром 1500 мм, так и для гидроцикла диаметром 760 мм, т.е. фактически не зависит от диаметра.

Исследовались также изменения значений среднего вероятного отклонения Ерт и величина смещения плотности разделения от плотности исходной суспензии Δρd50 для частиц различной крупности при разделении в гидроциклах диаметров 760 мм, 1000 мм и 1500 мм, в зависимости от напора на входе. Эти важные величины уменьшаются с увеличением рабочего давления на входе в гидроциклон.

Рассмотрим гидроциклон диаметром 760 мм, в котором моделировалось изменение напора на входе от 5D до 20D, при этом уровень подачи изменялся в пределах от 80 м<sup>3</sup>/ч до 500 м<sup>3</sup>/ч. При нормальном напоре 9D уровень подачи составляет 260 м<sup>3</sup>/ч. В этом гидроцикле значения Ерт для частиц диаметром 7 мм, остаются относительно постоянными 27-29 кг/м<sup>3</sup> в пределах указанного изменения напора на входе, в то время как значения Ерт для частиц размером 1 мм и 0,5 мм имеет тенденцию к уменьшению с увеличивающимся уровнем подачи с 30 кг/м<sup>3</sup> до 7 кг/м<sup>3</sup> и с 65 кг/м<sup>3</sup> до 10 кг/м<sup>3</sup>, соответственно. Этот неожиданный ре-

зультат наблюдается, когда площадь поперечного сечения входного отверстия остается постоянной, и в результате повышения уровня подачи увеличивается скорость входа пульпы в гидроциклон. Та же тенденция наблюдается и для гидроциклонов с диаметрами 1000 мм и 1500 мм.

Исследование зависимости Ерт от входной скорости пульпы, обусловленной, например, уменьшением площади поперечного сечения входного отверстия подачи в гидроциклон при одинаковом напоре, также имеет тенденцию к уменьшению Ерт.

Также оценивалась величина смещения плотности разделения от плотности среды на входе в гидроциклон  $\Delta p_{d50}$ . Так для частиц размером 4-7 мм это смещение имеет тенденцию роста с увеличением подачи и напора на входе в гидроциклон, а для частиц с размером менее 1 мм наблюдается обратная зависимость с уменьшением значений смещения плотности разделения. Причины такого поведения материала различной крупности сложны и связаны с более высокими массовыми силами, действующими на крупные частицы.

Проведенные исследования обозначили, что высокая производительность и высокая эффективность разделения тяжелосреднего циклона, являются взаимоисключающими. Однако, выявлены возможности достижения высокой эффективности и высоких производительностей установок, используя большие размеры DMC для крупных частиц и небольшие диаметры DMC для более мелких размеров частиц. Авторы [1-7] считают, что для меньших циклонов DMC можно достигнуть хороших эффективностей для более мелких частиц размером до 0,25 мм, и тогда можно применить DMC в областях, где работают спирали и гидросайзеры. Практическое

применение этого сомнительно, так как не учитывает множество других факторов эксплуатации.

Общим итогом работы можно считать факт, что более низкие Ерт и небольшие отклонения плотности разделения  $\Delta p_{d50}$ , имеет тенденцию быть связанными с меньшими диаметрами гидроциклонов DMC и более высокими рабочими давлениями на входе. Но, учитывая зависимость Ерт и отклонения плотности разделения от размера частиц, можно обоснованно подобрать соответствующий диаметр DMC, соответствующий классу обогащаемых частиц и уровню расхода, и тем самым добиться увеличения выхода продукта по фабрике.

Практика работы углеобогатительной установки с гидроциклоном диаметром 1500 мм, питанием которой является класс частиц 1,4x50 мм, показывает, что при напоре 9D погрешность разделения Ерт для частиц размером 2 мм составляет 22 кг/м<sup>3</sup>, для частиц размером 1 мм – 44 кг/м<sup>3</sup> и для частиц 0,5 мм – 92 кг/м<sup>3</sup>. Анализ работы гидроци克лона диаметром 760 мм при тех же условиях показывает, что для частиц 2 мм и больше, Ерт и отклонение близки к значениям для DMC большего диаметра. Однако, для более тонких частиц, гидроциклон диаметром 760 мм диаметром имеет намного лучшие показатели, например, для частиц размером 1 мм Ерт составляет ~20 кг/м<sup>3</sup>, а для частиц 0,5 мм – 25 кг/м<sup>3</sup>.

Данные представленные выше, основаны на результатах вычислений тренажера DMC на базе ноутбука, основанных на моделировании потоков среды и угля в гидроциклоне. Используя тренажер, были определены следующие количественные отношения:

1. Объемная производительность – сильно зависит от диаметра и рабочего давления. Значительные увели-

чения производительности уже установленных единиц возможно, простым увеличением давления подачи. Например, увеличение напора на входе от 9D до 14D способно увеличить объемную производительность на 50 %.

2. Эффективность разделения угля по расчету значений Ерт и значений отклонения плотности разделения  $\Delta \rho_{d50}$  значительно:

а. Ухудшалась с увеличением диаметра DMC для размеров частицы меньше чем 2 мм.

б. Улучшалась с увеличением рабочего давления.

с. Улучшалась с увеличением скорости подачи питания/ уменьшением площади поперечного сечения входного отверстия в гидроциклон.

3. Рекомендуется применять гидроциклоны диаметром 1500 мм для обогащения угля с нижним размером частиц до 2 мм, гидроциклоны диаметром 1000 мм – до 1,5 мм и гидроциклоны диаметром 760 мм и менее – до 0,5(1) мм.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

1. *Vince A., Barnett P. J., Chu K. W., Wang B., Yu A. B.* "Operation Implication of Dense Medium Cyclone Multiphase Flow Modeling", XVI International Coal Preparation Congress, Lexington, KY USA, 2010. pp.784-793.
2. *Vince A., Barnett P. J., Chu K. W., Wang B., Yu A. B.* "What Operations Medium Can Do To Improve Existing Dense Medium Cyclone Installation Performance", Annual Coal Processing Conference, Lexington, KY USA, 2012. pp.49-63.
3. *Chu K. W., Wang B., Vince A. and Yu A. B.* "Modelling of the multiphase flow in Dense Medium Cyclones", The 4th international conference on Discrete Element Method, Brisbane, Australia, Aug. 27-29, 2007.
4. *Chu K.W., Wang B., Yu A. B. and Vince A.* "Modeling the Coal-Medium Flow in a Dense Medium Cyclone", in Mathewson, DJ (Ed), Proceedings of the Twelfth Australian Coal Preparation Conference, 2008.
5. *Chu K. W., Wang B., Vince A., and Yu A. B.* "Discrete particle simulation of coal-medium flow in dense medium cyclones", Che-meca, Newcastle, Australia, Sep. 28- Oct. 1, 2008. pp.306-319.
6. *Chu K.W., Wang B., Vince A., Yu A. B., Barnett G.D. and Barnett P.J.*, "Discrete particle simulation of coal-medium flow in dense medium cyclones", Computational modelling 08, Cape Town, South Africa, Nov. 13-14, 2008.
7. *Chu K. W., Wang B., Vince A. and Yu A. B.* "CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones", Powder Technology, 2009. pp. 235-247.
8. *Osborne D.G.* "Global Challenge for Coal Technology - with the End User in Mind", South African Coal Preparation Society Conference, held at the Graceland Hotel, Casino and Country Club in Secunda, 14-16 September, 2005.
9. *Meyers A. and Sherritt G.* "Delination of large diameter DMC performance" in Honaker, R.Q. (ed), International Coal Preparation Congress 2010 Conference Proceedings, SME, Littleton, Colarado, 2010.
10. *Meyers, A.D. and Sherritt, G.* "Particle feed velocity impact on large diameter dense medium cyclone performance" in Atkinson B & S (Eds.), Proceedings, Thirteenth Australian Coal Preparation Conference, 2010.
11. *Brennan M.S.* "CFD simulations of dense medium and classifying hydrocyclones", In Proceedings of the 3rd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, 10-12 December, 2003.
12. *Narasimha M., Brennan M.S., and Holtham P.N.* "Numerical simulation of magnetite segregation in a dense medium cyclone", Minerals Engineering, vol. 19, 2006. pp. 1034-1047.
13. *Narasimha M., Brennan M.S., Holtham P.N. and Napier-Munn T. J.* "A comprehensive CFD model of dense medium cyclone performance", Minerals Engineering, vol. 20, 2007. pp. 414-426.
14. *Wang B., Chu K.W., Yu A.B., Vince A.,* "Estimation of steady state and dynamic dense medium cyclone performance: Stage 1", Australian Coal Association Research Program, Report No.: C15052. 2007.

15. Wang B., Chu K. W., Vince A., Yu A. B. Barnett G.D. and Barnett P.J. "Numerical Studies of the Effects of Medium Properties in Dense Medium Cyclone Operations", Computational modelling 08, Cape Town, South Africa, Nov. 13-14, 2008. (CD Rom Edition).
16. Wang B., Chu K.W, Vince A. and Yu A.B. "Modelling the multiphase flow in a dense medium cyclone", Industrial & Engineering Chemistry Research, №48, 2009.
17. Wang B., Chu K. W, Vince A. and Yu A.B. "Numerical studies of the effects of medium properties in dense medium cyclone operations", Minerals Engineering, №22, 2009.

**ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козлов Вадим Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, главный технолог,  
Новак Вадим Игоревич – директор Угольного департамента, кандидат технических наук,  
Пикалов Михаил Федорович – инженер-технолог,  
ООО «Коралайна Инжиниринг» (CETCO), e-mail: info@cetco.ru



UDC 622.7:658.512;  
622.766; 622.755

### LARGE-DIAMETER DENSE-MEDIUM HYDROCYCLONE OPERATION MODELING

Kozlov V.A., PhD Eng, Assistant Professor, Chief process engineer,  
Novak V.I., Coal Department Director, PhD Eng,  
Pikalov M.F., Process engineer,  
Coralina Engineering—CETCP, LLC e-mail: info@cetco.ru

*The article reviews the results of large-diameter dense-medium hydrocyclone operation modeling in the framework of the Australia Coal Association Research Program (ACARP) and Australia Research Council (ARC) in 2008–2010.*

*The studies show that small-diameter, 610–760 mm, hydrocyclones are more effective in separation of coal particles of small size, down to 0.25 mm. Therefore, the authors [1] describe a concept of simple approach to simultaneous increase in output and efficiency of hydrocyclones by combining hydrocyclones of large and small diameter.*

*The fundamental approach to modeling hydrocyclone operation assumes correct understanding of dense-medium cyclone (DMC) operation, overcoming of difficulties, and accurate measurement of its operation parameters.*

*The discussed project involved over 100 alternative models, each for different set of geometry and operation conditions for DMC. As a result, using the databases, the multivariate model has been developed and produced simplified relations of the geometry and operation parameters.*

*The studies point out that high output and high efficiency of medium density separation in hydrocyclones are the mutually exclusive characteristics. In any case, it is feasible to gain from the high output and efficiency of hydrocyclones by combining large-size DMC for coarse particles and small-diameter DMC for fine particles.*

**Key words:** coal preparation, dense-medium hydrocyclone, coal grain size, separation density, separation error.

