

УДК 532.542.4:575.5, 519.63

## **Расходные характеристики гидроциклона со встроенным инжектором**

**Л.Л. Миньков<sup>1</sup>, А.В. Крохина<sup>2</sup>, И.Г. Дик<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Томский государственный университет*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

<sup>3</sup>*Университет Эрланген–Нюрнберг, г. Эрланген, Германия*

E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

На основе экспериментального исследования и численного моделирования выявлены закономерности течения в 50-миллиметровом гидроциклоне с инжектором. Показано, что инжектированная жидкость выводится большей частью через нижний слив. При тангенциальной инжекции над инжектором происходит формирование тороидального вихря, препятствующего вытеканию основного потока через нижний сливной вывод.

**Ключевые слова:** гидроциклон, инжектор, радиальная инжекция, тангенциальная инжекция, сплит-параметр, численное моделирование, эксперимент.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Гидроциклон, широко используемый в различных областях инженерной практики, представляет собой камеру (рис. 1), куда тангенциально вдоль стенки (или радиально) под избыточным давлением вводится поток воды или суспензии, которая, вращаясь с большой скоростью, движется вниз к вершине конуса гидроциклона. Небольшая часть жидкости при этом выходит через нижнюю сливную насадку, основное же количество ее изменяет направление своего движения и, образуя внутренний восходящий поток, поднимается вверх и удаляется из гидроциклона через верхнюю сливную насадку. Частицы твердого материала с плотностью большей, чем у воды, в большей или меньшей степени выделяются из суспензии, отбрасываясь центробежной силой на стенку. В идеале они должны быть выведены из аппарата через нижнее отверстие.

Изучению гидромеханики в гидроциклоне посвящено большое количество специальной литературы [1–19], теоретически (в том числе и с применением вычислительной математики) и экспериментально вскрывшей все основные черты течений. Имеются и работы, ставящие целью изучение технологических аспектов разделения жидкой и твердой фаз или классификации твердой фазы [10, 13, 14, 17, 20–25].

В гидроциклоне, несмотря на чрезвычайно простое устройство самого аппарата, образуются сложные течения, для которых характерно:

- наличие сильной циркуляции;
- сложные поля турбулентности;
- образование замкнутых вихревых зон;
- всасывание жидкости или воздуха извне.

В последнем случае, если выводные патрубки контактируют с воздухом, то образуется воздушный столб, заполняющий всю приосевую зону.

Турбулентность приводит к тому, что мелкие частицы под действием турбулентной диффузии не собираются у внешней стенки, а распределяются по объему аппарата. Если полностью пренебречь влиянием центробежной силы для мельчайших частиц суспензии, то они будут выноситься из аппарата пропорционально количеству воды, истекающим из аппарата через оба вывода, что характеризуется так называемым сплит-параметром, равным отношению расходов выходных потоков.

Неполное отделение твердой фазы, особенно мельчайших фракций перерабатываемой суспензии, частично можно устранить подбором аппаратов с соответствующими характеристиками (размерами) или изменением режимов работы (давления) гидроциклона. Достаточно давно предпринимаются попытки изменить или дополнить конструкцию гидроциклона с целью улучшения управления характеристиками процессов разделения или классификации.

Один из таких способов, который схематично показан на рис. 1, связан с впрыском воды в аппарат через стенку в месте скопления нежелательных мелких частиц перед выводом их из аппарата [25–31].

Ожидается, что впрыск воды будет выносить мелкие частицы из пограничного слоя стенки к оси, где частицы подхватываются восходящим течением и покинут аппарат через верхний слив. Таким образом, мелкие частицы не будут выводиться через нижний слив, предназначенный для вывода крупнозернистого продукта.

Очевидно, что характеристики впрыска (количество впрыскиваемой воды, мощность струй, участок впрыска и т. д.) должны быть оптимизированы. Кроме неизбежных, порой трудоемких экспериментов, моделирование процессов впрыска и его влияния на изменение характеристик разделения может оказаться полезным.

Модели, описывающие влияние инъекции воды на характеристики разделения дисперсного материала, в литературе до сих пор редки [31–32]. Не описана в литературе и гидромеханика потоков в таком аппарате, естественно, отличающаяся от гидромеханики потоков в аппарате без встроенного инжектора.

Цель настоящей работы — моделирование гидромеханики в гидроциклоне с инжектором, подкрепленное экспериментами. При этом особое внимание уделяется выяснению механизмов воздействия инъекции на перестройку гидродинамических полей и, в конце концов, на механизмы классификации.

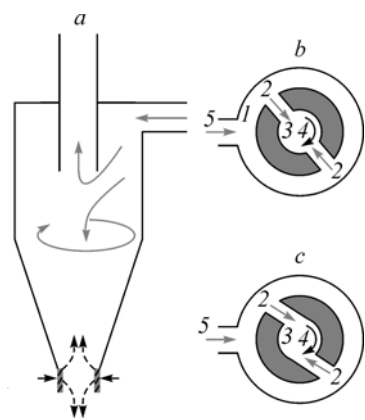


Рис. 1. Схема течения в гидроциклоне со встроенным инжектором (a) и различными схемами инъекции: радиальной (b) и тангенциальной (c).

1 — распределительное кольцо, 2 — инжекционные входы, 3 — внутренняя полость гидроциклона в сечении инжектора, 4 — направление вращения основного потока, 5 — подвод инжектируемой воды.

Рис. 2. Схема гидроциклона с инжектором.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились с 50-миллиметровым гидроциклоном со встроенной системой инъекции воды внизу конической части, схема которого приведена на рис. 2. Размеры гидроциклона приведены ниже (табл. 1).

Диаметр верхнего слива гидроциклона составлял 14 мм, а нижнего слива — 7,2 мм. Рабочим материалом являлась вода, которая подавалась в гидроциклон при помощи центробежного насоса. Давление на входе в гидроциклон регулировалось при помощи вентиля и измерялось манометром, расположенным на входе в гидроциклон. Расход инжектируемой воды измерялся цифровым расходомером.

Механизм инъекции воды состоял из распределительного кольца  $l$  и вставленного в него внутреннего кольца (рис. 1,  $b$ ,  $c$ ), имеющего два диаметрально противоположно расположенных отверстия диаметром 2 мм. Инжектор соединен с питанием воды 5, которая заполняет механизм и поступает в гидроциклон через отверстия 2, включаясь в полости гидроциклона 3 во вращение, соответствующее основному потоку. Инжектор установлен внизу конической части гидроциклона, при этом общая длина гидроциклона и его конической части не изменена. Имеющийся набор колец позволяет инжектировать воду в радиальном направлении ортогонально к движению основного потока в аппарате (рис. 1,  $b$ ) и в тангенциальном направлении (рис. 1,  $c$ ) сонаправлено с движением основного потока воды в гидроциклоне.

Для исследования влияния инъекции на гидродинамику аппарата были экспериментально определены расходы воды через нижнюю и верхнюю сливные насадки в зависимости от расхода питания аппарата и различных значений расхода инжектируемой воды. Случайные ошибки измерений учитывались через осреднение данных повторных экспериментов. Сравнение результатов, полученных при отсутствии дополнительной инъекции, с известными данными из литературы [10, 14, 25, 33] дает основание считать возможные систематические ошибки несущественными.

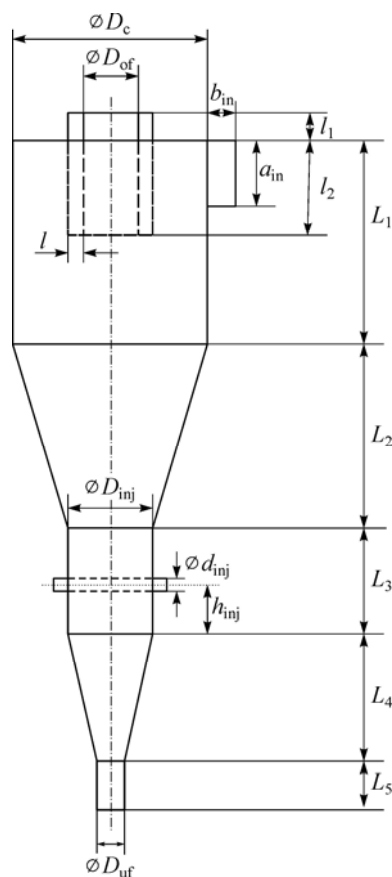


Таблица 1

Размеры гидроциклона в мм

$a_{in}$	$b_{in}$	$D_c$	$D_{of}$	$D_{uf}$	$D_{inj}$	$d_{inj}$	$h_{inj}$	$l$	$l_1$	$l_2$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
22	9,1	50	14	7,2	22	2	38	8,4	30,1	45,5	277	192	76	102	43

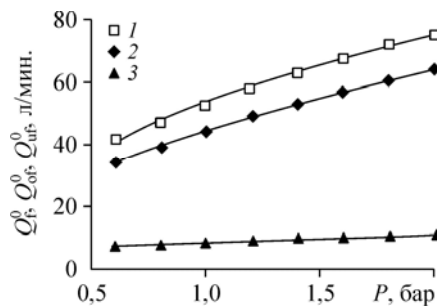


Рис. 3. Зависимость полного расхода воды на входе в аппарат и в обоих выходных отверстиях от давления.

$$1 - Q_f^0, Q_f^0 = 53,364P^{0,4887}, 2 - Q_{of}^0, Q_{of}^0 = 44,591P^{0,5178}, 3 - Q_{uf}^0, Q_{uf}^0 = 8,7553P^{0,3374}.$$

#### ГИДРОЦИКЛОН БЕЗ ИНЖЕКТОРА

Для понимания влияния инжекции на гидромеханику, прежде всего, необходимо знание расходных характеристик гидроциклона без встроенного инжектора.

Измеряемыми характеристиками исследуемого гидроциклона без инжекции являются: поток воды через входной тангенциальный патрубок, т. е. полный расход воды  $Q_f^0$ , расход через нижнюю сливную насадку  $Q_{uf}^0$  и через верхнюю сливную насадку  $Q_{of}^0$ .

Проводилось исследование зависимости расхода от давления на входе в аппарат. На рис. 3 показано, что увеличение расхода воды в питающем патрубке происходит приблизительно пропорционально квадратному корню из давления. Этот вывод согласуется с эмпирическими уравнениями многих авторов, [10, 14, 33, 34] и такая зависимость является одной из характеристик для проверки расчетов на компьютере. Увеличение входного давления приводит к увеличению потоков воды в выходных отверстиях в разных пропорциях (см. рис. 3).

#### ГИДРОЦИКЛОН С ИНЖЕКТОРОМ

На рис. 4, 5 представлены дополняющие данные работ [35, 36] — результаты экспериментальных измерений расходов воды через верхний слив (рис. 4) и нижний слив (рис. 5), полученные для различных давлений на входе в гидроциклон. Здесь:  $Q_{inj}$  — расход инжектирующей жидкости,  $\Delta Q_{of} = Q_{of}^{inj} - Q_{of}^0$ ,  $Q_{of}^0$  — расход жидкости через верхний слив при нулевой инжекции,  $Q_{of}^{inj}$  — расход жидкости через верхний слив при наличии инжекции,  $\Delta Q_{uf} = Q_{uf}^{inj} - Q_{uf}^0$ ,  $Q_{uf}^0$  — расход жидкости через нижнюю сливную насадку при нулевой инжекции,  $Q_{uf}^{inj}$  — расход жидкости через нижнюю сливную насадку при наличии инжекции и, наконец,  $Q_f^{inj}$  — расход жидкости через питающий патрубок при наличии инжекции.

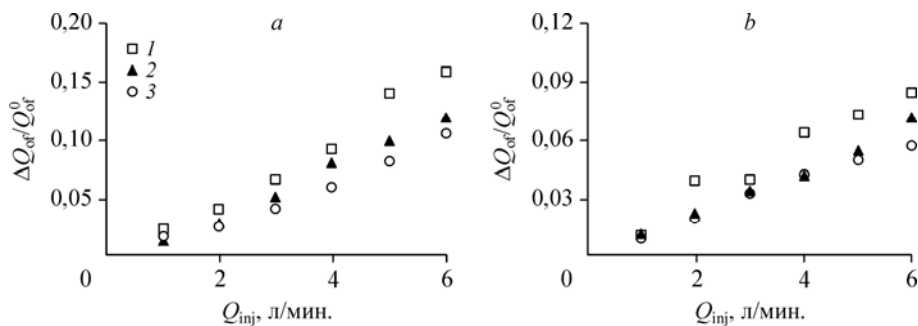


Рис. 4. Расход через верхний вывод.

Инъекции: тангенциальная (а), радиальная (б).  $P = 0,8$  (1),  $1,4$  (2),  $2$  (3) бар.

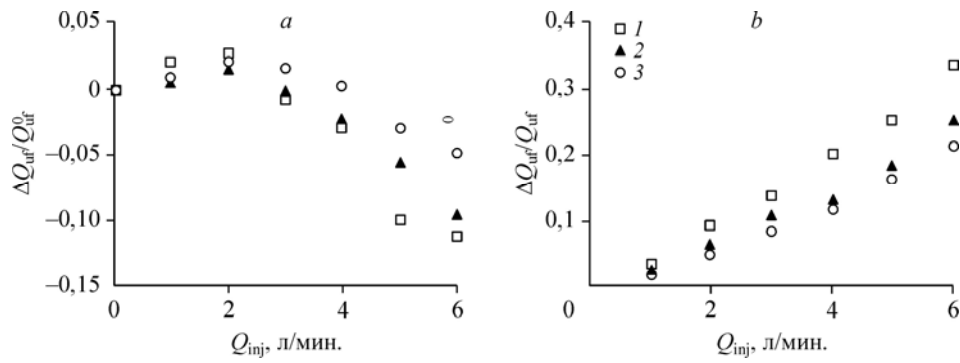


Рис. 5. Расход через нижний вывод.  
Инжекция: тангенциальная (а), радиальная (б).  $P = 0,8$  (1), 1,4 (2), 2 (3) бар.

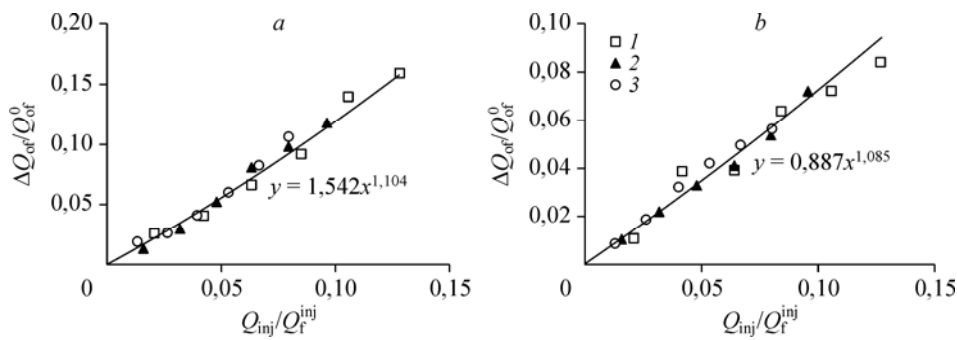


Рис. 6. Расход через верхний вывод, выраженный в универсальных переменных.  
Инжекция: тангенциальная (а), радиальная (б).  $P = 0,8$  (1), 1,4 (2), 2 (3) бар.

Как видно из рисунков, от вида инжекции (радиальная или тангенциальная) зависят не только расходные характеристики гидроциклона, но и характер их поведения.

Кривые, соответствующие различным давлениям, можно объединить (рис. 6, 7), используя универсальные переменные:  $Q_{inj}/Q_f^{inj}$ ,  $\Delta Q_{uf}/Q_{uf}^0$  и  $\Delta Q_{of}/Q_{of}^0$ . Здесь отчетливо видна разница воздействия инжекции на распределение потоков воды через верхнее и нижнее выводное отверстие. Можно предложить эмпирические формулы для потоков воды через выводные отверстия (табл. 2).

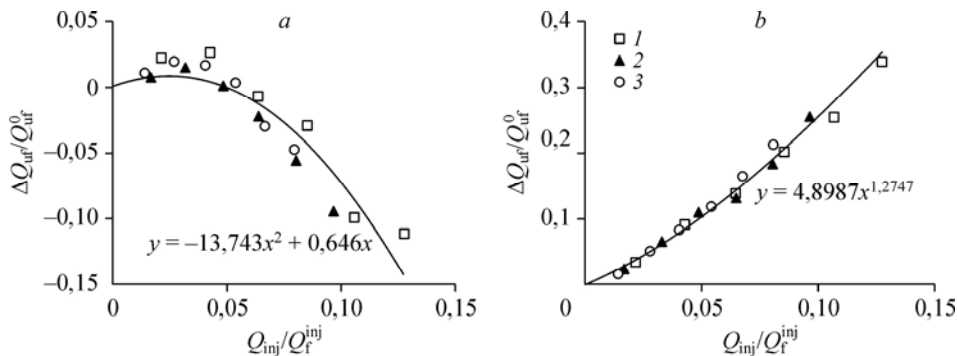


Рис. 7. Расход через нижний вывод, выраженный в универсальных переменных.  
Инжекция: тангенциальная (а), радиальная (б).  $P = 0,8$  (1), 1,4 (2), 2 (3) бар.

Таблица 2

Зависимость потоков через выходные отверстия от условий инжекции

Тангенциальный ввод инжектируемой воды	Радиальный ввод инжектируемой воды
Входной патрубок	
$Q_f^{inj}/Q_F^0 = 1 - 0,12 (Q_{inj}/Q_f^0)$	$Q_f^{inj}/Q_f^0 = 1 - 0,075 (Q_{inj}/Q_f^0)$
Верхняя сливная насадка	
$Q_{of} = Q_{of}^0 \left[ 1 + 1,542 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right)^{1,104} \right]$	$Q_{of} = Q_{of}^0 \left[ 1 + 0,887 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right)^{1,085} \right]$
Нижняя сливная насадка	
$Q_{uf} = Q_{uf}^0 \left[ 1 + 0,646 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right) - 13,743 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right)^2 \right]$	$Q_{uf} = Q_{uf}^0 \left[ 1 + 4,90 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right)^{1,275} \right]$

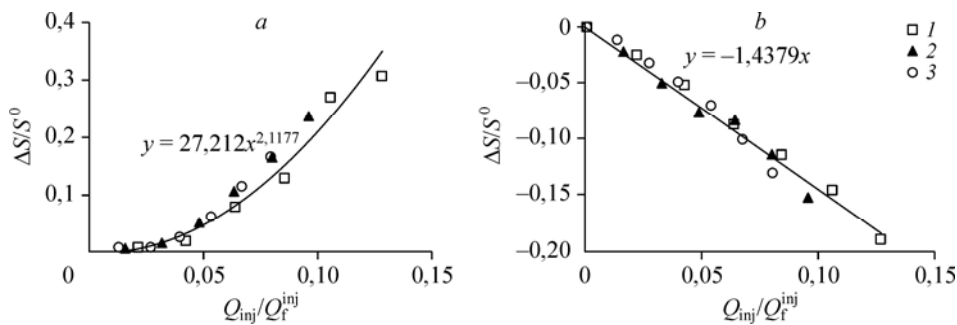


Рис. 8. Влияние давления на зависимость сплит-параметра  $S$  от инжекционного потока. Инжекция: тангенциальная (а), радиальная (б).  $P = 0,8$  (1), 1,4 (2), 2 (3) бар.

Заметим, что инжекция также несколько уменьшает входящий в аппарат поток воды, что также отражено в табл. 2.

Используя полученные соотношения, можно построить зависимость сплит-параметра  $S = Q_{of}/Q_{uf}$  (отношение расходов воды через верхний и нижний сливы) от давления (рис. 8) и дать эту зависимость в универсальных переменных. Обобщающие формулы зависимостей сплит-параметра от условий инжекции имеют вид, приведенный в табл. 3.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Для понимания причин и путей влияния инжекции на распределение потоков внутри гидроциклона привлекалось численное моделирование, осуществленное с помощью пакета Fluent 6.3.26. Моделирование выполнялось на основе модели рейнольдсовых напряжений (RSM) [37–38] в двумерном осесимметричном приближении для закрученных несжимаемых вязких турбулентных течений, которые

Таблица 3

Зависимость сплит-параметра от условий инжекции

Сплит-параметр	
Тангенциальный ввод инжектируемой воды	Радиальный ввод инжектируемой воды
$\frac{S - S^0}{S^0} = 27,21 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right)^{2,118}$	$\frac{S - S^0}{S^0} = -1,438 \left( \frac{Q_{inj}}{Q_f^{inj}} \right)$

описываются уравнением неразрывности

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV) = 0 \quad (1)$$

и системой уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial}{\partial x}(U^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rUV) \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rx}) + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \\ - \rho \left( \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rR_{xr}) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial}{\partial x}(VU) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV^2) - \frac{W^2}{r} \right) + \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} - \\ - \rho \left( \frac{\partial R_{rx}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rR_{rr}) - \frac{R_{\theta\theta}}{r} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial}{\partial x}(WU) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rWV) + \frac{VW}{r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2\tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{\theta x}}{\partial x} - \\ - \rho \left( \frac{\partial R_{\theta x}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rR_{\theta r}) + \frac{R_{r\theta}}{r} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $U$ ,  $V$ ,  $W$  — осевая, радиальная и тангенциальная компоненты вектора скорости, соответственно,  $\tau_{ij}$  — симметричный тензор вязких напряжений, компоненты которого имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial V}{\partial r}, \quad \tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{V}{r}, \\ \tau_{rx} = \tau_{xr} = \mu \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \mu r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{W}{r} \right), \quad \tau_{\theta x} = \tau_{x\theta} = \mu \frac{\partial W}{\partial x}. \end{aligned}$$

$R_{ij}$  — симметричный тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, компоненты которого находятся из решения системы шести уравнений:

$$\frac{\partial \rho U_k R_{ij}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_1} \right) \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} \right] + P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где  $P_{ij}$  — скорость порождения кинетической энергии турбулентности,  $-\rho \left( R_{ik} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right)$ ,  $\Phi_{ij}$  — перераспределение турбулентных напряжений,  $\Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2} + \Phi_{ij,w'}$ ,  $\Phi_{ij,1}$  — перераспределение за счет медленных деформаций поля пульсационных скоростей,  $-C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[ R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right]$ ,  $\Phi_{ij,2}$ , — перераспределение за счет быстрых деформаций поля пульсационных скоростей,

$-C_2 \left[ P_{ij} - C_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (P - C) \right]$ ,  $\Phi_{ij, w'}$  — перераспределение турбулентных напряжений вблизи стенки,

$$C_1' \frac{C_\mu^{3/4} k^{1/2}}{\kappa d} \left( R_{km} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} R_{ik} n_j n_k - \frac{3}{2} R_{jk} n_i n_k \right) +$$

$$+ C_2' \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa d \varepsilon} \left( \Phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \Phi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \Phi_{jk,2} n_i n_k \right).$$

Здесь

$$C_{ij} = \frac{\partial \rho U_k R_{ij}}{\partial x_k}, \quad C = \frac{1}{2} C_{kk}, \quad P = \frac{1}{2} P_{kk}, \quad C_1 = 1,8, \quad C_2 = 0,6, \quad C_1' = 0,5, \quad C_2' = 0,3,$$

$C_\mu = 0,09$ ,  $\kappa = 0,4187$  — постоянная Кармана,  $n_k$  —  $k$ -й компонент единичной нормали к стенке,  $d$  — расстояние по нормали до стенки.

Тензор скорости диссипации определяется из соотношения:  $\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \varepsilon$ ,

причем для  $\varepsilon$  решается уравнение:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho \varepsilon V)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] +$$

$$+ C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} (P_{rr} + P_{\varphi\varphi} + P_{xx}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

где

$$\sigma_\varepsilon = 1,0, \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92.$$

Кинетическая энергия турбулентных пульсаций определялась как  $k = \frac{1}{2} (R_{rr} + R_{\varphi\varphi} + R_{xx})$ . Коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ .

Краевые условия задавались следующим образом:

– на основном входе в гидроциклон:

$$U = 0, \quad V = -\frac{Q_f}{\pi D_c a_{in}}, \quad W = \frac{Q_f}{a_{in} b_{in}};$$

– на входе в гидроциклон через инжектор:

$$U = 0, \quad V = -\frac{Q_{inj}}{\pi D_{inj} d_{inj}}, \quad W = \frac{4Q_{inj}}{n\pi d_{inj}^2},$$

здесь  $n$  — число сопел в инжекторе.

Ширина области инъекции выбиралась из условия равенства суммарной площади поперечных сечений инъекционных сопел площади кольцевого инъекционного участка в модели:

– на нижнем и верхнем выходах из гидроциклона задавалось давление, равное атмосферному, для остальных параметров задавались условия:  $\partial \varphi / \partial x = 0$ ,

$$\varphi = \{ U, V, W, R_{xx}, R_{rr}, R_{\theta\theta}, R_{xr}, R_{x\theta}, R_{r\theta} \varepsilon \};$$



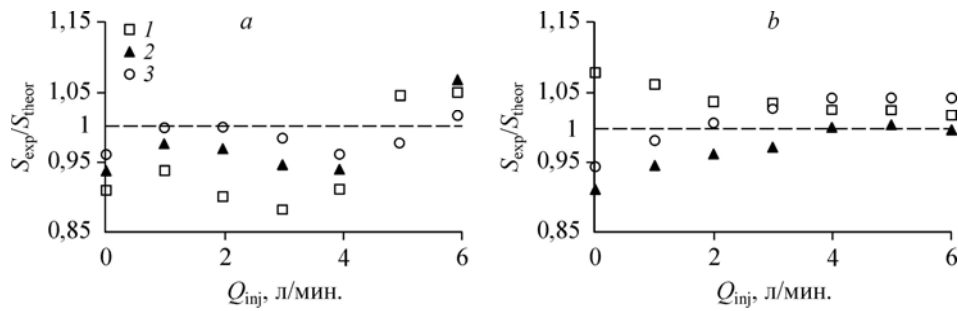


Рис. 9. Сравнение измеренных и рассчитанных значений сплит-параметра при разных значениях инжекционного потока для случаев тангенциальной (а) и радиальной (б) инъекций.  $P = 0,8$  (1), 1,4 (2), 2 (3) бар. Пунктирная линия —  $S_{\text{exp}}/S_{\text{theor}} = 1$ .

– на оси симметрии задавались условия симметрии:

$$V = 0, W = 0, R_{xr} = 0, R_{x\theta} = 0, R_{r\theta} = 0,$$

$$\partial\varphi/\partial r = 0, \quad \varphi = \{U, p, R_{xx}, R_{rr}, R_{\theta\theta}, \varepsilon\}.$$

Интенсивность турбулентности на входных участках гидроциклона предполагалась равной 10 %. Напряжения Рейнольдса на стенке гидроциклона определялись по методике, изложенной в руководстве [39].

Для численного решения определяющей системы уравнений проводилась дискретизация области на 41252 четырехугольные ячейки с использованием предпроцессора Gambit 2.3.16.

Решение системы уравнений количества движения и системы уравнений напряжений Рейнольдса выполнялось в работе [39] с помощью противопоточной 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 [40].

Степень совпадения экспериментальных измерений и расчетов проиллюстрирована на рис. 9, где показано отношение измеренных и рассчитанных значений сплит-параметра при разных значениях инжекционного потока для случаев радиальной и тангенциальной инъекций. Отклонения  $S_{\text{exp}}/S_{\text{theor}}$  от 1 лежат, в основном, в пределах 5 %.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ниже приведены расчеты при давлении в питающем патрубке равном двум барам. На рис. 10 показаны проекции линий тока жидкости в гидроциклоне на плоскость  $r - z$  в отсутствие инъекции (см. рис. 10, а), при радиальном инжектировании (см. рис. 10, б) и при тангенциальном инжектировании (см. рис. 10, в).

Видно, что при тангенциальном инжектировании над инжектором формируется вытянутая вдоль стенки гидроциклона тороидальная (рециркуляционная) зона, которая существенно деформирует основной поток от питающего патрубка, тогда как при радиальном инжектировании инжекционная жидкость слабо изменяет основной поток.

Проекция линий тока на плоскость  $r - z$  вблизи инжектора при радиальном и тангенциальном инжектировании показаны, соответственно, на рис. 11 и 12.

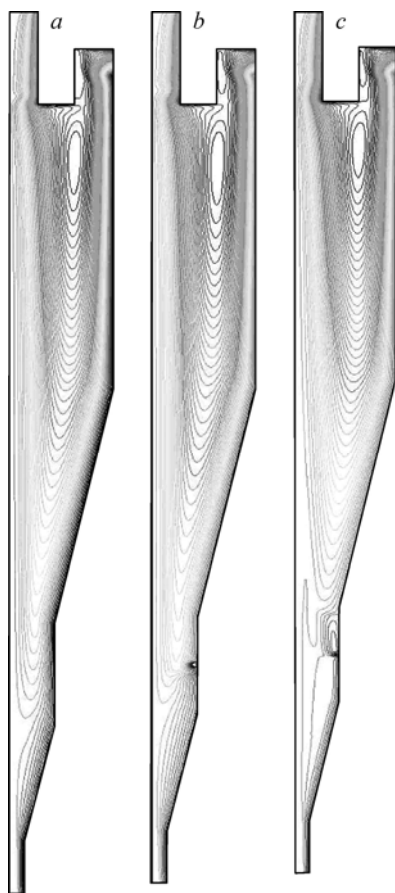


Рис. 10. Проекция линий тока на плоскость  $r-z$ .  
 $a$  — без инъекции,  $Q_{inj} = 0$  л/мин,  $b$  — радиальная инъекция,  $Q_{inj} = 6$  л/мин,  $c$  — тангенциальная инъекция,  $Q_{inj} = 6$  л/мин.

При малых расходах инъектирования ( $Q_{inj} = 2$  л/мин) способ инъектирования практически не влияет на картину течения (поля течений практически не деформируются) (см. рис. 11,  $a$  и 12,  $a$ ). Вся инъектированная жидкость движется в пристеночном слое на выход в нижний слив.

При увеличении скорости инъектирования ( $Q_{inj} = 4$  л/мин и выше) способ инъектирования оказывает существенное влияние на поле течения.

При тангенциальном инъектировании над инжектором образуется вихрь, протяженность которого вдоль стенки увеличивается с ростом расхода инъектирования (см. рис. 12,  $b$ ,  $c$ ). Жидкость от инжектора, прежде чем вытечь через нижний слив, движется вверх вдоль стенки, а потом развора-

чивается, изменяя направление. Наличие такого вихря приводит к тому, что инъекционная струя выступает как своеобразный запирающий элемент, заставляя большую часть жидкости от основного питающего патрубка вытекать через верхний слив, тем самым, увеличивая сплит-параметр (см. рис. 8,  $a$ ).

При радиальном инъектировании под инжектором образуется вихрь, размеры которого увеличиваются с ростом инъекционного расхода (см. рис. 11,  $b$ ,  $c$ ). В отличие от предыдущего случая, этот вихрь слабо изменяет поле течения и не запирает основной поток, тем самым позволяя основному потоку вытекать с прежней интенсивностью через нижнее сливное отверстие. Поскольку вся инъектированная жидкость покидает гидроциклон через нижний слив, то увели-

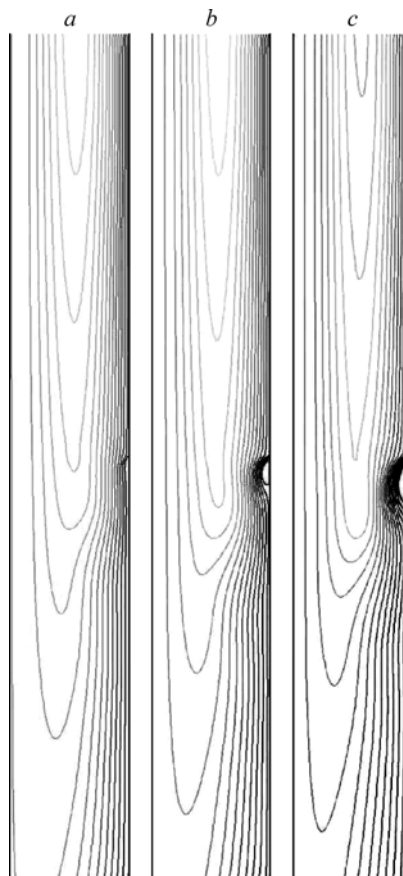


Рис. 11. Проекция линий тока вблизи инжектора на плоскость  $r-z$ .

Радиальная инъекция:  $Q_{inj} = 2$  ( $a$ ), 4 ( $b$ ), 6 ( $c$ ) л/мин.

Рис. 12. Проекция линий тока вблизи инжектора на плоскость  $r-z$ .

Тангенциальная инъекция:  $Q_{inj} = 2$  (a), 4 (b), 6 (c) л/мин.

чение инжекционного расхода ведет к наблюдаемому в экспериментах уменьшению сплит-параметра (см. рис. 8, b).

Имея в виду влияние движения жидкости на траектории частиц суспензии в аппарате, рассмотрим распределение различных компонент скорости в сечении инжектора. Эти распределения даны на рис. 13–15. При этом сравниваются между собой скорости, рассчитанные для случаев отсутствия инъекции и при обоих способах инъекции (расход через инжектор 6 л/мин).

При обоих способах инъекции распределение радиальной скорости обнаруживает подобный характер. Область распространения инжектируемой струи ограничивается в рассматриваемом примере примерно четвертью радиуса канала в данном сечении. Это течение способно отгеснить мелкие частицы, концентрирующиеся у стенки под влиянием центробежных сил.

Мы видим, что такой механизм действует примерно одинаково эффективно при обоих способах инъекции.

Распределение окружной скорости показано на рис. 14. Влияние инъекции на распределение окружной скорости сказывается примерно на том же расстоянии от стенки, что и для радиальной компоненты (см. рис. 13). Интересно, что для радиальной инъекции тангенциальная скорость у стенки падает, а для тангенциальной инъекции растет. Последствия этого для частиц в той области могут быть, соответственно, разными. Возросшая окружная скорость способствует удержанию частиц в пристеночном слое (тем сильнее, чем крупнее частицы). В этом смысле для тангенциальной инъекции эффективность механизма отгеснения частиц радиальным течением падает. Для радиальной инъекции падающая окружная скорость меньше препятствует отгеснению частиц из пристеночного слоя.

Решающим является распределение осевой скорости, показанное на рис. 15. В пристеночном слое течения при обоих способах инъекции качественно подобны течению без инъекции: течения направлены вниз. В отличие от остальных компонент, осевая скорость

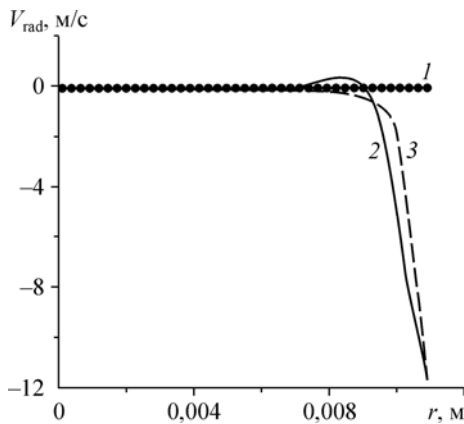
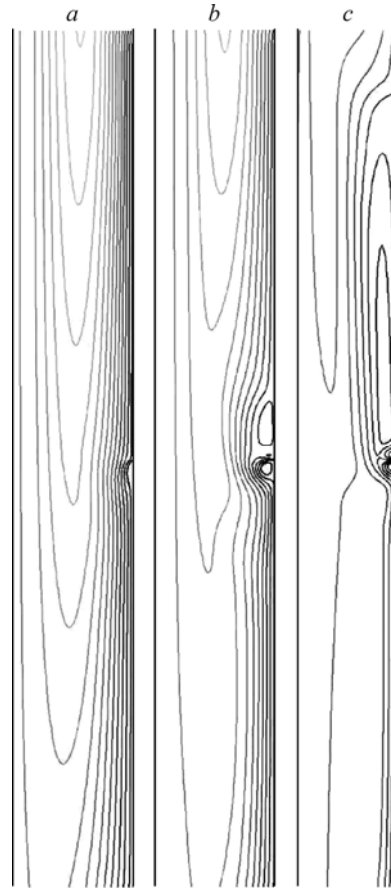


Рис. 13. Распределение радиальной компоненты скорости в сечении инжектора. 1 — без инъекции, 2 — тангенциальная инъекция, 3 — радиальная инъекция.

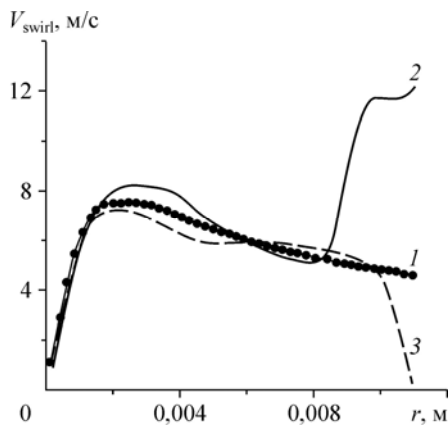


Рис. 14. Распределение тангенциальной компоненты скорости в сечении инжектора.

1 — без инжекции, 2 — тангенциальная инжекция, 3 — радиальная инжекция.

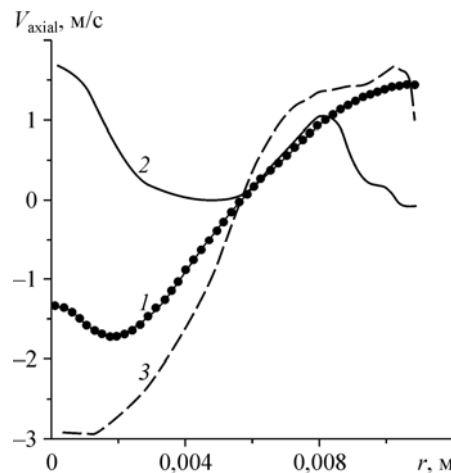


Рис. 15. Распределение осевой компоненты скорости в сечении инжектора.

1 — без инжекции, 2 — тангенциальная инжекция, 3 — радиальная инжекция.

испытывает влияние инжекции на всем удалении от стенки. При этом для радиальной инжекции вблизи оси аппарата характерно течение воды вверх, как и для течения без инжекции, а для тангенциальной инжекции прямо противоположное течение — вниз, по направлению к нижнему выводному отверстию.

#### ВЫВОДЫ

1. Практически вся инжектированная вода (независимо от степени закрутки инжектирующего потока) выводится через нижнее сопло.

2. При обоих методах инжекции расход воды через верхний слив увеличивается с увеличением инжекционного потока. Причиной является перестройка основного потока. Особенно существенна перестройка в случае тангенциальной инжекции.

3. Тангенциально инжектированная жидкость действует как запирающий слой, существенно разворачивающий основной поток в сторону верхнего слива. Этот слой тем эффективнее препятствует проникновению жидкости основного потока в нижний слив (поток воды через нижнее сечение падает), чем выше инжекционный поток.

4. Непосредственно в сечении инжектора радиальная компонента скорости при обоих способах инжекции одинакова (при одном и том же расходе). Это означает, что механизм оттеснения частиц от стенки является важным фактором улучшения эффективности отделения мелких частиц, независимо от способа инжекции. При тангенциальной инжекции образование вихря над инжектором увеличивает время движения увлекаемых этим вихрем частиц в аппарате.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Monredon T.C., Hsien K.T., Rajamani R.K. Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions // Inter. J. of Mineral Proc. 1992. Vol. 35, No. 1. P. 65–83.
2. Pericleous K.A., Rhodes N. The hydrocyclone classifier — a numerical approach // Inter. J. of Mineral Proc. 1986. Vol. 17, No. 1. P. 23–43.

3. **Dyakowski T., Williams R.A.** Modelling turbulent flow within a small-diameter hydrocyclone // *Chem. Engng. Sci.* 1993. Vol. 48, No. 6. P. 1143–1152.
4. **Dyakowski T., Williams R.A.** Prediction of high solids concentration regions within a hydrocyclone // *Powder Technology.* 1996. Vol. 87. P. 43–47.
5. **Malhotra A., Branion R.M.R., Hauptmann E.G.** Modeling the Flows in a Hydrocyclone // *The Canadian J. of Chem. Engng.* 1994. Vol. 72. P. 953–960.
6. **He P., Salcudean M., Branion R., Gartshore I.** Mathematical Modelling of Hydrocyclones // *ASME Fluids Engng Division Summer Meeting. FEDSM97-3315.* 1997.
7. **Dyakowski T., Novakowski A.F., Kraipech W., Williams R.A.** A three dimensional Simulation of Hydrocyclone behaviour // *Second Inter. Conf. on CFD in the Mineral and Proc. Industries, CSRO, Melbourne, Australia.* 1999.
8. **Novakowski A.F., Kraipech W., Dyakowski T., Williams R.A.** The hydrodynamics of a hydrocyclone based on a three-dimensional multi-continuum model // *Chem. Engng.* 2000. Vol. 80. P. 275–282.
9. **Bloor M.I.G., Ingham D.B.** Theoretical investigation of the flow in a conical hydrocyclone // *Trans. Inst. Chem. Engng.* 1973. Vol. 51, No. 1. P. 36–41.
10. **Терновский И.Г., Кутепов А.М.** Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.
11. **Plitt L.R.** A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier // *CIM Bulletin.* 1976. No. 69. P. 114–123.
12. **Drissen M.G.** Theorie d'écoulement dans un cyclone // *Rev. Industr. Miner.* 1951. Vol. 31, No. 566. P. 482–495.
13. **Поваров А.И.** Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М: Недра, 1978. 232 с.
14. **Bradley D.** The hydrocyclone. London: Pergamon press, 1965. 331 p.
15. **Kelsall D.F.** A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone // *Trans. Inst. Chem. Engng.* 1952. Vol. 30, No. 3. P. 87–108.
16. **Матвиенко О.В.** Анализ моделей турбулентности и исследование структуры течения в гидроциклоне // *Инженерно-физический журнал.* 2004. Т. 77, № 2. С. 58–64.
17. **Матвиенко О.В., Дик И.Г.** Численное исследование сепарационных характеристик гидроциклона при различных режимах загрузки твердой фазы // *Теоретические основы химической технологии.* 2006. Т. 40, № 2. С. 219–224.
18. **Иванов А. А., Балахнин И. А., Пронин А. И., Кудрявцев Н. А., Диков В. А., Суханов Д. Е., Баранов Д. А., Лагуткин М. Г., Кутепов А. М.** Переходные режимы и кризисные явления в гидроциклонах // *Теоретические основы химической технологии.* 2007. Т. 41, № 6. С. 681–691.
19. **Яблонский В.О.** Влияние геометрии рабочего пространства цилиндро-конического гидроциклона на гидродинамику течения неньютоновской жидкости // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2005. № 2. С. 102–112.
20. **Яблонский В.О.** Обобщенная математическая модель разделения суспензий в гидроциклоне // *Химия и химическая технология.* 2006. Т. 49, вып. 1. С. 82–86.
21. **Neesse Th., Dueck J., Minkov L.L.** Separation of finest particles in hydrocyclones // *Mineral Engng.* 2004. Vol. 17. P. 689–696.
22. **Schuetz S., Mayer G., Bierdel M., Piesche M.** Investigations on the flow and separation behaviour of hydrocyclones using computational fluid dynamics // *Inter. J. of Mineral Proc.* 2004. Vol. 73. P. 229–237.
23. **Narasimha M., Sripriya R., Banerjee P. K.** CFD modeling of hydrocyclone — prediction of cut size // *Inter. J. of Mineral Proc.* 2005. Vol. 75. P. 53–68.
24. **Дик И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т.** Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // *Теоретические основы химической технологии.* 2000. Т. 34, № 5. С. 478–488.
25. **Heiskanen K., Particle Classification.** London – Glasgow – New-York – Tokyo – Melbourne – Madras: Chapman and Hall, 1993. 321 p.
26. **Patil D.D., Rao T.C.** Technical Note. Classification evaluation of water injected hydrocyclone // *Mineral Engng.* 1999. Vol. 12, No. 12. P. 1527–1532.
27. **Kelsall D.F., Holmes J.A.** Improvement in classification efficiency in hydraulic cyclones by water injection // *Proc. 5th Mineral proc. Cong., Paper 9, Inst. Of Mining and Metallurgy.* 1990. P. 159–170.
28. **Honaker R.Q., Ozsever A.V., Singh N., Parekh, B. K.** Apex water Injection for improved hydrocyclone classification efficiency // *Mineral Engng.* 2001. Vol. 14, No. 11. P. 1445–1457.
29. **Bhaskar K.U. Govindarajan B., Barnawal J.P., Rao K.K., Rao T.C.** Modelling studies on a 100 mm water-injection cyclone // *Phys. Separation in Sci. and Engng.* 2004. Vol. 13, No. 3–4. P. 89–99.
30. **Bhaskar K.U. Govindarajan B., Barnawal J.P., Rao K.K., Gupta B.K., Rao T.C.** Classification studies of lead-zinc ore fines using water-injection cyclone // *Inter. J. of Mineral Proc.* 2005. Vol. 77. P. 80–94.

31. **Дик И.Г., Пикушак Е.В., Миньков Л.Л.** Моделирование изменения характеристик разделения классификатора путем инъекции воды в аппарат // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 2. С. 261–273.
32. **Mittal Manju.** Adaptation of Hydrocyclone to Varying Solid Load by Air Injection // Chem. Eng. Technol. 1996. Vol. 19. P. 510–513.
33. **Schubert H.** Mechanische Verfahrenstechnik. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990. 407 p.
34. **Tarjan G.** Some theoretical questions on classifying and separating hydrocyclones // Acta Tech. Acad. Sci. 1961. No. 32. P. 357–388.
35. **Dueck J., Krokhina A., Minkov L.L., Neesse T.** Hydrodynamics of a cyclone with wash water injection. // 7th World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 28 June – 03 July 2009, Poland, Krakow: AGH University of Sci. and Technology Press, 2009. P. 1953–1960.
36. **Dueck J., Krokhina A.V., Pavlikhin G.P.** Hydrodynamics of a cyclone with radial wash water injection // Materialien zum wissenschaftlichen Seminar der Stipendiaten der Prog. “Michail Lomonosov II” und “Immanuel Kant II” 2008/2009, Moskau, 24-25 April 2009. P. 115–118.
37. **Lauder B.E.** Second-Moment Closure and Its Use in Modeling Turbulent Industrial Flows // Inter. J. for Numerical Meth. in Fluids. 1989. No. 9. P. 963–985.
38. **Gibson M. M., Launder B. E.** Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer // J. Fluid Mech. 1978. V. 86. P. 491–511.
39. **FLUENT 6.3 User's Guide.** © Fluent Inc. 2006-09-20.
40. **Issa R.I.** Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting // J. Comput. Phys. 1986. Vol. 62. P. 40–65.

*Статья поступила в редакцию 6 ноября 2009 г.,  
после переработки 22 июня 2010 г.*