

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ОЧИСТКЕ СТОКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ОТ НЕРАСТВОРИМЫХ ВЗВЕСЕЙ

Д.В. АЛЕКСЕЕВ*, А.А. ШАГИВАЛЕЕВ**, Л.Р. УРАЗБАХТИНА*,
Е.А. НАПОЙКИНА*

*Казанский государственный энергетический университет

**Казанский национальный исследовательский технологический университет

Важнейшей проблемой в настоящее время остается качественная очистка стоков энергетических установок, которые представляют собой агрессивные среды с большим количеством растворенных и взвешенных примесей. Повторное использование стоков возможно только после их обессоливания и качественной очистки от взвеси. Основным вариантом решения указанной проблемы является внедрение в системы оборотной водоочистки высокоэффективных аппаратов прямоточно-вихревого типа.

Ключевые слова: турбулентная миграция частиц, струйные флотационные аппараты; аппараты прямоточно-вихревого типа; разделения гетерогенных систем; очистка жидких выбросов энергетических установок.

Одной из важных проблем в современной энергетике является очистка жидких выбросов энергетических установок. Так, например, на тепловых электрических станциях образуется большое количество жидких стоков, загрязнённых золой и шлаками. В настоящее время на большинстве предприятий шлакозоловая пульпа поступает на золоотвал, где зола и шлак осаждаются под действием силы тяжести, а отстоянная вода сбрасывается в водоем (реку, озеро и т.д.) [1].

Такой способ разделения гетерогенных систем обладает низкой производительностью, особенно в случаях небольшой разницы в плотностях сплошной и дисперсной фаз, а также малых размеров дисперсных частиц (0,1–0,2 мм). В результате отстойники имеют, как правило, большие габариты. Попытки увеличить скорость разделения гетерогенных систем в отстойниках путём применения коагулянтов и флокулянтов ведут к существенному повышению затрат на процесс разделения и весьма скромному повышению их эффективности.

Решение этой проблемы осложнено большими объёмами выбросов, что определяет особые требования к аппаратурному оформлению процессов очистки, включающие требования к высокой пропускной способности и эффективности, а также минимизации энергетических затрат на процесс очистки.

Изменить сложившуюся ситуацию возможно за счёт внедрения замкнутой системы оборотной водоочистки, организуемой путём использования высокоэффективных методов разделения воды и взвеси. Одним из таких методов является центробежное разделение гетерогенной системы жидкость – твёрдая фаза, например, в гидроциклонах. Однако, в связи с тем, что в аппаратах этого типа реализуется два встречных потока сплошной фазы (периферийный и приосевой), в них наблюдается эффект «вторичного уноса», снижающий качество очистки жидкости от тонкодисперсной тонкой фазы [2].

Этого недостатка лишены прямоточно-вихревые сепараторы (рис. 1), в которых осуществляется вращательно-поступательное движение сплошного потока без

встречных течений в объёме аппарата. Возникающая при этом центробежная сила позволяет отделить частицы тяжёлой фазы от воды. Шлам отводится через периферийный патрубок, а осветлённая вода – через центральный и направляется вновь в систему водоочистки [3].

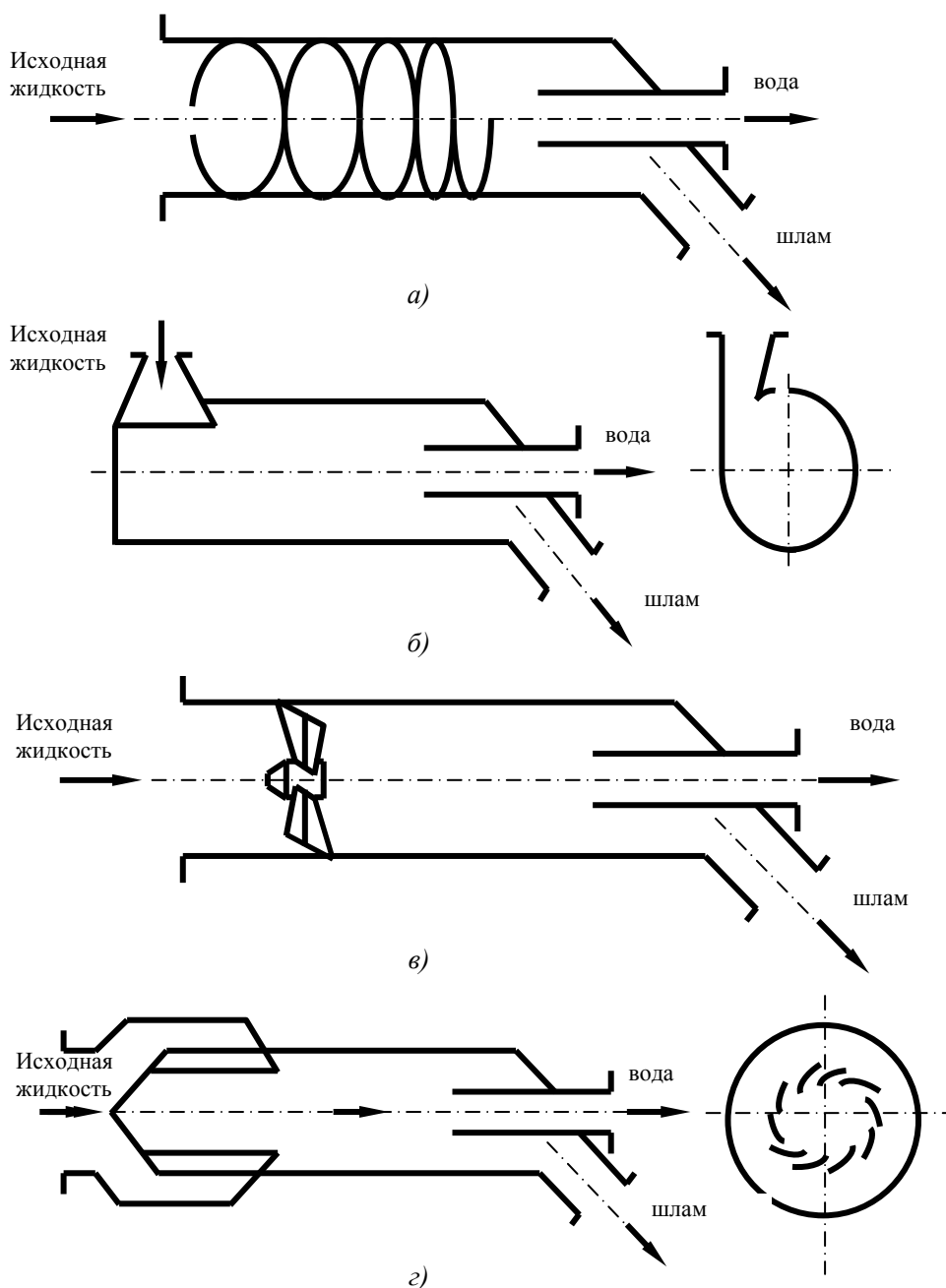


Рис. 1. Конструкции прямоточно-вихревых сепараторов с различными завихрителями потока:
а) винтовым; б) тангенциальным; в) аксиально-лопаточным; г) тангенциально-лопаточным

Однако, несмотря на очевидную перспективность прямоточно-вихревых сепараторов при очистке больших объёмов стоков от твёрдых взвесей, их

промышленное применение сдерживается из-за отсутствия научно-обоснованного метода расчёта.

В связи с этим ниже изложен метод расчёта прямоточно-вихревых сепараторов, основанный на описании движения дискретных твёрдых частиц в центробежном поле без их конгломерации и дробления. Предполагается, что при поступлении в сепаратор дисперсная фаза равномерно распределяется в объёме несущей среды.

В рамках поставленной задачи движение дискретных твёрдых частиц в центробежном поле записывается

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = \sum_i \vec{F}_i; \quad \frac{d\vec{r}}{d\tau} = \vec{V}, \quad (1)$$

где m – масса частицы; $\vec{V}$ – вектор скорости частицы; τ – время; $\vec{F}_i$ – вектор внешних сил, действующих на частицу.

Система уравнений (1) записывается и анализируется в цилиндрической системе координат, жёстко связанной с аппаратом. Анализ внешних сил, влияющих на характер движения частиц, показал [4], что доминирующее воздействие оказывают силы сопротивления среды и сила Архимеда. Остальные внешние силы не учитываются в силу их малой значимости.

$$\begin{cases} W_z = W_0, \\ W_\varphi = W_{\varphi 0} \frac{r}{R} = K W_0 \frac{r}{R}, \\ W_r = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где W_0 – средняя скорость потока на входе в аппарат; r – текущий радиус; R – радиус аппарата.

Предшествующие результаты экспериментального исследования профилей скорости несущего потока ($W_r; W_\varphi; W_z$) показали [4], что при высоких значениях крутки потока $K = W_\varphi / W_z$ распределение окружной компоненты скорости (W_φ) по радиусу аппарата близко к закону вращения твёрдого тела, а осевая компонента скорости (W_z) имеет распределение, близкое к равномерному.

Решение задачи упрощается тем, что в окружном и осевом направлениях дисперсные частицы движутся практически без проскальзывания по отношению к несущему потоку [4]. Тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\frac{dV_r}{d\tau} = \frac{V_f^2}{r} (1 - \Pi) - \frac{3}{4} \text{Пс}_x \frac{U}{a} V_r; \quad \frac{dr}{d\tau} = V_r, \quad (3)$$

где $\Pi = \frac{\rho_c}{\rho_\text{ч}}$ – отношение плотностей несущего потока и частицы;

$U = \sqrt{(W_r - V_r)^2}$ – относительная скорость частицы; a – диаметр частицы.

Для осуществления качественного разделения гетерогенной системы основное значение имеет выделение из сплошного потока тонкодисперсных фракций.

Как правило, сопротивление мелких частиц подчиняется закону Стокса:

$$c_x = \frac{24}{\text{Re}_\text{ч}}; \quad (4)$$

С учётом (2) и (4) уравнение (3) примет вид:

$$\frac{dV_r}{d\tau} = \frac{K^2 W_0^2 r}{R^2} (1 - \Pi) - 18\Pi \frac{\nu_c}{a^2} V_r; \frac{dr}{d\tau}, \quad (5)$$

где ν_c – вязкость среды. Или

$$\frac{d^2 r}{d\tau^2} + A \frac{dr}{d\tau} - Br = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) можно представить в виде

$$r = C_1 e^{\lambda_1 \tau} + C_2 e^{\lambda_2 \tau}. \quad (7)$$

При начальных условиях движения частиц дисперсной фазы:

$$\tau = 0, \quad r = r_n, \quad V_r = 0, \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{r_n \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = r_n \left(\frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B}}{2\sqrt{A^2 + 4B}} \right), \quad (9)$$

$$C_2 = r_n \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) = r_n \left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4B}}{2\sqrt{A^2 + 4B}} \right),$$

$$\text{где } A = 18\Pi \frac{\nu_c}{a^2}; \quad B = \frac{K^2 W_0^2}{R^2} (1 - \Pi); \quad \lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(-A \pm \sqrt{A^2 + 4B} \right).$$

Учитывая, что плотность дисперсной фазы превосходит плотность сплошного потока, то есть $\Pi < 1$, то фракционная эффективность процесса разделения гетерогенной системы может быть определена по уравнению

$$\eta_{\phi} = 1 - (r_{\text{кр}} / R)^2 = 1 - r_n^2 \left(C_1 e^{\lambda_1 \tau_{\text{кр}}} - C_2 e^{\lambda_2 \tau_{\text{кр}}} \right)^{-2}. \quad (10)$$

При этом частицы заданного размера осядут на стенке сепаратора, если их положение на входе соответствует условию $r_n > r_{\text{кр}}$. Критический радиус исходного положения дисперсной частицы определяет, при заданной геометрии разгрузочного узла, длине сепарационной зоны и расхода потока, способность частиц достичь стенки сепаратора. Для каждого размера частиц существует своё значение $r_{\text{кр}}$, зависящее от

времени движения $\tau_{\text{кр}} = \frac{z}{W_0}$ и коэффициента крутки потока K .

Общая эффективность разделения гетерогенной системы в сепарационном устройстве определяется соотношением

$$\eta = \int_0^{\infty} \eta_{\phi} V(a) da, \quad (11)$$

где $V(a)$ – объёмная функция распределения дисперсной фазы по размерам частиц.

Расчёт общей эффективности разделения может быть выполнен только при наличии данных о дисперсном составе дискретной фазы. Параметры течения и геометрия аппарата выбираются так, чтобы достигаемая при этих условиях фракционная эффективность обеспечивала заданную общую эффективность разделения гетерогенной системы.

На основе полученных соотношений было проведено исследование закономерностей изменения эффективности процесса разделения гетерогенной системы в прямоточно-вихревом аппарате в зависимости от дисперсности дискретной

фазы, соотношения плотностей, параметров течения потока, геометрии аппарата и выявлена связь расходных и геометрических параметров аппарата с эффективностью разделения гетерогенной системы.

Расчёты выполнялись для системы с соотношением плотностей $\rho_c / \rho_q = 1/1,3$. Как показали результаты расчёта, закрутка несущего потока обеспечивает достаточно эффективное разделение гетерогенной системы при среднерасходной скорости потока 0,5–3,0 м/с (рис. 2).

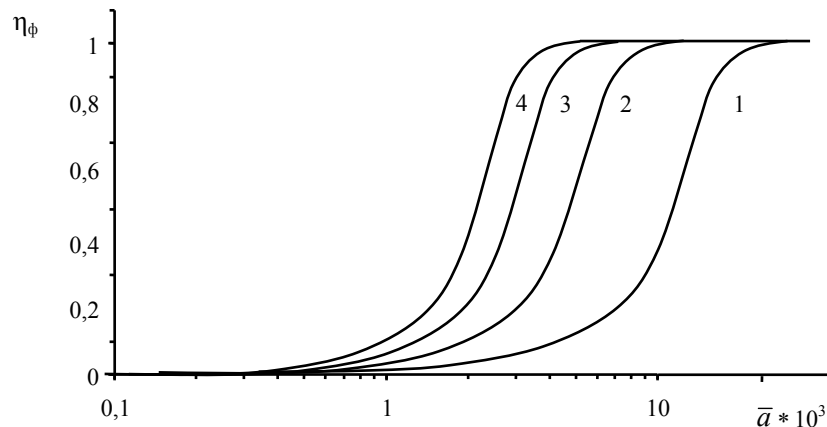


Рис. 2. Зависимость эффективности разделения системы вода – частицы шлака от размера частиц и крутки потока: $\Pi = 1,0 / 1,3$; $Re = 7,5 \cdot 10^4$; $\bar{z} = 20$; $K = 1 - 0,5$; $2 - 1$; $3 - 1,5$; $4 - 2$

Важным геометрическим параметром, определяющим эффективность процесса, является длина аппарата, изменение которой позволяет управлять конечным результатом процесса разделения (рис. 3). Для практических целей целесообразно представить связь комплекса физических величин $\bar{V}$ от критического времени сепарации (рис. 4).

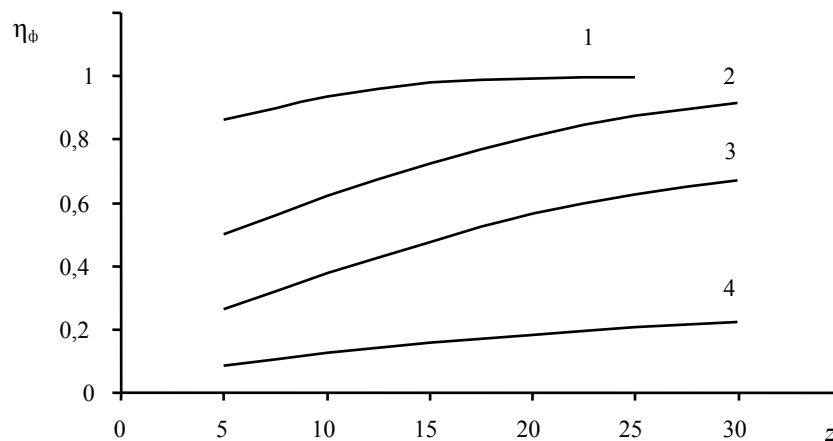


Рис. 3. Влияние длины сепарационной зоны $\bar{z} = z / R$ на фракционную эффективность процесса сепарации: $K = 1,0$; $Re = 7,5 \cdot 10^4$; $\Pi = 1,0 / 1,3$; $a = 1 - 2 \cdot 10^{-3}$; $2 - 4 \cdot 10^{-3}$; $3 - 6 \cdot 10^{-3}$; $4 - 10 \cdot 10^{-3}$

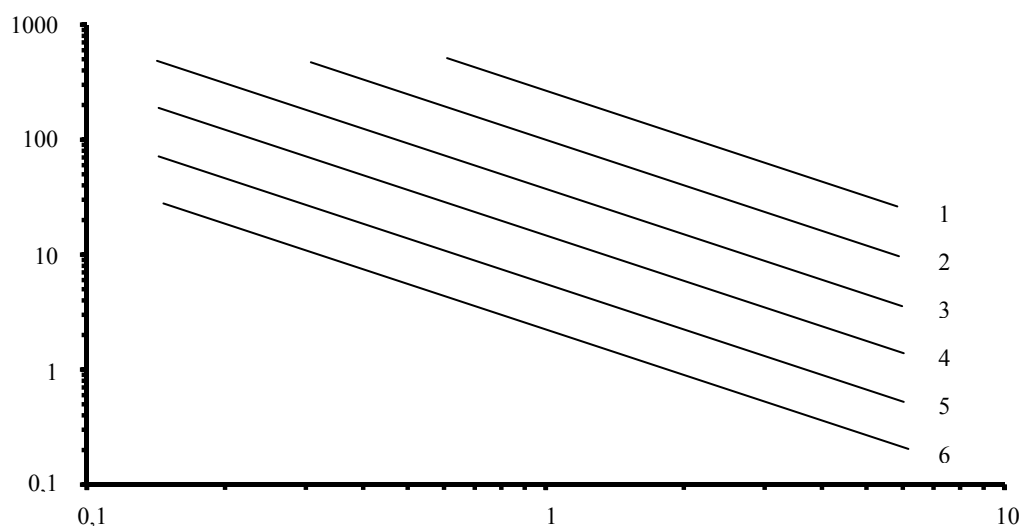


Рис. 4. Связь режимных и геометрических параметров сепаратора при $\eta_{\text{ф}} = 0,95$;

$\Pi = 1,0 / 1,3$; a : 1 – 0,25; 2 – 0,4; 3 – 0,63; 4 – 1,0; 5 – 1,6; 6 – 2,5

Таким образом, проведённые расчеты, а также экспериментальные исследования [5] показали высокую эффективность очистки стоков энергетических установок от нерастворимых взвесей в аппаратах прямоточно-вихревого типа и целесообразность их внедрения в системы оборотной водоочистки.

Summary

The major problem now is high-quality wastewater treatment power plants, which are corrosive media with a lot of dissolved and suspended impurities. Reuse of wastewater is only possible after desalting and purification of high-quality suspension. The main way to solve this problem is to introduce a system of high-performance recycled water treatment devices direct-flow vortex.

Keywords: *turbulent migration of particles, Inkjet flotatsonnye apparatus; devices direct-flow vortex; separation of heterogeneous systems; cleaning liquid emissions of power plants.*

Литература

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М.: Энергоатомиздат, 1987. 328 с.
2. Алексеев Д.В., Шагивалеев А.А., Уразбахтина Л.Р., Павлова М.В. Комплексная очистка стоков от нефтепродуктов в аппаратах прямоточно-вихревого типа и струйных флотационных аппаратах // Вестник технологического университета. 2014. Т. 17, №11. С.193-195.
3. Прямоточный вихревой аппарат. Пат. на полезную модель 88997 / Алексеев Д.В., Николаев Н.А., Шагивалеев А.А., Николаев А.Н. 27.11.2009 г., Бюл. №33.
4. Овчинников А.А., Шадрин А.А., Алексеев Д.В., Николаев Н.А. Разделение гетерогенных систем жидкость-жидкость и жидкость-твёрдая фаза в прямоточных вихревых сепараторах // Теоретические основы химической технологии. 2006. Том. 40. №4. С.442-446.
5. Зиганшин М.Г., Латыпов Д.Д., Алексеев Д.В. Эффективность очистки воды от жидких взвешенных частиц вихревыми сепараторами // Экология и промышленность России. 2008. №12. С.12-15.

Алексеев Дмитрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)5447520. E-mail: alex-dima@list.ru.

Шагивалеев Альберт Аухатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование пищевых производств» (ОПП) Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел.: 8(843)5447520. E-mail: alex-dima@yandex.ru.

Уразбахтина Лилия Равиловна – канд. экон. наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)2781888. E-mail: strat.men@yandex.ru.

Напойкина Екатерина Александровна – старший преподаватель кафедры «Экономика и организация производства» (ЭОП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(960)0310333. E-mail: ekaterina0686@yahoo.com.