

УДК 622.7-52:004.6

# МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СГУЩЕНИЯ ШЛАМОВЫХ ВОД И ОСВЕТЛЕНИЯ ОТХОДОВ ФЛОТАЦИИ

*Розроблено новий метод управління процесом згушення шламових вод і освітлення відходів флоатації в радіальному згушувачі. Досліджений вплив параметрів процесу осадження, що змінюються, на якість регулювання. Запропонований метод відновлення параметрів моделі об'єкту в ході його нормального функціонування*

*Ключові слова: радіальний згушувач, оптимальний дискретний регулятор, ідентифікатор параметрів моделі об'єкту*

*Разработан новый метод управления процессом сгушения шламовых вод и осветления отходов флоатации в радиальном сгустителе. Исследовано влияние изменяющихся параметров процесса осаднения на качество регулирования. Предложен метод восстановления параметров модели объекта в ходе его нормального функционирования*

*Ключевые слова: радиальный сгуститель, оптимальный дискретный регулятор, идентификатор параметров модели объекта*

*A new method of managing sludge thickening and clarification of waste water flotation radial thickener. Investigated influence of the changing parameters of the deposition process on the quality of regulation. A method of recovering the parameters of the model of the object during its normal functioning*

*Key words: radial thickener, an optimal discrete controller, the ID model parameters of the object*

**А. В. Письменский**

Старший преподаватель  
Кафедра „Системная инженерия”

Восточноукраинский национальный университет  
им. В. Даля

Контактный тел.: 050-009-52-84

E-mail: apismenskiy@yandex.ru

## Актуальность исследования

Качество обогащения угля существенно зависит от функционирования водно-шламовой системы обогащательной фабрики, поскольку выход и зольность продуктов обогащения ухудшаются при нестабильном содержании твердой фазы в оборотной воде и плотности пульпы. Наиболее часто для целей сгушения и осветления шламов используют радиальные сгустители. В результате сгушения и осветления шламов получают оборотную воду, используемую в гравитационных процессах обогащения и сгушенный продукт, направляемый на дальнейшую переработку или выводимый за пределы фабрики. Замкнутый цикл, применяемый в углеобогащении, накладывает особые требования к качеству разделения в сгустителе, от которого зависят эффективность операций обогащения и снижение потерь воды фабрики.

## Постановка проблемы

Анализ систем автоматизации процессов сгушения и осветления шламов показал, что существующие системы не обеспечивают заданное качество оборотной воды и сгущенного продукта, так как в слив уносится значительное количество твердой фазы, плотность сгущенного продукта имеет большую дисперсию, увеличивается расход дорогостоящих флокулянтов и потери воды с отходами. Это обусловлено отсутствием системности при автоматизации процессов (учета при дозировании флокулянта, содержания твердой фазы в сливе, уровня осадка и др.), недостаточной точностью используемых моделей, невозможностью адаптации САУ к нестационарным параметрам объекта и возмущений, а также неполной информацией о технологическом процессе, что снижает эффективность управления.

---

### Цель статьи

---

Разработка метода автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации обеспечивающего стабилизацию плотности сгущенного продукта  $P_{сг}$  в заданном диапазоне и поддержания содержания твердой фазы в сливе  $P_{сл}$  не выше допустимого уровня при минимальном расходе флокулянта (для сгустителя отходов флотации). Одним из важных требований, предъявляемых к САУ сгущения, является снижение расхода дорогостоящего флокулянта. Величина удельного расхода флокулянта может в зависимости от плотности исходного питания и конкретных условий на ОФ изменяться в пределах 15-20%. Автоматическая коррекция этого параметра делает процесс более экономичным.

---

### Задачи исследований

---

Моделирование работы регулятора плотности сгущенного продукта. Определение влияния изменения параметров модели объекта на качество регулирования.

---

### Изложение основного материала исследования

---

Поставленные цели достигаются тем, что в разработанном методе автоматического управления дополнительно стабилизируют уровень осадка, расход флокулянта рассчитывают с учетом обратной связи по содержанию твердой фазы в сливе, плотность сгущенного продукта поддерживают благодаря оптимальной дискретной системы управления с адаптацией ее к изменяющимся условиям процесса, введена коррекция заданной плотности сгущенного продукта по содержанию твердой фазы в сливе.

Для реализации поставленных задач разработана САУ, имеющая три канала регулирования: расход сгущенного продукта – плотность сгущенного продукта; расход флокулянта – плотность слива; расход исходного питания сгустителя – уровень сгущенного продукта. Как было установлено [1], основным возмущающим воздействием является изменение плотности исходной пульпы. В большинстве схем (с флокуляцией шламов) данное возмущение компенсируется соответствующим изменением расхода флокулянта. Система управления осуществляет снижение заданной плотности сгущенного продукта в допустимых пределах, так как выпуск менее густых пульп ведет к снижению содержания твердой фазы в сливе. Снижение заданной плотности сгущенного продукта осуществляется пропорционально превышению содержания твердой фазы в сливе. Таким образом, выполняется коррекция плотности сгущенного продукта в зависимости от содержания твердой фазы в сливе.

Стабилизация уровня сгущенного продукта применялась во многих процессах, в некоторых системах управления [4] он являлся главным регулируемым параметром, однако это не обеспечивало требуемого качества сгущения и осветления, ввиду недостаточной корреляции с главными регулируемыми координатами ( $P_{сг}, P_{сл}$ ), однако его можно использовать как вспомогательный к основным управляющим воздействиям.

Исследования, выполненные в работе [5], выявили достаточную корреляционную связь уровня сгущенного продукта с содержанием твердой фазы в сгущенном продукте (коэффициент корреляции 0,32), поэтому поддержание уровня сгущенного осадка на оптимальном значении является корректирующим параметром в трех контурах: плотность сгущенного продукта, плотность слива, момент на валу двигателя ферм.

Необходимость поддержания заданного уровня сгущенного продукта в радиальном сгустителе обусловлено тем, что при его увеличении возрастает опасность перегрузки электродвигателя вследствие значительного увеличения сопротивления движению фермы, а также возрастания уноса в слив твердой фазы и повышения плотности сгущенного продукта, что приводит к зашламовке регулирующего органа. При недостаточной величине осадка понижается плотность сгущенного продукта, снижается производительность сгустителя.

Суть метода объясняется функциональной схемой системы автоматического управления процессами сгущения и осветления шламовых вод в радиальном сгустителе (рис. 1), которая содержит оптимальный дискретный регулятор 1 плотности сгущенного продукта, наблюдатели состояний 2,3, идентификаторы параметров модели 4,5, элементы сравнения 6,7,8,9, исполнительные механизмы (ИМ) 10, 11, регулирующие органы (РО) 12, 13, датчики плотности 14, 15, 16, датчик расхода 17, датчик уровня сгущенного продукта 18, регулятор 19 коррекции заданной плотности сгущенного продукта, регулятор 20 расчета расхода флокулянта, дозатор флокулянта (ДФ) 21, дискретный PID-регулятор 22 уровня сгущенного продукта, объект регулирования 23 (каналы регулирования: расход сгущенного продукта  $Q_{сг}$  – плотность сгущенного продукта  $P_{сг}$ , расход флокулянта  $Q_{ф}$  – плотность слива  $P_{сл}$ , расход исходного питания  $Q_{и}$  – уровень сгущенного продукта  $H_{сг}$ ).

Отличие системы автоматического управления при сгущении шламовых вод перед флотацией заключается в отсутствии участка дозирования флокулянта, т.е. контура компенсации (на рис. 1 показано пунктирной линией).

Метод автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации осуществляется следующим образом. Система управления имеет четыре контура управления: главный, коррекции задания, компенсации, стабилизации. Задача главного контура – управление стабилизацией плотности сгущенного продукта. Контур коррекции задания рассчитывает изменение заданной плотности сгущенного продукта (в допустимом диапазоне) в зависимости от плотности слива. Контур компенсации выполняет расчет необходимого расхода флокулянта в зависимости от нагрузки на сгуститель и содержания твердой фазы в сливе. Контур стабилизации поддерживает оптимальный уровень сгущенного продукта в аппарате. Адаптация систем управления к изменяющимся условиям осаждения осуществляется за счет применения оптимального оценивающего фильтра, методики восстановления нестационарных параметров модели объекта при стохастическом воздействии и пересчете параметров регуляторов.

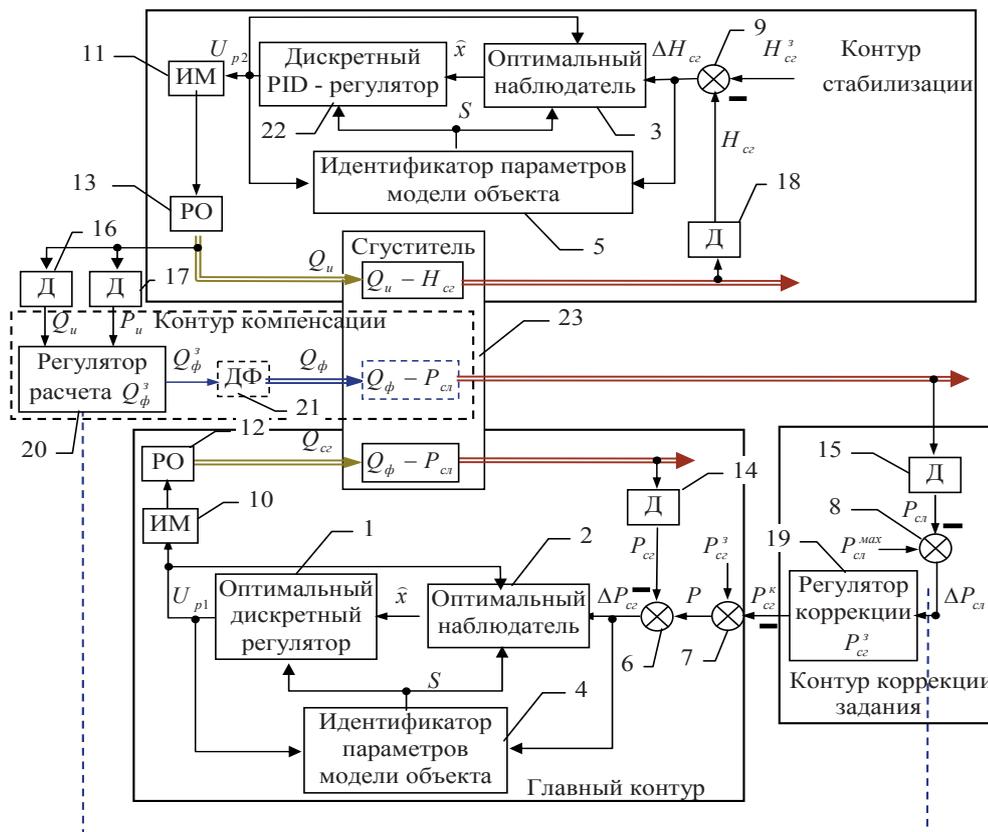


Рис. 1. Функциональная схема САУ процесса сгущения:  $P_{ст}^{зад}$  – задаваемое значение содержания твердой фазы в сгущенном продукте;  $P_{ст}^к$  – корректировочное изменение  $P_{ст}^{зад}$ ;  $P = P_{ст}^{зад} - P_{ст}^к$ ;  $P_{ст}^{max}$  – максимально-допустимое значение содержания твердой фазы в сливе;  $\Delta P_{ст} = P_{ст}^{max} - P_{ст}$ ;  $H_{ст}^{зад}$  – задаваемое значение высоты сгущенного осадка;  $\Delta H_{ст} = H_{ст}^{зад} - H_{ст}$ ;  $Q_{ф}^{зад}$  – задаваемое значение расхода флокулянта;  $U_{p1}, U_{p2}$  – сигнал управления с регуляторов 1 и 22;  $\hat{x}$  – фазовый вектор;  $S$  – вектор параметров модели объекта

В главном контуре сигнал отклонения  $\Delta P_{ст} = P - P_{ст}$  с элемента сравнения 6 посылают на вход наблюдателя состояния 2. Сигнал задания  $P = P_{ст}^3 - P_{ст}^к$  с элемента сравнения 7 может изменяться в допустимом диапазоне в зависимости от содержания твердой фазы в сливе. С наблюдателя состояния 2, восстановленный в условиях шума фазовый вектор  $\hat{x}$ , посылают на оптимальный дискретный регулятор 1, реализующий регулирующие воздействие  $Q_{ст}$  на объект управления 23 через ИМ 10 и РО 12. Сигналы  $\Delta P_{ст}$  и  $U_{p1}$  (сигнал управления с регулятора 1) посылают на идентификатор параметров модели 4, с помощью которого восстанавливают вектор параметров модели объекта  $S$ .

В контуре коррекции регулятором 19 в зависимости от значения  $\Delta P_{ст} = P_{ст}^{max} - P_{ст}$  с элемента сравнения 8 рассчитывают величину коррекции  $P_{ст}^к$ .

В контуре компенсации регулятором 20 в зависимости от значения  $\Delta P_{ст}$  с элемента сравнения 8, расхода  $Q_{ст}$  (сигнал с датчика 16) и содержания твердой фазы  $P_{ст}$  (сигнал с датчика 17) в пульпе на входе рассчитывают необходимое значение расхода флокулянта  $Q_{ф}^3$ , поступающее на ДФ 21.

В контуре стабилизации отклонение  $\Delta H_{ст} = H_{ст}^3 - H_{ст}$  с элемента сравнения 9 и  $U_{p2}$  (сигнал управления с регулятора 22) посылают на наблюдатель состояния 3, откуда восстановленный фазовый вектор посылают на дискретный PID-регулятор

22, сигнал управления регулятора через ИМ 11 и РО 13 поступает на объект управления. Восстановление вектора параметров модели объекта происходит по аналогичной схеме с главным контуром.

Соответственно со схемой реализуют такие алгоритмы управления:

- для регулятора коррекции 19

$$P_{ст}^к = \begin{cases} \Delta P_{ст}^{доп} \cdot K_1, & \Delta P_{ст} < 0; \\ 0, & \Delta P_{ст} \geq 0, \end{cases}$$

где  $\Delta P_{ст}^{доп}$  – допустимое отклонение от заданного содержания твердой фазы в сгущенном продукте;

$K_1 = \frac{P_{ст} - P_{ст}^{max}}{P_{ст}^{мп} - P_{ст}^{max}}$  – коэффициент, который устанавливают экспериментально;

$P_{ст}^{мп}$  – максимально прогнозируемое содержание твердой фазы в сливе;

- для регулятора 20 расчета расхода флокулянта

$$Q_{ф}^3 = Q_{ст} \cdot P_{ст} \cdot q_y,$$

где  $q_y$  – удельный расход флокулянта;

$$q_y = \begin{cases} q_n + \Delta q_n \cdot K_1, & \Delta P_{ст} < 0; \\ q_n, & \Delta P_{ст} \geq 0; \end{cases}$$

$\Delta q_n = q_{мд} - q_n$  – изменение номинального расхода флокулянта;

$q_{мд}$  – максимально допустимое значение удельного расхода флокулянта;

$q_n$  – номинальный удельный расход флокулянта.

Для объекта управления по каналу регулирования  $Q_{ст} - P_{ст}$  описываемого уравнениями:

$$x_1(n+1) = -a_1 \cdot x_1(n) + 1 \cdot u(n) + V_0(n), \tag{1}$$

$$y(n) = b_1 \cdot x_1(n) + V_n(n), \tag{2}$$

где  $a_1 = 0,9363$ ,  $b_1 = 2,0406 \cdot 10^{-3}$  – для сгустителя отфильтрата;

$a_1 = 0,9699$ ,  $b_1 = 1,1059 \cdot 10^{-3}$  – для сгустителя шламовых вод;

$V_0(n), V_n(n)$  – последовательности гауссовских случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченными дисперсиями  $D_0(n)$  и  $D_n(n)$ , представляющие соответственно шумы объекта и наблюдения,

выполнен синтез оптимального дискретного регулятора содержания твердой фазы в сгущенном продукте с учетом шума объекта (содержание твердой фазы в питании) при квадратичном критерии оптимальности [2]. На рис. 2 приведен пример моделирования работы оптимальной дискретной системы стабилизации плотности сгущенного продукта сгустителя отходов флотации, с восстановлением выходной величины при возмущающих воздействиях с помощью фильтра Калмана [3]. При выполнении моделирования были приняты следующие исходные значения параметров: дисперсия шума объекта  $32,01 \text{ (г/л)}^2$ ; период дискретизации  $T_{p01} = 54 \text{ (с)}$ ; весовые коэффициенты квадратичного функционала  $q = 1$  и  $r = 24,2$ ; число итераций при оценке выходной координаты  $n = 10$ ; время моделирования работы системы  $8 \text{ (ч)}$ .

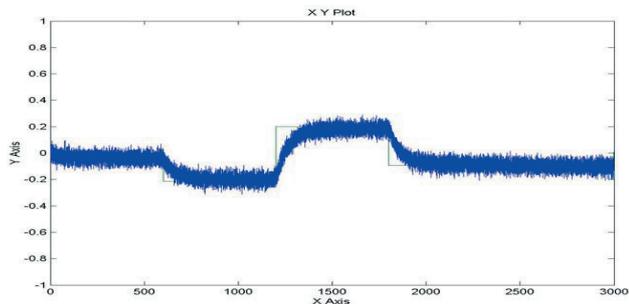
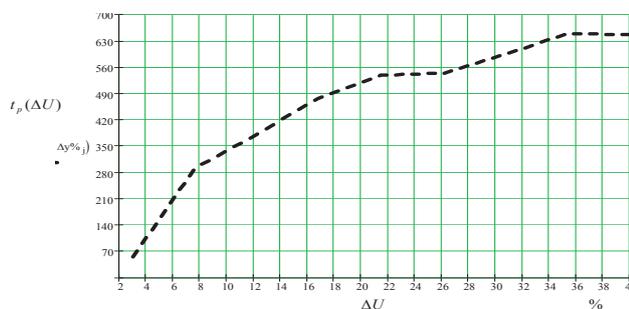
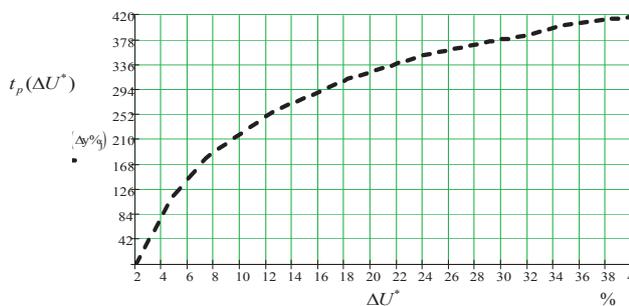


Рис. 2. Моделирование работы дискретной оптимальной системы с оценкой вектора состояния

При моделировании исследовалось влияние начального отклонения, изменения параметров объекта, характеристики шума на время регулирования и дисперсию выходного сигнала (рис. 3-8).

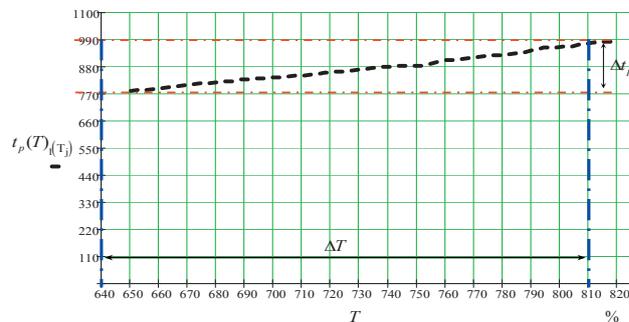


а)

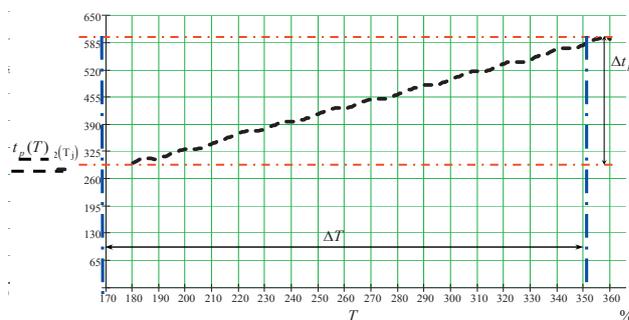


б)

Рис. 3. Зависимость времени регулирования от начального отклонения: а – сгуститель отходов флотации; б – сгуститель шламовых вод;  $\Delta U$  – отклонение в %;  $t_p(\Delta U)$  – время регулирования, с

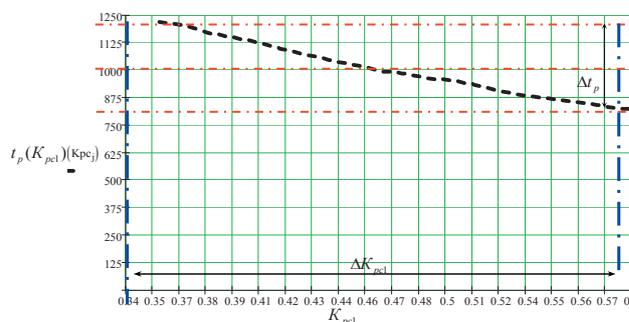


а)

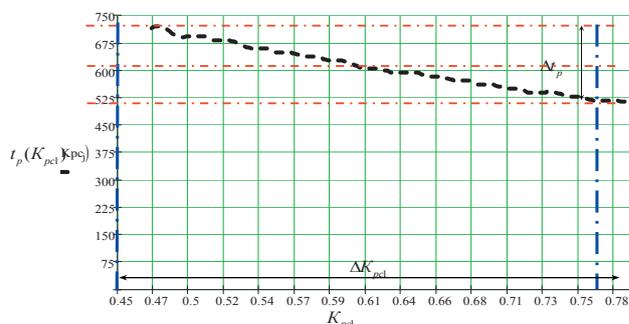


б)

Рис. 4. Зависимость времени регулирования от постоянной времени: а – сгуститель отходов флотации; б – сгуститель шламовых вод;  $t_p(T)$  – время регулирования

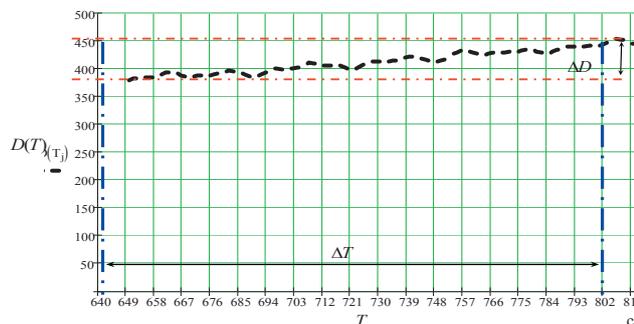


а)

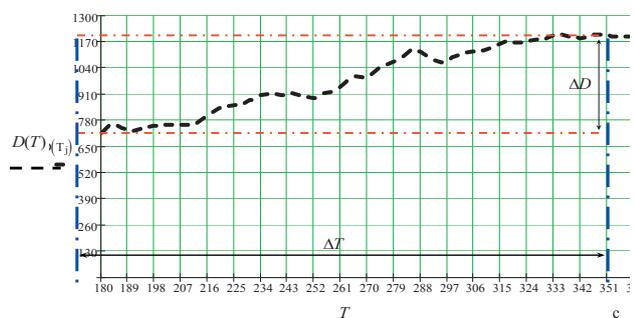


б)

Рис. 5. Зависимость времени регулирования от коэффициента усиления: а – сгуститель отходов флотации; б – сгуститель шламовых вод;  $t_p(K_{pcl})$  – время регулирования

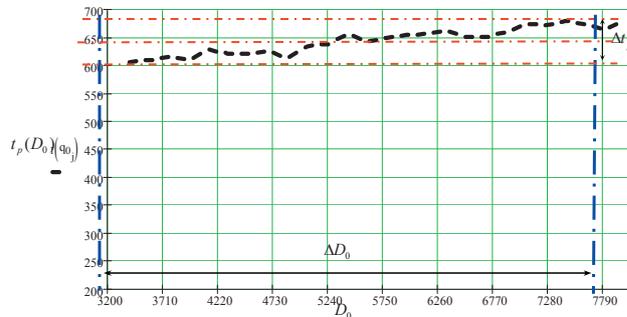


а)

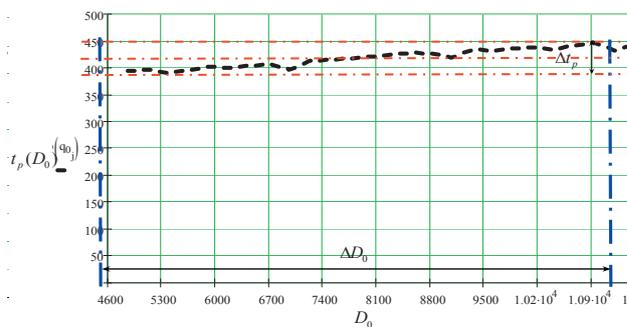


б)

Рис. 6. Зависимость дисперсии отклонения выходного сигнала от постоянной времени: а – сгуститель отходов флотации; б – сгуститель шламовых вод;  $D(T)$  – дисперсия

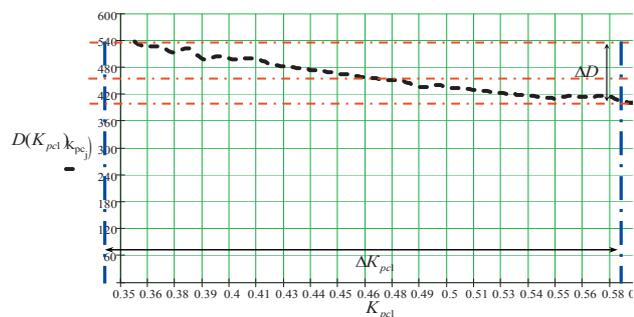


а)

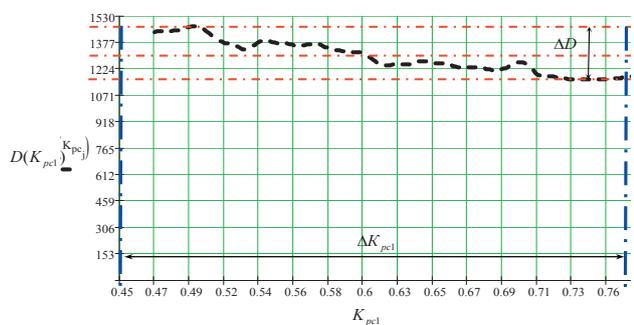


б)

Рис. 8. Зависимость времени регулирования от интенсивности шума объекта: а – сгуститель отходов флотации; б – сгуститель шламовых вод;  $t_p(D_0)$  – время регулирования



а)



б)

Рис. 7. Зависимость дисперсии отклонения выходного сигнала от коэффициента усиления: а – сгуститель отходов флотации; б – сгуститель шламовых вод;  $D(K_{pc1})$  – дисперсия

Характеристика шума объекта  $D_0$  была определена в [1]. Будем считать, что все ошибки наблюдения нормированы (дисперсия равна 1) и некоррелированы, т.е. принимаем  $N_0=1$  [6]. Были приняты следующие входные данные:  $D_0=5,718 \cdot 10^3$  – для сгустителя отходов флотации,  $D_0=8,103 \cdot 10^3$  – для сгустителя шламовых вод,  $N_0=1$ .

Моделированием работы САУ плотностью сгущенного продукта установлено, что обеспечивается устойчивое функционирование во всем диапазоне изменения коэффициента передачи, постоянной времени, начального отклонения и характеристик шума объекта. Установлено, что время регулирования и дисперсия изменяются пропорционально постоянной времени. Так, для сгустителя отходов флотации при изменении постоянной времени на 10% время регулирования изменяется на 8,5%, дисперсия на 7% (для сгустителя шламовых вод соответственно 11% и 8%). При изменении коэффициента усиления объекта (10%) примерно обратно пропорционально изменяется время регулирования (5,6%) и пропорционально дисперсия (5,8%). Соответственно для сгустителя шламовых вод – 4,6% и 8%. Изменение интенсивности шума объекта на 10% приводит к пропорциональному изменению времени регулирования (для сгустителей соответственно на 1,58% и 1,62%).

**Выводы**

Исследование переходных процессов показали, что при изменении параметров объекта регулятор

вследствие недостоверности модели объекта и оценки фазового вектора не обеспечивает требуемого качества, время регулирования больше в среднем на 40%, управляющее воздействие в ряде случаев превышает рассчитанное допустимое значение.

Анализ результатов исследований показал, что вследствие зависимости точности регулирования от изменения характеристик объекта и возмущения, возникает необходимость в текущей идентификации параметров модели в реальном масштабе времени. Для задач идентификации вектора параметров объекта  $\hat{S}$  решето использовать рекуррентный метод наименьших квадратов.

#### Литература

1. Письменский А. В., В.А. Ульшин. Корреляционный анализ возмущающих воздействий и выходных параметров для выбора канала управления радиальным сгустителем // Вестник СХУ им. В.Даля – 2004 – №11. – С. 117-121.

2. Письменский А.В. Синтез оптимального цифрового регулятора радиального сгустителя / А.В. Письменский, В.А. Ульшин // Вестник СХУ им. В.Даля. – 2005 – №3. – С. 146-155.
3. Письменский А.В. Моделирование работы оценивающего фильтра при восстановлении фазового вектора процесса сгущения / А.В. Письменский, В.А. Ульшин // Вестник СХУ им. В.Даля. – 2009 – №12. – С. 98-104.
4. Управление технологическими процессами на зарубежных углеобогащительных фабриках / В.А. Ульшин, Г.И. Бедняк, М.И. Башков, В.В. Бирюк. – М.: ЦНИЭИуголь, 1982. – Выпуск 2 – с. 27-28. (Экспресс-информ: серия «Механизация и автоматизация производственных процессов»).
5. Головков Б.Ю. и др. Системы и средства автоматизации обогатительных фабрик / Б.Ю. Головков – М.: Недра, 1990. – 231с.
6. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зифлинг; [пер. с нем.]. – М.: Наука. глав. Ред. физико-математ. лит., 1982. – 200 с.

*В статті проведена економічна оцінка збитків, що заподіяна річними викидами пилу в забій шахти, також наведено розрахунок економічної ефективності від впровадження принципово нової конструкції пиловловлювача в установці для очистки повітря від вугільного пилу*

*Ключові слова: вугільне виробництво, циклон, пил, оцінка, економічна ефективність*

*В статье проведена экономическая оценка убытков, которые зависят от годового выброса пыли в забой шахты, также приведен расчет экономической эффективности от внедрения принципиально новой конструкции пылеуловителя в установке для очистки воздуха от угольной пыли*

*Ключевые слова: угольное производство, циклон, пыль, экономическая эффективность*

*In the article the economic evaluation of damages caused annual emissions into the mine face, also included the calculation of economic efficiency from the introduction of a new design dedusters to install air cleaning of coal dust*

*Keywords: coal production, cyclone, dust, assessment, economic efficiency*

УДК 621.928.9

## ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЛЯ УСТАНОВОК ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ

**І. В. Проскуріна**

Асистент

Кафедра прикладної гідромеханіки  
Донбаський державний технічний університет  
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, Луганська обл., Україна,  
94204

Контактний тел.: (06442) 2-63-92

E-mail: valera\_proskurin@mail.ru

### 1. Вступ

Економічне значення пиловловлення полягає не тільки у використанні коштовних компонентів пилу

й газових домішок, але і у запобіганню збитку, заподіяваного пилом, що викидається як в повітря робочої зони, так і в атмосферу, і у чималій мірі збереженню здоров'я людей.