

Разработка цифрового двойника участка сатурации воздуха в установке напорной флотации при очистке карьерных сточных вод угольных предприятий

П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, Л.А. Иванова ✉, А.Г. Семенов, Е.С. Михайлова
Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация
✉ lyuda_ivan@mail.ru

Резюме: В статье представлен анализ технологической схемы напорной флотационной установки. Анализ показал, что эффективность напорной флотации определяется степенью насыщения сточных вод воздухом, которая в свою очередь зависит от давления в процессе сатурации. На основе уравнений материального баланса с учетом принятых допущений получена математическая модель исследуемого участка в операторной форме, которая позволила определить связь между основными входными и выходными переменными, выявить управляющие и возмущающие воздействия, а также структурировать связанность регулирования давления и уровня в ёмкости насыщения. С использованием инструментов Simulink среды Matlab на базе разработанной модели был реализован цифровой двойник исследуемого участка и проведены вычислительные эксперименты, в результате которых получены переходные характеристики по основным и перекрестным каналам регулирования. Определены передаточные функции, значения коэффициентов передачи, постоянных времени и времени запаздывания, количественно описывающие влияние положения регулирующих клапанов на давление и уровень в ёмкости насыщения. Установлен статический характер объекта, а также наличие прямой и обратной перекрестных связей между каналами.

Представленные математические зависимости и результаты моделирования являются основой для последующего структурного и параметрического синтеза систем автономного регулирования, включая расчет компенсаторов и настройку ПИД-регуляторов. Полученные данные позволят повысить точность прогнозирования динамики процесса насыщения сточных вод воздухом и могут быть использованы при создании эффективных систем управления напорными флотационными установками в условиях угледобывающих предприятий.

Ключевые слова: карьерные сточные воды, цифровой двойник, моделирование объекта управления, система автоматического управления, напорная флотация, флотационная установка, сатурация воздуха

Благодарности: Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № соглашения 075-15-2022-1201 от 30.09.2022 г.

Для цитирования: Иванов П.П., Пачкин С.Г., Иванова Л.А., Семенов А.Г., Михайлова Е.С. Разработка цифрового двойника участка сатурации воздуха в установке напорной флотации при очистке карьерных сточных вод угольных предприятий. *Горная промышленность*. 2026;(3):130–136. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-130-136>

Creating a digital twin of the air saturation section in a pressure flotation plant used to clean run-off water in coal pit mines

P.P. Ivanov, S.G. Pachkin, L.A. Ivanova ✉, A.G. Semenov, E.S. Mikhailova
Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation
✉ lyuda_ivan@mail.ru

Abstract: This paper analyses a process flow diagram of a pressure flotation plant. The analysis showed that the efficiency of pressure flotation is determined by the air saturation of the run-off water, which in turn depends on the pressure during the saturation process. Based on the material balance equations, and with account of the adopted assumptions, a mathematical model of the examined section was obtained in operator form, which made it possible to determine the relationship between

the main input and output variables, identify control and disturbance effects, as well as to structure the interdependence of the pressure control and the level in the saturation tank. A digital twin of the studied section was created using Simulink tools within the MATLAB environment based on the developed model, and computational experiments were carried out, resulting in determination of the transient characteristics for the main and cross-control channels. The transfer functions, transfer coefficients, response and delay times have been determined, to quantitatively describe the effect of the control valve positions on the pressure and level in the saturation tank. The system has been identified as static, and the presence of direct and inverse interconnections between the channels has been established.

The mathematical relationships and simulation results presented form the basis for the subsequent structural and parametric synthesis of autonomous control systems, including the calculation of compensators and tuning of the PID controllers. The data obtained will improve the accuracy of predicting the dynamics of the air saturation process in the run-off water and can be used in designing efficient control systems for pressure flotation plants in coal mining operations.

Keywords: in-pit run-off water, digital twin, modelling of a control object, automatic control system, pressure flotation, flotation plant, air saturation

Acknowledgments: The research was carried out as part of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No.1144p of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022, with financial support by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation, Agreement No.075-15-2022-1201 as of September 30, 2022.

For citation: Ivanov P.P., Pachkin S.G., Ivanova L.A., Semenov A.G., Mikhailova E.S. Creating a digital twin of the air saturation section in a pressure flotation plant used to clean run-off water in coal pit mines. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):130–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-130-136>

Введение

Современные темпы индустриального развития и урбанизации территорий требуют неуклонного совершенствования природоохранных мероприятий, направленных на минимизацию антропогенной нагрузки на водные объекты, атмосферный воздух и почвенный покров. В связи с этим особую актуальность приобретают задачи проектирования и модернизации систем водоотведения и очистки сточных вод, а также внедрения высокоэффективных методов обезвреживания промышленных выбросов [1; 2].

Перед научным и инженерным сообществом стоит комплексная задача: при одновременном снижении удельных затрат на обработку загрязнённых вод обеспечить степень очистки, соответствующую жёстким нормативам действующего природоохранного законодательства. Решение этой задачи невозможно без углубленного теоретического осмысления и экспериментального изучения процессов очистки, разработки инновационных технологических схем, повышения точности инженерных расчётов, основанных на моделировании протекающих процессов и комплексной автоматизации систем управления.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является флотация – метод разделения гетерогенных систем, основанный на способности диспергированных частиц к избирательному закреплению на границе раздела фаз (жидкость – газ). Данный метод демонстрирует высокую эффективность при удалении как нерастворимых загрязнителей, так и ряда растворённых соединений из промышленных и коммунальных сточных вод [3; 4]. При этом следует отметить, что процесс флотации сопровождается дополнительными положительными эффектами: аэрацией очищаемых сточных вод, что ускоряет ряд окислительных процессов, необходимых для их глубокой очистки; снижением содержания поверхностно-активных веществ, жиров и масел, бактерий и микроорганизмов. Всё это не только улучшает санитарно-гигиенические показа-

тели очищенной воды, но и создает благоприятные условия для последующих этапов очистки [5].

Извлечение тонкодисперсных частиц из жидкости, в которой они находятся в коллоидном или взвешенном состоянии, происходит вследствие их адгезии к пузырькам воздуха, которые могут образовываться непосредственно в объёме жидкости (напорная флотация) или вводиться в неё извне (барботажная флотация). Агрегаты «частица – пузырёк», обладающие низкой эффективной плотностью, всплывают на поверхность, формируя пенный слой с концентрацией загрязнений, значительно превышающей их содержание в исходной воде [6].

В настоящее время широкое распространение для очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий и обогатительных фабрик получили установки, основанные на принципе напорной реагентной флотации, так как именно в них удаётся получить необходимые размер воздушных пузырьков и степень насыщения ими обрабатываемых стоков [7]. Для реализации данного метода широко применяются горизонтальные флотационные установки. В условиях напорной флотации они обеспечивают сепарацию образовавшихся агломератов различной плотности как всплывающих (флотируемых), так и оседающих на дно [8]. Такая конструкция позволяет максимально полно вывести загрязняющие вещества из технологического цикла водооборота или перед сбросом в природный водоём. Для повышения качества очистки также может потребоваться рециркуляция некоторой части уже очищенной воды в приёмную камеру [9]. Однако в данном случае объект управления характеризуется многомерностью и наличием перекрёстных связей между технологическими параметрами. Традиционное применение независимых (автономных) одноконтурных систем регулирования для каждого из этих параметров не позволяет достичь требуемого качества управления [10]. Из-за взаимного влияния каналов в замкнутой системе возникают нежелательные

колебания переходных процессов, что приводит к ухудшению показателей очистки. Это требует разработки новых принципов управления процессом напорной флотации, что невозможно без моделирования, базирующегося на материальном балансе технологического процесса с учётом входных и выходных переменных.

Материалы и методы

С технической точки зрения напорная флотационная установка представляет собой комплекс оборудования, предназначенного для физико-химической очистки сточных вод (рис. 1). Процесс начинается с этапа реагентной обработки сточных вод, на котором в зависимости от характера и степени их загрязнения дозируются реагенты, способствующие агрегации частиц загрязнителя в крупные хлопья [11; 12]. Далее вода насосом (поз. Н2) направляется в сатуратор (поз. 1), в который одновременно производится подача воздуха, сжатого компрессором (поз. Н1). В сатураторе в условиях избыточного давления и плёночного течения воды происходит её насыщение воздухом. Полученная газо-жидкостная эмульсия подаётся в вертикальную ёмкость насыщения (поз. 2), где выдерживается в условиях избыточного давления не менее 10 мин, что способствует растворению воздуха в объёме обрабатываемых сточных вод. Далее насыщенная воздухом вода под избыточным давлением направляется во флотационную камеру (поз. 3), в которой вследствие резкого снижения давления начинается интенсивное образование пузырьков воздуха, всплывающих на поверхность зеркала флотационной камеры. Образующиеся комплексы «частица – пузырек» поднимаются к поверхности зеркала, формируя пенный продукт (флотошлам), который удаляется механическим способом. При этом количество формирующейся пены автоматически регулируется контуром (ZC3), изменяющим расходные характеристики компрессора (поз. Н1).

Отвод очищенной воды производится через камеру (поз. 4), соединённую с флотационной камерой переточным каналом. Уровень воды в этой камере поддержива-

ется автоматически контуром регулирования (LC4) за счёт непрерывного отвода очищенной воды насосом (поз. Н3).

При недостаточной степени очистки предусматривается разбавление исходных сточных вод очищенной водой, подаваемой в насос (поз. Н2) по трубопроводу рециркуляции через клапан Кр3. Доля рециркуляционной воды поддерживается автоматически контуром регулирования (АС5).

Как показало исследование, для создания требуемого количества и размеров образующихся пузырьков необходимо поддерживать постоянное избыточное давление смеси воды и растворенного в ней воздуха, подаваемой во флотационную камеру (поз. 3). Давление смеси поддерживается контуром автоматического регулирования (РС1) с помощью клапана Кр1. При этом полное растворение воздуха (даже после выдерживания требуемого времени) не происходит по ряду факторов, что приводит к его скапливанию в верхней части ёмкости насыщения (поз. 2), поэтому для поддержания уровня жидкости в ёмкости насыщения предусмотрен контур автоматического регулирования (LC2), отводящий воздух через клапан Кр2. Однако положение клапана Кр2 оказывает непосредственное влияние на величину давления в ёмкости насыщения (поз. 2), а положение клапана Кр1 аналогично влияет и на уровень воды, тем самым формируя взаимосвязь регулируемых переменных через технологический объект.

Для выявления зависимостей выходных переменных от входных была проведена структурная идентификация участка сатурации воздуха в потоке сточных вод (рис. 2): основными управляющими воздействиями являются положения клапанов $U_{кр1}$ и $U_{кр2}$, перекрестно влияющих на обе регулируемые переменные.

РС точки зрения построения системы автоматического регулирования процесс насыщения сточных вод воздухом для последующей очистки в напорном флотаторе рассматривается как взаимосвязанная динамическая система, включающая в себя две основные подсистемы: сатуратор и ёмкость насыщения. Математическое описание процессов, протекающих в данном объекте, базируется на систе-

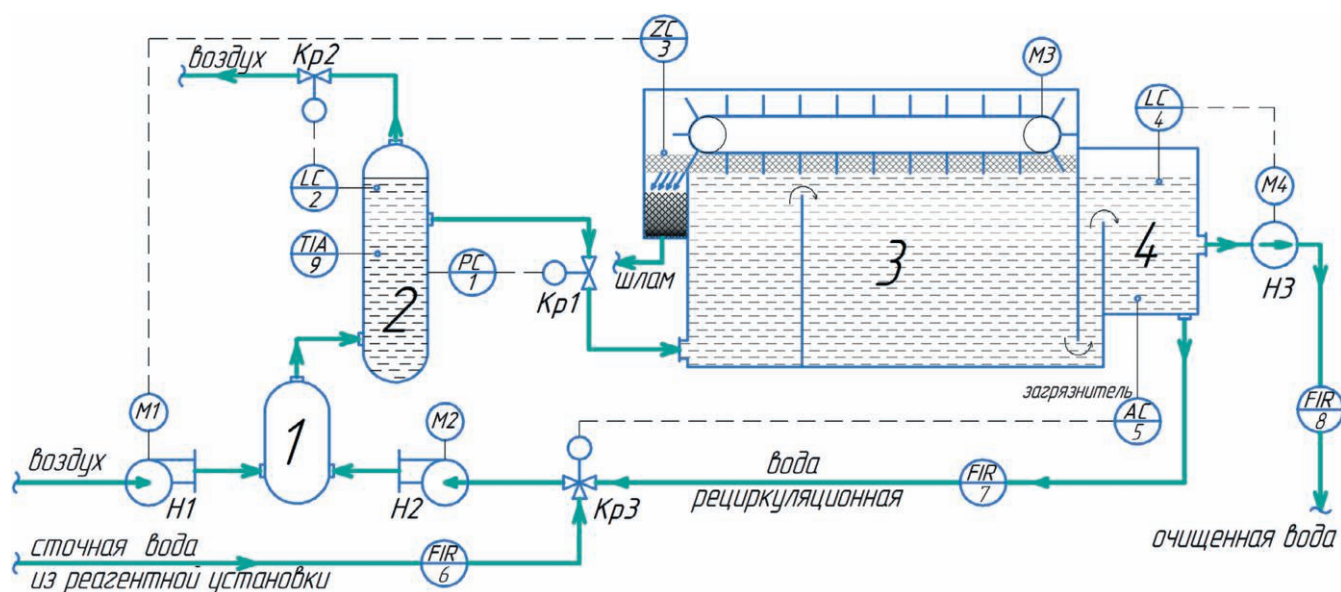


Рис. 1
Технологическая схема автоматизированной напорной флотационной установки

Fig. 1
A process flow diagram of an automated pressure flotation plant

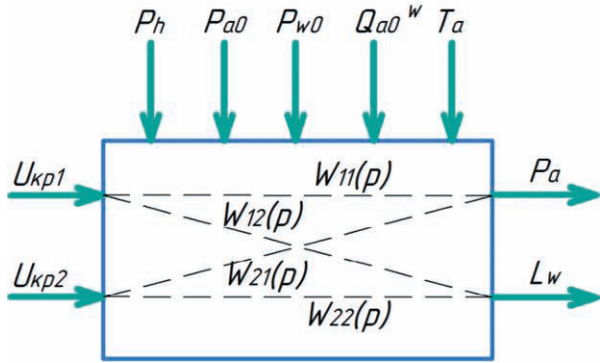


Рис. 2
Информационная структурная схема участка сатурации воздуха: P_a – давление в ёмкости насыщения (поз. 2); L_w – уровень воды в ёмкости насыщения (поз. 2); P_{w0} – давление воды, создаваемое насосом Н2; P_{a0} – давление воздуха, создаваемое компрессором (поз. Н1); P_h – давление смеси перед флотатором (поз. 3); T_a – температура газообразного воздуха, находящегося в ёмкости насыщения

Fig. 2
A block diagram of the air saturation section: P_a – pressure in the saturation tank (item 2); L_w – air level in the saturation tank (item 2); P_{w0} – water pressure generated by H2 pump; P_{a0} – air pressure generated by the compressor (item H1); P_h – mixture pressure upstream of the flotation cell (item 3); T_a – temperature of the gaseous air in the saturation tank

ме уравнений, формирующих материальный баланс установки [13]. При разработке модели объекта, необходимой для синтеза регуляторов и анализа управляемости, были приняты следующие допущения и упрощения, позволяющие линеаризовать и структурировать объект:

1. Ёмкость высокого давления рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами. Это допущение справедливо для рабочей зоны, что позволяет не учитывать распределение концентрации по высоте или длине аппарата.
2. Газовые пузырьки распределены по рабочему объёму всех элементов установки равномерно, что позволяет использовать осреднённые параметры газонасыщения.
3. Воздух, подаваемый в сатуратор, распределяется по свободному объёму мгновенно, без переходных процессов смещения, что важно для моделирования контура регулирования давления.
4. Вода принимается абсолютно несжимаемой средой, что исключает из рассмотрения волновые процессы и позволяет сосредоточиться на материальном балансе по потокам.
5. Участок насыщения считается абсолютно герметичным, следовательно, утечки воздуха отсутствуют. Это позволяет точно рассчитывать расход газа через дросселирующие устройства на выходе.
6. Воздух рассматривается как двухкомпонентная смесь (кислород и азот), что является достаточным для моделирования процессов массопереноса газов в жидкость, пренебрегая влиянием инертных микропримесей.

В операторной форме система уравнений, описывающая протекание процесса насыщения сточных вод воздухом как объекта управления, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} P_a(p) &= \frac{m_a(p) \cdot R \cdot T_a}{\mu_a \cdot \left(V_{рез} - \frac{M_w(p)}{\rho_{возд}} \right) \cdot (T_0 \cdot p + 1)}; & (1) \\ M_w(p) &= \frac{Q_w^{ex}(p) - Q_w^{in}(p)}{p}; & (2) \\ Q_w^{ex}(p) &= K_3 \cdot \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{возд}} \cdot (P_{w0}(p) - P_a(p)) \cdot e^{-\tau_3 \cdot p}; & (3) \\ Q_w^{in}(p) &= \frac{U_{кр1} \cdot K_1}{100} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{смеси}} \cdot (P_a(p) - P_h(p)) \cdot e^{-\tau_1 \cdot p}; & (4) \\ P_h(p) &= \rho_{возд} \cdot g \cdot h(p); & (5) \\ m_a(p) &= \frac{Q_{a0}^{ex}(p) + Q_{a0}^w(p) - Q_a^{ex}(p) - m_a^{раств}(p) - Q_w^{ex}(p) \cdot c(p)}{p}; & (6) \\ Q_a^{ex}(p) &= \frac{U_{кр2} \cdot K_2}{100} \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{возд}} \cdot (P_a(p) - P_{атм}) \cdot \frac{e^{-\tau_2 \cdot p}}{T_2 \cdot p + 1}; & (7) \\ Q_{a0}^{ex}(p) &= P_{a0}(p) \cdot K \cdot \rho_{возд} \cdot (P_{a0}(p)) \cdot e^{-\tau_4 \cdot p}; & (8) \\ c(p) &= \frac{K_H \cdot P_a(p)}{T_4 \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_4 \cdot p}; & (9) \\ m_a^{раств}(p) &= c(p) \cdot M_w(p); & (10) \\ L_w(p) &= \frac{M_w(p)}{S \cdot \rho_{возд}}; & (11) \end{aligned} \right.$$

где p – оператор Лапласа; $V_a(p)$, $m_a(p)$, μ_a – объём, масса и молярная масса газообразного воздуха, находящегося сверху ёмкости насыщения; $Q_w^{ex}(p)$ – массовый расход воды, поступающей в ёмкость насыщения (поз. 2) из сатуратора (поз. 1); $Q_w^{in}(p)$ – массовый расход воды и растворённого в ней воздуха, выходящего из ёмкости насыщения (поз. 2) через клапан Кр1; $M_w(p)$ – масса воды, находящейся в ёмкости насыщения (поз. 2); $P_h(p)$ – давление смеси воды и растворённого в ней воздуха в трубопроводе перед флотатором (поз. 3); $Q_a^{ex}(p)$ – массовый расход воздуха, подаваемого компрессором (поз. Н1) в сатуратор (поз. 1); $Q_{a0}^{ex}(p)$ – массовый расход воздуха, выходящего из ёмкости насыщения (поз. 2) через клапан Кр2; $Q_{a0}^w(p)$ – массовый расход воздуха в воде, поступающей через насос (поз. Н2); $m_a^{раств}(p)$ – масса воздуха, растворённого в воде, находящегося в ёмкости насыщения (поз. 2); $c(p)$ – концентрация воздуха, растворённого в воде; K_H – коэффициент Генри; $\rho_{возд}$ ($P_a(p)$) – плотность сжатого воздуха; R – универсальная газовая постоянная; $V_{рез}$ – внутренний объём ёмкости насыщения (поз. 2); $\rho_{возд}$ – плотность воды; S – площадь поперечного сечения ёмкости насыщения (поз. 2); D_1, D_2, D_3 – диаметры трубопроводов; $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ – время запаздывания, определяемое продолжительностью перемещения материального потока по соответствующему потоку; T_0, T_2, T_4 – постоянные времени связанные с инертностью сжатия воздуха.

Результаты и обсуждение

На основе представленных уравнений разработана структурная схема модели участка сатурации (рис. 3), являющегося частью установки напорной флотации сточных вод угледобывающих предприятий. На схеме детализирована полученная математическая модель объекта управления, отражены функциональные преобразования сигналов, а также показаны точки входа управляющих и возмущающих воздействий. Пунктирной линией показана обратная связь по влиянию давления в ёмкости насыщения на изменение материального баланса.

Моделирование системы выполнено с применением инструментов приложения Simulink среды Matlab. Разра-

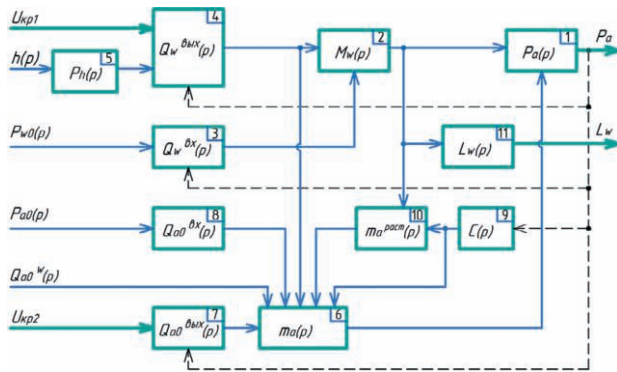


Рис. 3 Структурная схема модели участка сатурации воздуха

Fig. 3 A block diagram of the air saturation section model

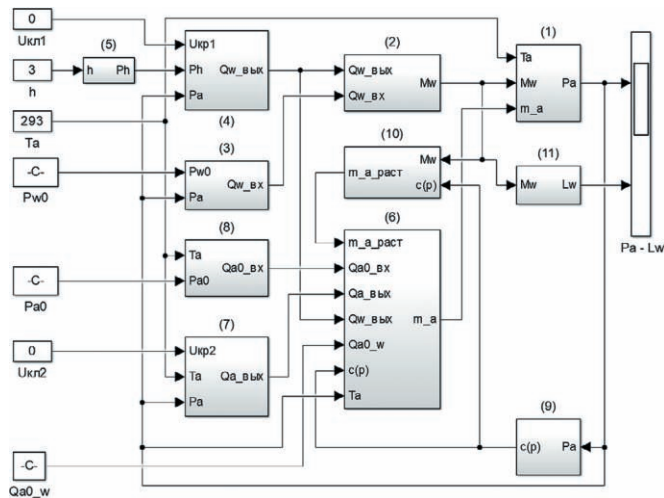


Рис. 4 Реализация модели участка сатурации воздуха в среде Simulink

Fig. 4 Modelling of the air saturation zone in the Simulink environment

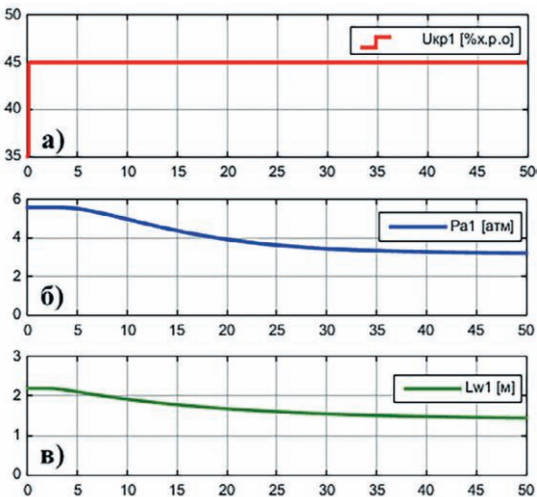


Рис. 5 Реакция на ступенчатое изменение положения клапана Kp1: а – входное воздействие; б – переходный процесс по каналу $U_{кр1}$ – давление в ёмкости насыщения P_a ; в – переходный процесс по каналу $U_{кр1}$ – уровень в ёмкости насыщения L_w

Fig. 5 Response to a step change in the Kp1 valve position: а – input action; б – transient process in the $U_{кр1}$ channel – pressure in the saturation tank (P_a); в – transient process via the $U_{кр1}$ channel – level in the saturation tank (L_w)

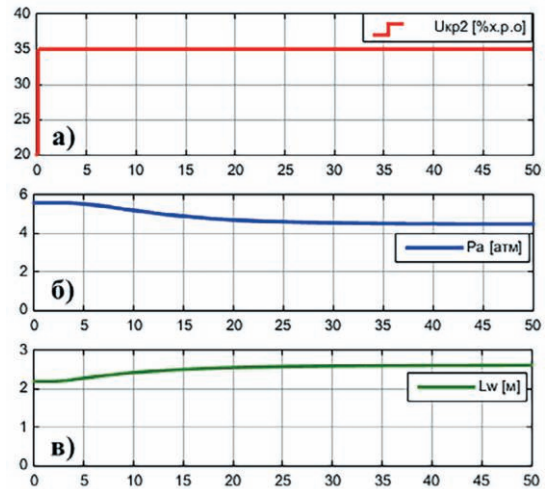


Рис. 6 Реакция на ступенчатое изменение положения клапана Kp2: а – входное воздействие; б – переходный процесс по каналу $U_{кр2}$ – давление в емкости насыщения P_a ; в – переходный процесс по каналу $U_{кр2}$ – уровень в емкости насыщения L_w

Fig. 6 Response to a step change in the Kp2 valve position: а – input action; б – transient process in the $U_{кр2}$ channel – pressure in the saturation tank (P_a); в – transient process via the $U_{кр2}$ channel – level in the saturation tank (L_w)

ботанный на базе полученной математической модели цифровой двойник участка сатурации (рис. 4) позволил получить описание переходного состояния регулируемых переменных (давление и уровень в ёмкости насыщения). Графики, полученные при моделировании переходных процессов по основным каналам регулирования и перекрёстным связям, представлены на рис. 5 и 6.

На рис. 5 показана реакция контролируемых переменных модели участка сатурации на входной управляющий сигнал ступенчатого изменения положения клапана Kp1 с 35 до 45% хода регулирующего органа (% х.р.о.). На рис. 6 аналогичным образом показана реакция на изменение положения клапана Kp2 с 20 до 35% х.р.о.

Полученные переходные характеристики показывают, что объект автоматизации является статическим. Также фиксируется прямая перекрёстная связь между положением клапана Kp1 и второй регулируемой переменной L_w (уровнем в ёмкости насыщения), а между положением клапана Kp2 и первой регулируемой переменной P_a (давлением в ёмкости насыщения) эта перекрёстная связь является обратной.

По полученным переходным характеристикам также можно оценить значения коэффициентов передаточных функций по основным и перекрёстным каналам исследуемого объекта, которые представлены в табл. 1.

Закключение

Вычислительный эксперимент на базе разработанного цифрового двойника участка сатурации воздуха в установке напорной флотации при очистке сточных вод позволил определить передаточные функции, связывающие положение регулирующих клапанов с основными параметрами процесса сатурации. С их помощью можно оценить динамические характеристики, необходимые для расчёта компенсаторов и регуляторов, используемых при синтезе системы автономного регулирования объекта с перекрёст-

Таблица 1
Передаточные функции по основным и перекрестным каналам

Table 1
Transfer functions for the main and cross-channels

Наименование	Вид	Параметр	
		обозначение, размерность	значение
Передаточная функция объекта по каналу $U_{кр1}$ – давление в ёмкости насыщения P_{σ}	$W_{11}(p) = \frac{K_{11} \cdot e^{-\tau_{11}p}}{(T_{3_{11}} \cdot p + 1) \cdot (T_{4_{11}} \cdot p + 1)}$	Коэффициент передачи K_{11} [атм/%х.р.о.]	-0,24
		Время запаздывания τ_{11} [мин]	3
		Постоянная времени $T_{3_{11}}$ [мин]	7
		Постоянная времени $T_{4_{11}}$ [мин]	7
Передаточная функция объекта по каналу $U_{кр1}$ – уровень в ёмкости насыщения L_w	$W_{12}(p) = \frac{K_{12} \cdot e^{-\tau_{12}p}}{T_{12} \cdot p + 1}$	Коэффициент передачи K_{12} [м/%х.р.о.]	-0,08
		Время запаздывания τ_{12} [мин]	2
		Постоянная времени T_{12} [мин]	17
Передаточная функция объекта по каналу $U_{кр2}$ – давление в ёмкости насыщения P_{σ}	$W_{21}(p) = \frac{K_{21} \cdot e^{-\tau_{21}p}}{(T_{3_{21}} \cdot p + 1) \cdot (T_{4_{21}} \cdot p + 1)}$	Коэффициент передачи K_{21} [атм/%х.р.о.]	-0,11
		Время запаздывания τ_{21} [мин]	3
		Постоянная времени $T_{3_{21}}$ [мин]	5
		Постоянная времени $T_{4_{21}}$ [мин]	6
Передаточная функция объекта по каналу $U_{кр2}$ – уровень в ёмкости насыщения L_w	$W_{22}(p) = \frac{K_{22} \cdot e^{-\tau_{22}p}}{T_{22} \cdot p + 1}$	Коэффициент передачи K_{21} [м/%х.р.о.]	0,042
		Время запаздывания τ_{22} [мин]	2
		Постоянная времени T_{22} [мин]	10

ными связями, с заранее установленными показателями качества работы, включая структурный и параметрический синтез классических или модифицированных ПИД-регуляторов.

В свою очередь, точная фиксация показателей качества регулирования позволит точнее просчитать влияние работы данного участка системы на общий результат работы

установки очистки сточных вод методом флотации, так как в качестве возмущений учитываются управляющие воздействия остальных контуров регулирования, таких как концентрация загрязняющих веществ в очищенной воде, уровень и высота пены во флотаторе.

Список литературы / References

- Усин В.В., Кумпаненко И.В., Павлов А.В., Пашинин В.А., Раевская Е.Г., Скрыльников А.М., Дюбанов М.В. Организация технологии очистки промышленных сточных вод и разработка автоматизированного комплекса для ее реализации. *Российский химический журнал*. 2013;57(1):42–51.
Usin V.V., Kumpanenko I.V., Pavlov A.V., Pashinin V.A., Raevskaya E.G., Skryl'nikov A.M., Dyubanov M.V. Organization of industrial wastewater treatment technology and development of an automated complex for its implementation. *Rossiiskiy Khimicheskij Zhurnal*. 2013;57(1):42–51. (In Russ.)
- Jovanović I., Miljanović I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – A review. *Minerals Engineering*. 2015;70:228–249. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.022>
- Золотов А.В., Лисовский В.А., Багреева И.С., Слепова Е.В., Ефременко Р.А. Флотация и её применение для очистки сточных вод. *Science Time*. 2016;(12):266–274.
Zolotov A.V., Lisovskii V.A., Bagreeva I.S., Slepova E.V., Efremenko R.A. Flotation and its application for wastewater treatment. *Science Time*. 2016;(12):266–274. (In Russ.)
- Szmigiel A., Apel D.B., Skrzypkowski K., Wojtecki L., Pu Y. Advancements in machine learning for optimal performance in flotation processes: A review. *Minerals*. 2024;14(4):331. <https://doi.org/10.3390/min14040331>
- Иванова Л.А., Просеков А.Ю., Иванов П.П., Михайлова Е.С., Тимощук И.В., Горелкина А.К. Оценка эффективности очистки сточных вод угольных предприятий от взвешенных веществ различными фильтрующими материалами. *Горные науки и технологии*. 2024;9(3):263–270. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227>
Ivanova L.A., Prosekov A.Yu., Ivanov P.P., Mikhaylova E.S., Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K. Assessment of the efficiency of wastewater treatment from coal enterprises for suspended solids using various filtering materials. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):263–270. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-227>
- Кондратьев С.А., Мошкин Н.П. Поведение флотационного комплекса «минеральная частица – пузырек» в слабвязкой жидкости в процессе флотации. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(1):143–154. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240115>
Kondrat'ev S.A., Moshkin N.P. The particle-bubble behavior in flotation in low-viscous liquid. *Journal of Mining Science*. 2024;60(1):133–143. <https://doi.org/10.1134/S1062739124010150>

7. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А., Иванов М.В., Петрова Е.В., Виноградов М.С., Балина А.А. Флотокомбайны – флотационная техника будущего для очистки сточных вод. *Экология и промышленность России*. 2013;(12):4–8. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-12-4-8>
Ksenofontov B.S., Kozodayev A.S., Taranov R.A., Ivanov M.V., Petrova E.V., Vinogradov M.S., Balina A.A. Flotation combined machines – future flotation technology for sewage treatment. *Ecology and Industry of Russia*. 2013;(12):4–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-12-4-8>
8. Грачев В.В., Мышляев Л.П., Шипунов М.В., Циряпкина А.В. Проектирование автоматизированной системы управления технологическим процессом флотации на ПАО «ЦОФ «Березовская». *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2019;(5):291–294.
Grachev V.V., Myshlyaev L.P., Shipunov M.V., Tsiryapkina A.V. Designing an automated control system for the flotation process at the Berезовская Central Ore Processing Plant. *Naukoemkie Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineral'nykh Resursov*. 2019;(5):291–294. (In Russ.)
9. Пачкин С.Г., Иванов П.П., Иванова Л.А., Михайлова Е.С., Семенов А.Г. Автоматизация процесса непрерывной флотационной очистки карьерных сточных вод. *Уголь*. 2025;(7):87–91. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-7-87-91>
Pachkin S.G., Ivanov P.P., Ivanova L.A., Mikhaylova E.S., Semenov A.G. Automation of the continuous flotation treatment process for open-pit drain water. *Ugol'*. 2025;(7):87–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-7-87-91>
10. Kämpjärvi P., Jämsä-Jounela S.-L. Level control strategies for flotation cells. *Minerals Engineering*. 2003;16(11):1061–1068. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.06.004>
11. Лобанов Ф.И., Коробов А.С., Минибаев В.В. Опыт применения флокулянтов «Праестол» для очистки сточных вод и обезвоживания шлама при строительстве скважин и переработке нефти. *Безопасность труда в промышленности*. 2009;(3):43–45.
Lobanov F.I., Korobov A.S., Minibaev V.V. Experience of using Praestol flocculants for wastewater treatment and sludge dewatering in well construction and oil processing. *Occupational Safety in Industry*. 2009;(3):43–45. (In Russ.)
12. Вилавский Е.И., Масакбаева С.Р., Баймухамбетова М.Г. Интенсификация процессов флотационной очистки промышленных сточных вод от нефтепродуктов. *Universum: технические науки*. 2016;(11):8–14.
Vilavskiy E.I., Masakbaeva S.P., Baymukhambetova M.G. Intensification of the process of flotation treatment of industrial wastewater from oil products. *Universum: Tekhnicheskie Nauki*. 2016;(11):8–14. (In Russ.)
13. Quintanilla P., Neethling S.J., Navia D., Brito-Parada P.R. A dynamic flotation model for predictive control incorporating froth physics. Part I: Model development. *Minerals Engineering*. 2021;173:107192. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107192>

Информация об авторах

Иванов Павел Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8086-3273>; e-mail: ipp7@yandex.ru

Пачкин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9530-3829>; e-mail: sergon777@inbox.ru

Иванова Людмила Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4103-8780>; e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Семенов Андрей Германович – доктор технических наук, профессор кафедры теории и методики преподавания естественнонаучных и математических дисциплин, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3136-3942>; e-mail: agsem55@yandex.ru

Михайлова Екатерина Сергеевна – кандидат химических наук, директор Института нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий, доцент кафедры техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Information about the authors

Pavel P. Ivanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8086-3273>; e-mail: ipp7@yandex.ru

Sergei G. Pachkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9530-3829>; e-mail: sergon777@inbox.ru

Ludmila A. Ivanova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4103-8780>; e-mail: lyuda_ivan@mail.ru

Andrey G. Semenov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of General Mathematics and Computer Science, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3136-3942>; e-mail: agsem55@yandex.ru

Ekaterina S. Mikhailova – Cand. Sci. (Chem.), Director, Institute of Nano-, Bio-, Information, Cognitive and Socio-Humanitarian Technologies, Associate Professor, Department of Technosphere Safety, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: e_s_mihaylova@mail.ru

Article info

Received: 15.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 30.03.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 30.03.2026