



Научная статья

УДК 669.712:681.51

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-554-565>

Виртуализация трубчатого выщелачивателя при производстве глинозема

Андрей Алексеевич Тимофеев^{1✉}, Галина Борисовна Даныкина²,
Татьяна Валериевна Пискажова³, Людмила Петровна Колмакова⁴

¹⁻⁴ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

¹ aktum600@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8703-7989>

² danykinagb-sfu@mail.ru

³ piskazhova@yandex.ru

⁴ kolmakoval2010@mail.ru

Резюме. Цель – разработка цифрового двойника трубчатого выщелачивателя с программой автоматического расчета качества алюминатного раствора на основе материального баланса для улучшения качества управления процессами гидрохимии на глиноземном комбинате АО «РУСАЛ Ачинск». Визуализация мнемосхемы процесса выщелачивания нефелинового спека выполнена с помощью программного комплекса Wonderware InTouch. Созданы Quick-сценарии для отображения анимации процесса. В качестве входных параметров были приняты температура раствора, расходы спека и оборотного раствора, химический состав сырья. В качестве основных возмущающих воздействий использовали температуру воздуха, вибрации и неисправность оборудования. Выходными параметрами приняты: выходы шлама и алюминатного раствора, потребляемая приводом мощность и кремниевый модуль получаемого раствора. С помощью производственных лабораторных данных сведен материальный баланс спека и оборотного раствора, на его основе разработаны алгоритм моделирования изменений в процессе выщелачивания и программа расчета качества алюминатного раствора с помощью встроенных в InTouch возможностей создания скриптов на собственном языке программирования. Разработан виртуальный двойник трубчатого выщелачивателя на основе действующего аппарата, используемого в АО «РУСАЛ Ачинск». Показано, что программа на основе простой балансовой модели предсказывает качество выходного продукта (алюминатного раствора) при изменении состава сырья (спека и оборотного раствора) и изменении скорости подачи в аппарат сырьевых материалов и отображает результаты расчетов с помощью мнемосхемы процесса. Таким образом, разработанный интерфейс позволяет имитировать различные технологические операции, производимые в трубчатом выщелачивателе: слив раствора, сброс шлама, изменение входных потоков; при этом возможно наблюдать как текущие изменения параметров процесса, так и архивные графики, а также подбирать оптимальный состав сырья для получения алюминатного раствора лучшего качества.

Ключевые слова: трубчатый выщелачиватель, алюминатный раствор, глинозем, виртуальный двойник, материальный баланс, спек

Для цитирования: Тимофеев А. А., Даныкина Г. Б., Пискажова Т. В., Колмакова Л. П. Виртуализация трубчатого выщелачивателя при производстве глинозема // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 554–565. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-554-565>.

METALLURGY

Original article

Virtualization of a tube digester in alumina production

Andrey A. Timofeev^{1✉}, Galina B. Danykina²,
Tatiana V. Piskazhova³, Lyudmila P. Kolmakova⁴

¹⁻⁴ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ aktum600@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8703-7989>

² danykinagb-sfu@mail.ru

© Тимофеев А. А., Даныкина Г. Б., Пискажова Т. В., Колмакова Л. П., 2022

³ piskazhova@yandex.ru

⁴ kolmakoval2010@mail.ru

Abstract. In this work, we develop a digital twin of a tube digester and a software application automatically calculating the aluminate solution quality based on mass balance equations with the purpose of improving the quality of hydrochemical process management at the Rusal Achinsk JSC alumina plant. A mimic diagram of the nepheline sinter leaching process was visualized using the Wonderware InTouch software package. Quick scripts were created to display the process animation. The input parameters include the solution temperature, the consumption of sinter and recycled solution, as well as the chemical composition of raw materials. The air temperature, vibrations and equipment malfunction were used as the main disturbing effects. Output parameters consisted of sludge and aluminate solution yields, power consumed by the drive and the silicon ratio of the resulting solution. Based on the mass balance of sinter and recycled solution, calculated using industrial laboratory data, an algorithm for modelling variations in the digestion process and a software application for calculating the quality of aluminate solution were developed using the InTouch built-in capabilities of scripting in its own programming language. A digital twin of a tube digester was developed on the basis of an operating unit utilized at the Rusal Achinsk JSC. It was shown that the developed software application predicts the quality of the finished product (aluminate solution) using a simple balance model under variations in both the composition of raw materials (cake and recycling solution) and the rate of fed raw materials, as well as present the results of calculations performed using a mimic diagram of the process. Thus, the developed interface can be used to simulate various technological operations performed in a tube digester, including solution drainage, sludge discharge and variations in the inlet flows. At the same time, it becomes possible both to observe current changes in process parameters and archive plots, as well as to select the optimal composition of raw materials to obtain an aluminate solution of higher quality.

Keywords: tube digester, aluminate solution, alumina, virtual twin, material balance, sinter

For citation: Timofeev A. A., Danykina G. B., Piskazhova T. V., Kolmakova L. P. Virtualization of a tube digester in alumina production. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):554-565. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-554-565>.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения глинозема в России используется нефелиновая руда, добываемая на Кия-Шалтырском месторождении Кемеровской области.

Технологическая цепочка является достаточно сложной и разветвленной. Наиболее распространенными считаются основные операции до поступления в цех гидрохимии: перемалывание руды с добавлением известняка и водных растворов, затем спекание полученного продукта во вращающихся высокотемпературных печах. Далее измельчен-

ный спек отправляется в цех гидрохимии, где первой операцией является выщелачивание.

Как известно, целью выщелачивания является перевод в раствор целевого компонента (глинозема в виде алюмината натрия). Выщелачивание нефелинового спека на комбинате осуществляется по проточному и агитационному типам. Одна из стадий проточного выщелачивания проводится в трубчатом выщелачивателе⁵ [1, 2] (рис. 1).

Со стороны загрузочной части в трубчатый выщелачиватель подается измельченный спек за первый виток спирали в нижнем конце

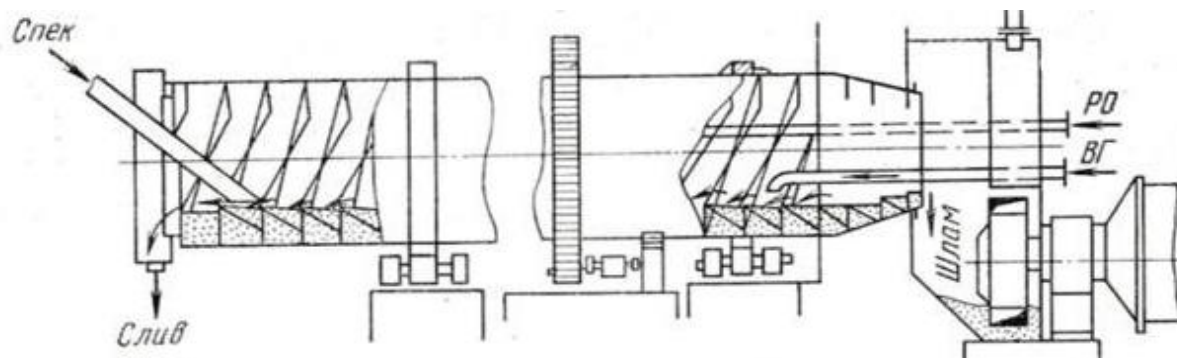


Рис. 1. Трубчатый выщелачиватель
Fig. 1. Tube digester

⁵ Лайнер А. И., Еремин Н. И., Лайнер Ю. А., Певзнер И. З. Производство глинозема: учеб. пособ. М.: Изд-во «Металлургия», 1978. 344 с.

аппарата, и за счет вращения спек перемещается в верхний разгрузочный конец аппарата.

Со стороны разгрузочной части в аппарат подается оборотный раствор (смесь содового раствора и промывы, слива головных сгустителей основной нитки промывки шлама), который за счет наклона аппарата движется навстречу спеку, обогащается растворенными алюминатами натрия, калия и сливается из аппарата. Для улучшения контакта раствора и спека в спиралях вырезаны отверстия [3].

Выходным продуктом аппарата является крепкий алюминатный раствор, заданная концентрация оксида алюминия в алюминатном растворе поддерживается изменением расхода оборотного раствора в сам аппарат. Качество работы аппарата определяется кремниевым модулем (параметр, численно равный отношению $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), который в алюминатном растворе поддерживается трансформацией расхода содового раствора и составом входного сырья.

Нашей задачей является предсказание качества выходного продукта при изменении состава сырья и регулировке скорости подачи в аппарат спека оборотной воды. Для этого авторами статьи разработана и реализована в виде мнемосхемы простая балансовая модель трубчатого выщелачивателя.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАТЕЛЯ

Цифровые двойники – технология, создаваемая с целью упростить и усовершенствовать работу физических прототипов изделий или производственного оборудования, целых систем и отдельных процессов [4–6].

Это компьютерная программа, которая содержит как архив и текущие значения технологических параметров, данные о конструкции аппарата, так и математические модели процессов, протекающих в аппарате. Программа создается специально для определенных целей компании-производителя, например, предсказать технические сбои, снизить затраты на обслуживание, предотвратить незапланированные отключения [7]. Виртуальный двойник – это часть цифрового двойника, а именно – математическая модель и интерфейс для воспроизведения результатов расчетов и ввода заданий пользователя.

В металлургии уже имеется опыт создания и использования виртуальных двойников аппаратов [8–11], в том числе в управляющих системах, но при получении глинозема таких работ нами не найдено.

Анализ процессов, протекающих в выщелачивателе (рис. 2), позволяет рассмотреть аппарат как объект управления (рис. 1) и выделить основные входные и возмущающие воздействия, выходные параметры (табл. 1).



Рис. 2. Трубчатый выщелачиватель как объект управления
Fig. 2. Tube digester as a control object

Таблица 1. Анализ параметров в трубчатом выщелачивателе
 Table 1. Parameter analysis in the tube digester

Показатели	Обозначение	Нормативные параметры	Единицы измерения
Входные параметры			
Расход спека в аппарат	$q_{\text{спека}}$	0–160	т/ч
Расход оборотного раствора	$q_{\text{ро}}$	0–400	м ³ /ч
Температура раствора	$t_{\text{ро}}$	0–150	°С
Химический состав спека	$h_{\text{спека}}$	–	–
Химический состав оборотного раствора	$h_{\text{р-ра}}$	–	–
Возмущающие воздействия			
Температура воздуха	$t_{\text{возд}}$	18-25	°С
Вибрации	s	–	м
Неисправность оборудования	–	–	–
Выходные параметры			
Выход шлама	$q_{\text{ш}}$	0–160	т/ч
Выход алюминатного раствора	$q_{\text{ра}}$	0–160	м ³ /ч
Мощность, потребляемая приводом	P	132	кВт
Кремниевый модуль в алюминатном растворе	δ_k	1–100	–

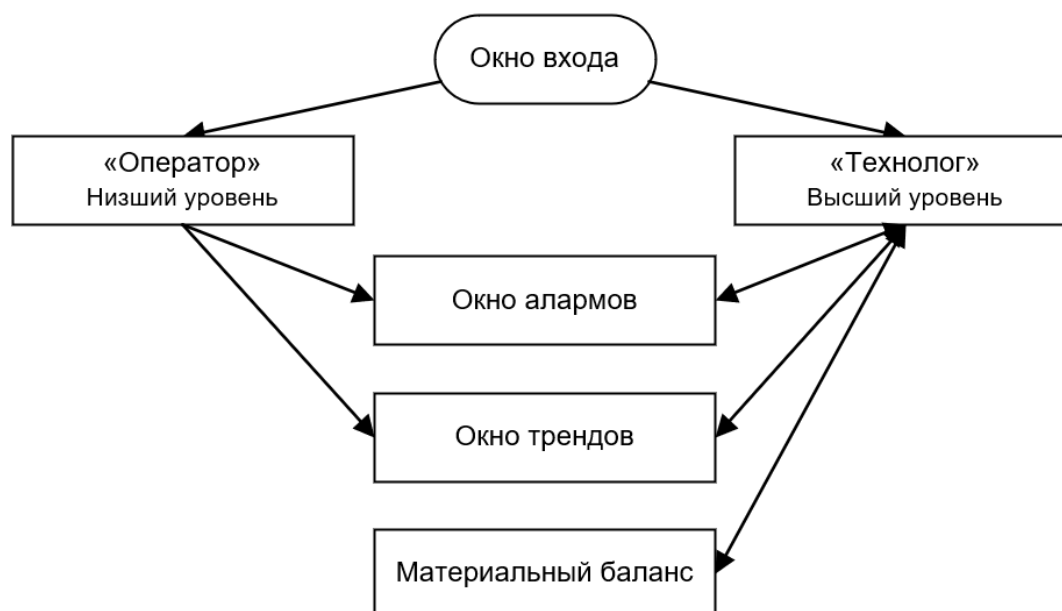


Рис. 3. Иерархия графических окон
 Fig. 3. Graphic window hierarchy

Для разработки мнемосхемы используется SCADA-система Wonderware InTouch⁶ [12–14], состоящая из различных окон, в которых отображаются графические и текстовые объекты, графики, кнопки и тумблеры для ввода информации и управления. Созданы Quick-

сценарии для отображения анимации процесса. Во время работы с системой учитывается разграничение доступа. Иерархия графических окон представлена на рис. 3.

С высшим уровнем доступа пользователь попадает в графическое окно «Технолог»

⁶AVEVA InTouch HMI (Wonderware InTouch HMI) Программное обеспечение HMI/SCADA Wonderware. [Электронный ресурс]. URL: <https://wonderware.ru/hmi-scada/> (8.02.2022).

(рис. 4), на данном рисунке видим то, в чем и состоит визуализация и имитация процесса.

В верхней части графического окна предусмотрены:

- отображение параметров процесса с показаниями средств измерений;
- индикация состояний элементов системы управления;
- компоненты с возможностью изменения количества поданного сырья;
- возможность перехода в окно авторизации;
- переключение режимов управления;

– подтверждение алармов;

– окно реального времени.

В правой части окна имеется возможность:

- вызова всплывающих графических окон трендов и алармов;
- вызова блока материального баланса для редактирования компонентов сырья.

С низшим уровнем доступа пользователь попадает в графическое окно «Оператор» (рис. 5), где предусматриваются более ограниченные возможности в сравнении с предыдущим пользователем.

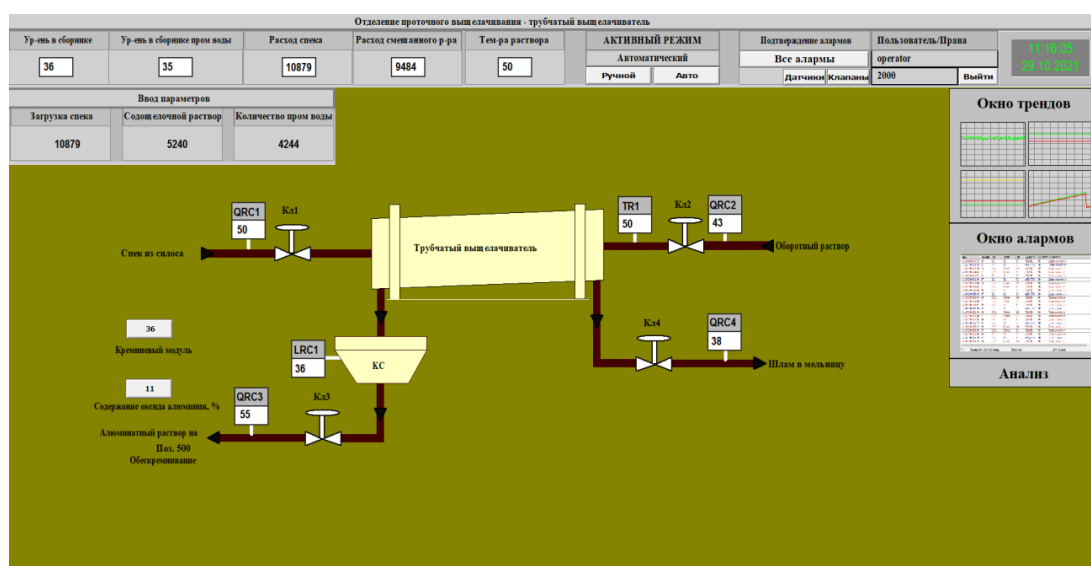


Рис. 4. Окно мнемосхемы с высшим уровнем доступа
Fig. 4. Window of the mnemonic diagram with the highest access level

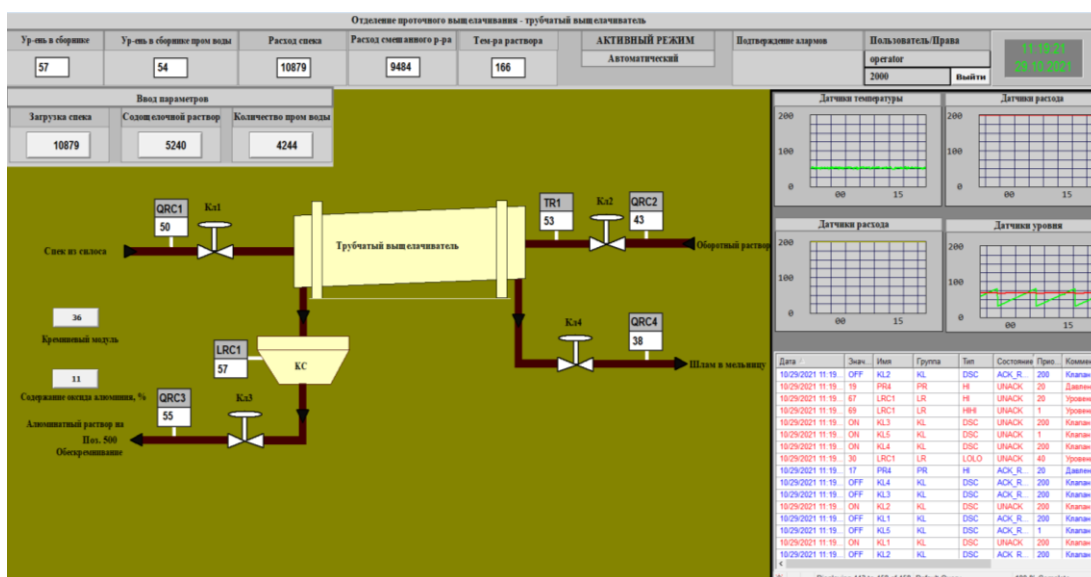


Рис. 5. Окно мнемосхемы с низшим уровнем доступа
Fig. 5. Window of the mnemonic diagram with the lowest access level

В верхней части графического окна предусмотрены:

- отображение параметров процесса с показаниями средств измерений;
- индикация состояний элементов системы управления;
- отображение количества поданного сырья;
- возможность перехода в окно авторизации;
- отображение текущего режима управления;
- окно реального времени.

В правой части окна отображаются графические окна трендов и алармов.

На всех уровнях доступа изображена модель трубчатого выщелачивателя. При имитации процесса возможно изменить:

- количество подаваемого спека (QRC1), т/ч;
- количество подаваемого оборотного раствора (QRC2), т/ч;
- сброс шлама (QRC4), т/ч.

Слева от объекта управления показана

оценка качества получаемого продукта (кремниевый модуль и содержание оксида алюминия) в зависимости от внесенных пользователем изменений в состав сырья и количества поданных спека и воды.

Алармы являются предупреждениями об аварийных условиях протекания процесса, которые могут вызвать проблемы и требуют отклика (подтверждения) оператора.

Окно алармов (рис. 6) содержит кнопки подтверждения алармов.

Графики трендов показывают изменение параметров технологического процесса в режиме реального времени. Предыдущие значения переменных также запоминаются, предусматривая возможность изучения предшествующих значений.

Моделирование материального баланса. Для имитации параметров выщелачивателя составлена таблица материального баланса процесса на 1000 кг глинозема.

Исходные данные для материального баланса выщелачивания спека представлены в табл. 2 и 3 [15].

Окно алармов							
Дата	Значение	Имя	Группа	Тип	Состояние	Приоритет	Комментарий
04/26/2020 11:51:26	ON	KL5	KL	DSC	UNACK	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	OFF	KL5	KL	DSC	ACK_RTN	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	ON	KL5	KL	DSC	UNACK	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	OFF	KL5	KL	DSC	ACK_RTN	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	ON	KL5	KL	DSC	UNACK	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	OFF	KL5	KL	DSC	ACK_RTN	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	ON	KL5	KL	DSC	UNACK	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:26	OFF	KL5	KL	DSC	ACK_RTN	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:30	2000	\$AccessL...	\$System	USER		999	\$AccessLevel
04/26/2020 11:51:30	operator	\$Operator	\$System	USER		999	\$Operator
04/26/2020 11:51:30	operator	\$Operator...	\$System	USER		999	\$OperatorName
04/26/2020 11:51:36	64	LRC1	LR	LO	UNACK	30	Уровень
04/26/2020 11:51:36	17	PR4	PR	HI	ACK_RTN	20	Давление
04/26/2020 11:51:36	ON	KL2	KL	DSC	UNACK	200	Клапан подачи вод
04/26/2020 11:51:36	OFF	KL1	KL	DSC	ACK_RTN	200	Клапан подачи
04/26/2020 11:51:36	OFF	KL3	KL	DSC	ACK_RTN	200	Клапан подачи жидкой фазы
04/26/2020 11:51:36	OFF	KL4	KL	DSC	ACK_RTN	200	Клапан вывода
04/26/2020 11:51:36	OFF	KL5	KL	DSC	ACK_RTN	1	Клапан аварийного сброса
04/26/2020 11:51:50	ON	KL3	KL	DSC	UNACK	200	Клапан подачи жидкой фазы
04/26/2020 11:51:50	ON	KL1	KL	DSC	UNACK	200	Клапан подачи
04/26/2020 11:51:55	OFF	KL2	KL	DSC	ACK_RTN	200	Клапан подачи вод
04/26/2020 11:52:19	67	LRC1	LR	HI	UNACK	20	Уровень
04/26/2020 11:52:20	ON	KL4	KL	DSC	UNACK	200	Клапан
Displaying 473 to 495 of 495 alarms. Default Query 100 % Complete							
Подтверждение алармов							
Все алармы		Датчики		Клапаны		Режим	
Уровень		Тем-ра		Давл-е			

Рис. 6. Окно алармов
Fig. 6. Alert window

Таблица 2. Химический состав спека
Table 2. Chemical composition of sintered mass

Компоненты	Содержание, кг
Al ₂ O ₃	1 626,06
R ₂ O	1 379,17
CaO	3 290,63
SiO ₂	1 762,94
Fe ₂ O ₃	278,04
MgO	51,71
Прочие	2 490,90

Спек выщелачивается оборотным раствором, который приготавливают из содощелочного раствора и промывной воды.

Материальный баланс выщелачивания спека представлен в табл. 4⁷ [16, 17].

На основе предложенного материального баланса была создана программа, содержащая последовательность действий для автоматического выполнения расчета (рис. 7).

Программа расчета материального баланса работает по следующему алгоритму (рис. 8). Программа и алгоритм построены с учетом рекомендаций⁸ [18–20].

На основе программы расчета материального баланса был создан отдельный блок внутри SCADA-системы (рис. 9), с помощью которого можно изменять различные параметры сырья.

Таблица 3. Химический состав растворов
Table 3. Chemical composition of solutions

Растворы	Содержание, г/дм ³			Каустический модуль α_k	Плотность, кг/м ³
	Al ₂ O ₃	R ₂ O _k	R ₂ O _y		
Содощелочной раствор	26,69	50,41	45,59	содощелочной раствор	26,69
Промывная вода	42,95	42,58	5,70	промывная вода	42,95
Оборотный раствор	33,00	45,34	19,76	оборотный раствор	33,00

Таблица 4. Материальный баланс выщелачивания спека
Table 4. Material balance of sinter leaching

Наименование	Компоненты, кг									Итого
	Al ₂ O ₃	R ₂ O _к	R ₂ O _у	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	прочие	H ₂ O	
Приход										
Спек	1626,1	1379,2	0,0	3290,6	1762,9	278,1	51,7	2490,9	0,0	10879,4
Промывная вода	167,1	165,6	22,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3889,1	4244,0
Содощелочной раствор	125,6	235,4	212,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4665,8	5239,7
Смешанный	292,7	401,1	235,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8554,9	9483,7
ИТОГО	1918,7	1780,2	235,1	3290,6	1762,9	278,1	51,7	2490,9	8554,9	20363,2
Расход										
Алюминатный раствор	1713,8	1607,8	235,1	0,0	39,2	0,0	0,0	0,0	8554,9	12150,8
Шлам	204,9	172,4	0,0	3290,6	1723,8	278,1	51,7	2490,9	0,0	8212,3
ИТОГО	1918,7	1780,2	235,1	3290,6	1762,9	278,1	51,7	2490,9	8554,9	20363,2

⁷Исаечкина А. А., Малашевская Е. А. Алгоритмика и программирование. Scratch, C++, Python // Перспективные средства организации инновационной проектной деятельности: сб. практ. реком. для педагогов. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во МОУ «Инженерная школа города Комсомольска-на-Амуре», 2020. С. 91–110.

⁸Максимычев О. И., Либенко А. В., Виноградов В. А. Программирование логических контроллеров (PLC). М.: Изд-во МАДИ, 2016. 188 с.

Condition

While Running

Every

1000

Msec
Scripts

2

OK

Cancel

Convert

Validate

Functions

All...

String...

Math...

System...

Add-ons...

Misc...

Quick...

Help...

{Расчет суммы компонентов}

$$\text{Spek} = \text{SpekAl} + \text{SpekR20K} + \text{SpekR20U} + \text{SpekCAO} + \text{SpekSiO2} + \text{SpekFE23} + \text{SpekMGO} + \text{SpekPro} + \text{SpekH2O};$$

$$\text{Voda} = \text{VodaAl} + \text{VodaR20K} + \text{VodaR20U} + \text{VodaCAO} + \text{VodaSiO2} + \text{VodaFE23} + \text{VodaMGO} + \text{VodaPro} + \text{VodaH2O};$$

$$\text{Rastvor} = \text{RastvorAl} + \text{RastvorR20K} + \text{RastvorR20U} + \text{RastvorCAO} + \text{RastvorSiO2} + \text{RastvorFE23} + \text{RastvorMGO} + \text{RastvorPro} + \text{RastvorH2O};$$

{ Расчет извлечения оксида алюминия и R2O из спека при выщелачивании }

$$\text{Al2O3} = \text{SpekAl} * 0.874;$$

$$\text{R2O} = \text{SpekR20K} * 0.875;$$

{ Расчет количества красного шлама исходя из компонентов }

$$\text{Shlam} = [\text{SpekAl} - \text{Al2O3}] + [\text{SpekR20K} - \text{R2O}] + \text{SpekSiO2} + \text{SpekCAO} + \text{SpekFE23} + \text{SpekMGO} + \text{SpekPro};$$

{ Расчет количества алюминатного раствора исходя из компонентов }

$$\text{Aluminat} = [\text{Al2O3} + \text{VodaAl} + \text{RastvorAl}] + [\text{R2O} + \text{VodaR20K} + \text{RastvorR20K}] + [\text{VodaR20U} + \text{RastvorR20U}] + [\text{VodaH2O} + \text{RastvorH2O}];$$

$$\text{AluminatProc} = [\text{Al2O3} * 100] / [\text{Aluminat}];$$

{Расчет производительности тонн в час}

$$\text{RashSpeka} = [94 * \text{Spek}] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$

$$\text{RashVodaRastvor} = [94 * [\text{Voda} + \text{Rastvor}]] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$

$$\text{RashAluminat} = [94 * \text{Aluminat}] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$

$$\text{RashShlam} = [94 * \text{Shlam}] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$

{Качество Алюмината Кремниевый модуль}

$$\text{SiOModul} = \text{Al2O3} / [(\text{Aluminat} * 0.32) / 100] ;$$

IF

ELSE

AND

<

<=

==

<>

>=

>

THEN

ELSE IF

OR

=

+

-

*

/

;

ENDIF

NOT

Рис. 7. Скрипт расчета материального баланса
 Fig. 7. Material balance calculation script

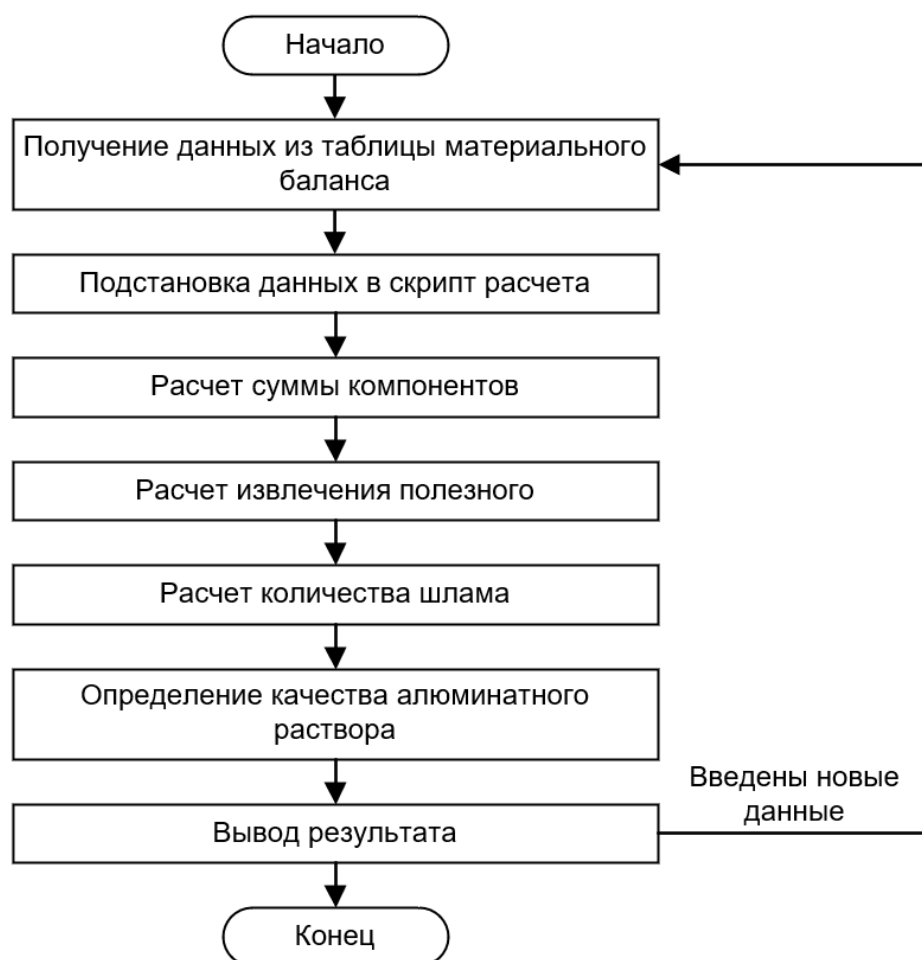


Рис. 8. Алгоритм работы скрипта расчета материального баланса
Fig. 8. Material balance calculation script algorithm

	← Материальный баланс									
	Al ₂ O ₃	R ₂ O _K	R ₂ O _y	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Прочие	H ₂ O	Итого
Спек	1626	1379	0	3291	1763	278	52	2491	0	10879
Пром вода	167	166	22	0	0	0	0	0	3889	4244
Содошело-ч р-р	126	235	213	0	0	0	0	0	4666	5240

Рис. 9. Блок расчета материального баланса
Fig. 9. Material balance calculation unit

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На производстве не представляется возможным рассмотреть изменения каких-либо технологических параметров без снижения экономической эффективности и нарушения безопасности ведения процесса.

Для того чтобы производить эксперименты путем изменения параметров без вреда для производства, требуется виртуальный клон технологического процесса или объекта,

который хранит в себе свойства и возможности своего реального двойника.

Разработан виртуальный трубчатый выщелачиватель, позволяющий рассчитывать качество выходного продукта при разном составе сырья и имитировать изменение входных и выходных потоков, выдавать аварийные предупреждения, подбирать технологические регламенты для эффективного ведения процесса.

Список источников

1. Черкасова М. В., Бричкин В. Н. Современные тенденции в переработке низкачественного алюминиевого сырья и их влияние на развитие минерально-сырьевой базы производства глинозема // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1-4. С. 172–180.
2. Bagani M., Balomenos E., Pnias D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 734. <https://doi.org/10.3390/min11070734>.
3. Моргунов В. В. Технология производства глинозема из бокситов // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 6. С. 8. <https://doi.org/10.17513/msnv.19842>.
4. Абрамов В. И., Туйцына А. А. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации компании // Управление бизнесом в цифровой экономике: сб. тез. конф. IV Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 18–19 марта 2021 г.). СПб.: Изд-во СПбГУПТД, 2021. С. 33–39.
5. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход центра компетенций НТИ СПбПУ // Цифровая подстанция. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2020/04/30/opredelenie-razrabotka-i-primenenie-tsifrovyyh-dvoynikov-podhod-tsentra-kompetentsij-nti-spbpu-novye-proizvodstvennye-tehnologii/> (17.02.2022).
6. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием (г. Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 г.). СПб.: Изд-во СПбПУ им. Петра Великого, 2019. С. 234–245. <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/25>.
7. Комраков А. В., Сухоруков А. И. Концепция цифрового двойника в управлении жизненным циклом промышленных объектов // Сетевой научный журнал «Научная идея». 2017. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nauch-idea.ru/index.php/nomer-3-3/10-3-3/47-kontseptsiya-tsifrovogo-dvoynika-v-upravlenii-zhiznennym-tsiklom-promyshlennykh-ob-ektov> (17.02.2022).
8. Пискажова Т. В., Сидельников С. Б., Белоплицкий В. М., Якив'юк П. Н., Сидельников А. С. «Виртуальный СЛИПП» математическая модель для управления агрегатом СЛИПП и ее визуализация с помощью программных продуктов WinCC 7. 0 и Step 7 // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2015. Т. 16. № 2. С. 140–144.
9. Пискажова Т. В. Программа – имитатор для поддержки принятия технологических решений при получении алюминия // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 41–44.
10. Yurkov V. V., Mann V. Ch., Piskazhova T. V., Nikandrov K. F. Virtual aluminum reduction cell // Light Metals. 2001. P. 1259–1266.
11. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Nesterov G. A. Virtual casting and rolling lines development // Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2019. Vol. 537. Iss. 3. P. 032094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032094>.
12. Корягин Н. Д., Сухоруков А. И., Медведев А. В. Реализация современных методологических подходов к менеджменту в информационных системах управления: монография. М.: РИО МГТУ ГА, 2015. 148 с.
13. Gupta B. K., Rastogi V. Integration of technology to access the manufacturing plant via remote access system - A part of Industry 4.0 // Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the First International Conference on Design and Materials: Proceedings. 2021. Vol. 56. Part 6. P. 3497–3505. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.135>.
14. Бильфельд Н. В., Фелькер М. Н. Разработка технологических мнемосхем на языках высокого уровня // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1. С. 65–68. <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2020-1-65-68>.
15. Brial V., Tran Hang, Sorelli Luca, Conciatori David, Ouellet-Plamondon C. M. Evaluation of the reactivity of treated spent pot lining from primary aluminum production as cementitious materials // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 170. P. 105584. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105584>.
16. Niero D. F., Montedo O. R. K., Bernardin A. M. Synthesis and characterization of nano α -alumina by an inorganic sol-gel method // Materials Science and Engineering: B. 2022. Vol. 280. P. 115690. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115690>.
17. Mahecha-Rivas J. C., Fuentes-Ordoñez E., Epelde E., Saldarriaga J. F. Aluminum extraction from a metallurgical industry sludge and its application as adsorbent // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 310. P. 127374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127374>.
18. Александров А. В., Немчинова Н. В. Роль полиморфных модификаций двухвалентного силиката нефелиновых слесков при производстве глинозема // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 11. С. 170–183. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>.
19. Арлюк Б. И. Выщелачивание алюминатных слесков. М.: Изд-во «Металлургия», 1979. 80 с.
20. Романов А. А., Салтанаева Е. А. Алгоритмизация и программирование // Научные исследования XXI века. 2020. № 6. С. 111–114.

References

1. Cherkasova M. V., Brichkin V. N. Current trends in processing high quality aluminum materials and their influence on development of mineral resources base of alumina production. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'* = *Mining informational and analytical bulletin*. 2015;S1-4:172-180. (In Russ.).
2. Bagani M., Balomenos E., Papias D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production. *Minerals*. 2021;11(7):734. <https://doi.org/10.3390/min11070734>.
3. Morgunov V. V. Technology of alumina production from bauxite. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. 2019;6:8. <http://doi.org/10.17513/msnv.19842>. (In Russ.).
4. Abramov V. I., Tuytsyna A. A. Digital twins as effective tools for the company digital transformation. *Upravlenie biznesom v cifrovoj ekonomike: sbornik tezisev konferencii IV Mezhdunarodnoj konferencii = Business management in digital economy: collected abstracts of the 4th International Conference*. 18–19 March 2021, St. Petersburg. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 2021, p. 33-39. (In Russ.).
5. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A. Identification, development and application of digital twins: the approach of the National Technological Initiative of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Competence Center. *Cifrovaya podstanciya*. 2019. Available from: <http://digitalsubstation.com/blog/2020/04/30/opredelenie-razrabotka-i-primenenie-tsifrovyyh-dvoynikov-podhodka-tsentra-kompetentsij-nti-spbpu-novye-proizvodstvennye-tehnologii/> [Accessed 17th February 2022]. (In Russ.).
6. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A. Digital twins: definition, approaches and methods of development. *Cifrovaya transformaciya ekonomiki i promyshlennosti: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii s zarubezhnym uchastiem = Digital Transformation of Economy and Industry: Collected works of the scientific and practical conference with international participation*. 20–22 June 2019, St. Petersburg. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2019, p. 234-245. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/25>.
7. Komrakov A. V., Sukhorukov A. I. The concept of digital twin in managing industrial capital construction and operation projects life cycle. *Setevoy nauchnyj zhurnal "Nauchnaya ideya"*. 2017;3. Available from: <http://www.nauch-idea.ru/index.php/nomer-3-3/10-3-3/47-kontseptsiya-tsifrovogo-dvoynika-v-upravlenii-zhiznennym-tsiklom-promyshlennykh-ob-ektov> [Accessed 17th February 2022]. (In Russ.).
8. Piskazhova T. V., Sidel'nikov S. B., Belolipeckij V. M., Yakiv'yuk P. N., Sidel'nikov A. S. "Virtual CC&RP" – a mathematical model for the control of the unit CC&RP and its visualization with the help of software products WinCC 7.0 and Step 7. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva*. 2015;16(2):140-144. (In Russ.).
9. Piskazhova T. V. A simulation program for technological decision support in aluminum production. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2010;7:41-44. (In Russ.).
10. Yurkov V. V., Mann V. Ch., Piskazhova T. V., Nikandrov K. F. Virtual aluminum reduction cell. *Light Metals*. 2001;1259-1266.
11. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Nesterov G. A. Virtual casting and rolling lines development. In: *Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0: Materials Science and Engineering*. IOP Conference Series. 2019;537(3):032094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032094>.
12. Koryagin N. D., Suhorukov A. I., Medvedev A. V. *Implementation of modern methodological approaches in information control system management*. Moscow: Editorial and Publications Division of Moscow State Technical University of Civil Aviation; 2015, 148 p. (In Russ.).
13. Gupta B. K., Rastogi V. Integration of technology to access the manufacturing plant via remote access system - A part of Industry 4.0. In: *Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the First International Conference on Design and Materials: Proceedings*. 2021;56(6):3497-3505. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.135>.
14. Bilfeld N. V., Felker M. N. Development of technological mnemonic schemes in high-level programming languages. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2020;1:65-68. <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2020-1-65-68>.
15. Brial V., Tran Hang, Sorelli Luca, Conciatori David, Ouellet-Plamondon C. M. Evaluation of the reactivity of treated spent pot lining from primary aluminum production as cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;170:105584. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105584>.
16. Niero D. F., Montedo O. R. K., Bernardin A. M. Synthesis and characterization of nano α -alumina by an inorganic sol-gel method. *Materials Science and Engineering: B*. 2022;280:115690. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115690>.
17. Mahecha-Rivas J. C., Fuentes-Ordoñez E., Epelde E., Saldarriaga J. F. Aluminum extraction from a metallurgical industry sludge and its application as adsorbent. *Journal of Cleaner Production*. 2021;310:127374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127374>.
18. Aleksandrov A. V., Nemchinova N. V. The role of sintered nepheline dicalcium silicate polymorphs in alumina production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(11):170-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>.
19. Arlyuk B. I. *Leaching of sintered aluminate cakes*. Moscow: Metallurgiya; 1979, 80 p. (In Russ.).
20. Romanov A. A., Saltanaeva E. A. Algorithmization and programming. *Nauchnye issledovaniya XXI veka*. 2020;6:111-114. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тимофеев Андрей Алексеевич,
магистрант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Даныкина Галина Борисовна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации
производственных процессов в металлургии,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Пискажова Татьяна Валериевна,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматизации
производственных процессов в металлургии,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Колмакова Людмила Петровна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.04.2022; одобрена после рецензирования 27.05.2022; принята к публикации 27.09.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Timofeev,
Master's Degree Student,
Siberian Federal University,
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Galina B. Danykina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automation of
Production Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University,
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Tatiana V. Piskazhova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Automation of Production
Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University.
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Lyudmila P. Kolmakova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automation of
Production Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University.
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 12.04.2022; approved after reviewing 27.05.2022; accepted for publication 27.09.2022.