

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37>РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА УЧАСТКА ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ  
ГЛИНОЗЁМА

Научная статья

Тимофеев А.А.<sup>1,\*</sup>, Аглиуллин Д.А.<sup>2</sup>, Пискажова Т.В.<sup>3</sup>, Бавченков В.Е.<sup>4</sup>, Донцова Т.В.<sup>5</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-8703-7989;<sup>1, 2, 3, 5</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация<sup>4</sup> АО «РУСАЛ Ачинск», Ачинск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (aktum600[at]gmail.com)

**Аннотация**

Цель – разработка цифрового двойника участка первой стадии обескремнивания с программой автоматического расчёта качества алюминатного раствора на основе материального баланса и уравнений тепло-массо-обмена для улучшения качества управления процессами гидрохимии на глинозёмном комбинате АО «РУСАЛ Ачинск». В качестве входных параметров были приняты данные с предыдущего отдела выщелачивания: 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 и кремниевый модуль получаемого раствора. С помощью производственных лабораторных данных сведен материальный баланс алюминатного раствора и затравки, на их основе разработан алгоритм моделирования изменений в процессе обескремнивания и программа расчёта качества алюминатного раствора. Разработан виртуальный двойник отделения первой стадии обескремнивания на основе действующих аппаратов, используемых 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 температуры и отображает результаты расчётов с помощью мнемосхемы процесса. Таким образом, разработанный интерфейс позволяет имитировать различные технологические операции, производимые в отделении обескремнивания: заполнение сборников, сброс растворов, 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:** обескремнивание, алюминатный раствор, кремниевый модуль, глинозём, виртуальный двойник, материальный баланс, математические модели, спек.

## DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF THE DESILICATION SECTION IN ALUMINA PRODUCTION

Research article

Timofeev A.A.<sup>1,\*</sup>, Agliullin D.A.<sup>2</sup>, Piskazhova T.V.<sup>3</sup>, Bavchenkov V.Y.<sup>4</sup>, Dontsova T.V.<sup>5</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-8703-7989;<sup>1, 2, 3, 5</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation<sup>4</sup> JSC "RUSAL Achinsk", Achinsk, Russian Federation

\* Corresponding author (aktum600[at]gmail.com)

**Abstract**

The aim is to develop a digital twin of the first stage of desilication with a programme for automatic calculation of aluminate solution quality on the basis of material balance and heat and mass transfer equations to improve the quality of hydrochemical process control at the alumina refinery of JSC "RUSAL Achinsk". Data from the previous leaching department were taken as input parameters: solution temperature, flow rates of sintered mass and recycling solution, chemical composition of raw materials. Air temperature, vibrations and equipment malfunction were used as the main disturbing influences. The output parameters are: sludge and aluminate solution yields and silicon modulus of the obtained solution. With the help of production laboratory data, the material balance of aluminate solution and inoculum was summarized, and on their basis an algorithm for modelling changes in the process of desilication and a programme for calculating the quality of aluminate solution were developed. A virtual twin of the first stage of desilication compartment was developed on the basis of the operating apparatuses used at JSC "RUSAL Achinsk". It is shown that the programme, based on a simple balance model, predicts the quality of the output product (aluminate solution) when the composition of raw materials (sintered mass and recycling solution) and temperature change and displays the results of calculations with the help of a mnemonic diagram of this process. Thus, the developed interface allows to simulate various technological operations performed in the desliming department: filling of collectors, discharge of solutions, change of input flows; at the same time it is possible to observe both current changes of process parameters and archive graphs, as well as to select the optimal composition of raw materials to obtain the best quality aluminate solution.

**Keywords:** desilication, aluminate solution, silicon module, alumina, virtual twin, material balance, mathematical models, sintered mass.

## Введение

Согласно ГОСТ [1], цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями.

В литературе найдены примеры использования цифрового двойника в металлургии. Например, в статье [2] описан пример литейно-прокатного комплекса и разработана программа для расчёта температуры металла на участках литейно-прокатного комплекса. Также, авторами [3] была представлена и описана «виртуальная ячейка», созданная на основе динамической модели и «виртуальная система управления», которая является цифровым двойником системы управления электролизером на предприятии КрАЗ. При разработке человеко-машинного интерфейса для управления каскадом мельниц при получении шихты нефелиновой руды [4] авторы преследовали цель совершенствования управления мельницей при получении шихты нефелиновой руды. При производстве глинозёма в цехе гидрохимии было найдено две работы [5], [6], где авторами разработан цифровой двойник трубчатого выщелачивателя на основе действующего аппарата, используемого в АО «РУСАЛ Ачинск». Представляемая статья является продолжением этих работ по разработке цифрового двойника в цехе гидрохимии.

Обескремнивание – ключевой этап в производстве глинозёма, это процесс, при котором из алюминатного раствора удаляется избыток кремния, что важно для получения глинозёма высокого качества.

Качество алюминатного раствора и, следовательно, получаемого из него глинозёма, во многом зависит от кремниевого модуля  $\mu_{Si}$ . Кремниевый модуль (КМ) – это отношение содержания кремния к содержанию алюминия в растворе. Правильный расчёт и контроль этого параметра критически важны для качественного и эффективного процесса обескремнивания [7]. Измерения КМ проводятся в лабораториях после отбора проб несколько раз в сутки. Поэтому важно разработать методы и программы, позволяющие предсказывать как КМ, так и другие технологические параметры участка обескремнивания.

В настоящей статье представлена разработка программы перерасчёта КМ на глинозёмном производстве. Были рассчитаны таблицы материального баланса для отделений обескремнивания и создан программный код в программном комплексе InTouch (ПК InTouch). При изменении состава сырья, через таблицы материального баланса, программа позволяет рассчитывать качество алюминатного раствора, а именно его КМ. Это позволяет оперативно корректировать процесс обескремнивания и обеспечивать высокое качество производимого глинозёма.

## Технология

Процесс получения глинозёма из нефелиновых руд включает в себя серию последовательных операций. Нефелиновая руда подвергается дроблению и измельчению, подготавливая сырьё к дальнейшей обработке. После подготовки сырьевая масса смешивается с карбонатом кальция для последующего этапа спекания. Спекание проводится в печах при высоких температурах около 1300-1400°C. В ходе этого процесса происходит разложение нефелинов, а также реакция между силикатами и кальцием. В результате образуется спек, содержащий алюминат кальция, который представляет собой промежуточное соединение для извлечения глинозёма. После охлаждения спека его подвергают выщелачиванию содощелочным раствором с водой. Выщелачивание даёт возможность не только извлечь алюминат кальция в растворимую форму, но и отделить нерастворимые фракции, среди которых особое внимание уделяется силикату кальция. После выщелачивания полученный алюминатный раствор поступает в отделение обескремнивания. Именно процесс обескремнивания позволяет максимально снизить содержание кремния в конечном продукте, что значительно повышает качество глинозёма. Растворимый алюминат кальция в растворе подвергают дальнейшей обработке для осаждения гидроксида алюминия. Полученный осадок, после отделения и промывки, кальцинируется, в результате чего получается глинозём [8].

На рисунке 1 представлена аппаратурно-технологическая схема отделения первой стадии обескремнивания.

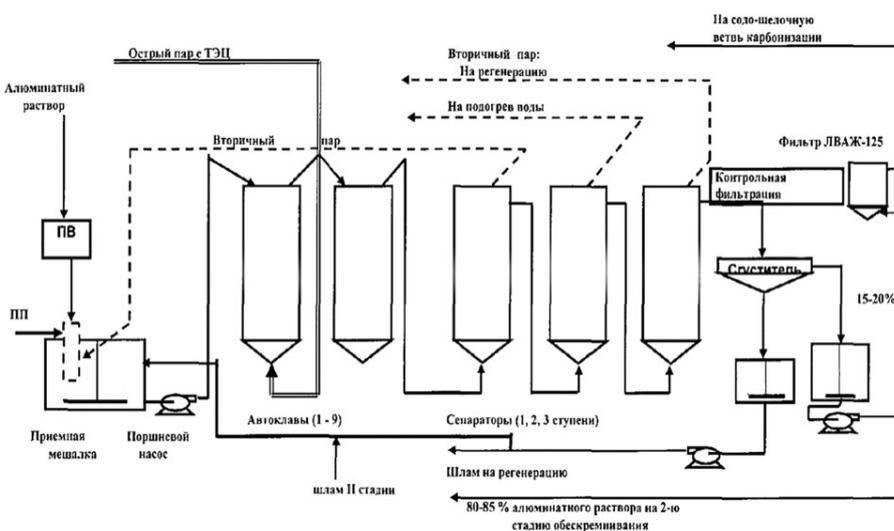


Рисунок 1 - Аппаратурно-технологическая схема отделения первой стадии обескремнивания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.1>

Алюминатный раствор после выщелачивания спека поступает в приемную мешалку. Нагрев раствора производится частью пара самоиспарения второй ступени. Далее раствор поршневым насосом подается в автоклавную батарею, состоящую из ряда последовательно соединенных автоклавов. В первых двух (греющих) раствор нагревается до реакционной температуры, в других автоклавах раствор выдерживается, непрерывно проходя по ним со скоростью, определяемой временем его изотермической обработки, необходимым для завершения процесса кристаллизации при выбранных параметрах. Перегретый (по отношению к атмосферному давлению) алюминатный раствор охлаждается до атмосферного давления в трех самоиспарителях алюминатного раствора. В этих самоиспарителях путем внутреннего энергообмена в тепловом процессе взаимодействующих потоков растворителя и раствора получают водяной пар. Пар первой и частично второй ступени направляется на подогрев исходного раствора, оставшаяся часть пара второй ступени и пар третьей ступени используются для нагрева воды, которая далее отводится для промывки и выщелачивания спека [9], [10].

Цифровой двойник участка обескремнивания при производстве глинозёма представляет собой интегрированную систему, которая позволяет моделировать, контролировать и оптимизировать технологические процессы в режиме реального времени. Основная цель создания цифрового двойника — повышение эффективности и экономичности производства, а также улучшение качества глинозёма. На участке происходят химические реакции, процессы тепломассообмена, поэтому необходимо составить материальный баланс первой стадии обескремнивания и разработать математическую модель тепломассообмена для решения задач управления.

#### Расчёт таблиц материального баланса

Для расчёта материального баланса процесса первой стадии обескремнивания требуется состав алюминатного раствора с отделения выщелачивания, который представлен в таблице 1. Расчёт ведётся на 1000 кг. глинозёма [11].

Таблица 1 - Состав алюминатного раствора с отделения обескремнивания

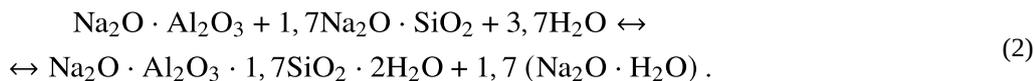
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.2>

Компоненты	Содержание, кг
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1713,80
R <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	1607,80
R <sub>2</sub> O <sub>у</sub>	235,10
SiO <sub>2</sub>	39,20
H <sub>2</sub> O	8554,90
Итого	12150,80

В промышленных условиях на первой стадии обескремнивания, извлекают в гидроалюмосиликат натрия (ГАСН) не менее 90% SiO<sub>2</sub>. Для расчёта примем извлечение SiO<sub>2</sub> в ГАСН 90%. Кремнезем из раствора, на первой стадии выделяется в составе ГАСН по реакции (1).



ГАСН, полученный в промышленных условиях, обычно отвечает формуле  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,7\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ . Количество воды в составе ГАСН зависит от температуры алюминатного раствора при обескремнивании, с учетом состава ГАСН, получаемого в промышленных условиях (2):



Влажность ГАСН составляет 35%.

Масса образующегося осадка в составе ГАСН рассчитана в таблице 2.

Таблица 2 - Состав образующегося осадка  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.3>

Параметр	Формула	Расчет	Значение, кг
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\frac{M_{\text{SiO}_2 \text{ в гасн}}}{(k_{\text{практ}} \cdot 1,7)} \cdot k_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{35,28}{(0,06 \cdot 1,7)} \cdot 0,102$	35,280
$\text{F}_2\text{O}$	$\frac{M_{\text{SiO}_2 \text{ в гасн}}}{(k_{\text{практ}} \cdot 1,7)} \cdot k_{\text{F}_2\text{O}}$	$\frac{35,28}{(0,06 \cdot 1,7)} \cdot 0,062$	21,445
$\text{SiO}_2$	$M_{\text{SiO}_2 \text{ в а.р.}} \cdot k_{\text{SiO}_2}$	$39,20 \cdot 0,9$	35,28
$\text{H}_2\text{O}$	$\frac{M_{\text{SiO}_2 \text{ в гасн}}}{(k_{\text{практ}} \cdot 1,7)} \cdot 2 \cdot k_{\text{H}_2\text{O}}$	$\frac{35,28}{(0,06 \cdot 1,7)} \cdot 2 \cdot 0,018$	12,452
Итого	–	–	104,456

Масса не связанной воды составит:

$$\frac{M_{\text{гасн}}}{\%_{\text{сух}} \cdot \%_{\text{влаж}}} = \frac{104,456}{65 \cdot 35} = 56,246 \text{ кг.}$$

С учетом влажности масса осадка ГАСН составит:

$$M_{\text{гасн}} + M_{\text{не связ в}} = 104,456 + 56,246 = 160,702 \text{ кг.}$$

Для ускорения выделения кремнезема, в алюминатный раствор добавляют затравку. Затравка представляет собой шлам, полученный при обескремнивании предыдущих порций алюминатного раствора. Дозировка белого шлама, в качестве затравки, составляет 100 г/л [11], [12], [13].

На метр кубический раствора, дозировка белого шлама составит:

$$0,1 \cdot 1000 = 100 \text{ кг.}$$

Масса компонентов в 100 кг затравки рассчитана в таблице 3.

Таблица 3 - Состав затравки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.4>

Параметр	Формула	Расчет	Значение, кг
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$0,1 \cdot \frac{M_{a.p.}}{M_{\text{влаг гасн}} \cdot M_{Al_2O_3 \text{ в гасн}}}$	$0,1 \cdot \frac{12150,80}{160,702 \cdot 35,280}$	266,75
R <sub>2</sub> O	$0,1 \cdot \frac{M_{a.p.}}{M_{\text{влаг гасн}} \cdot M_{R_2O \text{ в гасн}}}$	$0,1 \cdot \frac{12150,80}{21,445 \cdot 35,280}$	162,14
SiO <sub>2</sub>	$0,1 \cdot \frac{M_{a.p.}}{M_{\text{влаг гасн}} \cdot M_{SiO_2}}$	$0,1 \cdot \frac{12150,80}{160,702 \cdot 35,280}$	266,75
H <sub>2</sub> O	$0,1 \cdot \frac{M_{a.p.}}{M_{\text{влаг гасн}} \cdot (M_{H_2O \text{ в гасн}} + M_{\text{не связ в}})}$	$0,1 \cdot \frac{12150,80}{160,702 \cdot (12,452 + 56,246)}$	519,43
Итого		–	1215,08

Расчёт массы шлама с первой стадии обескремнивания с учетом затравки представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Состав шлама с первой стадии обескремнивания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.5>

Параметр	Формула	Расчет	Значение, кг
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$M_{Al_2O_3 \text{ в гасн}} + M_{Al_2O_3 \text{ в затрав}} + (0,1 \cdot M_{Al_2O_3 \text{ в затрав}})$	$35,28 + 266,75 + (0,1 \cdot 266,75)$	328,71
R <sub>2</sub> O	$M_{R_2O \text{ в гасн}} + M_{R_2O \text{ в затрав}} + (0,1 \cdot M_{R_2O \text{ в затрав}})$	$21,445 + 162,14 + (0,1 \cdot 162,14)$	199,8
SiO <sub>2</sub>	$M_{SiO_2 \text{ в гасн}} + M_{Al_2O_3 \text{ в затрав}} + (0,001 \cdot M_{Al_2O_3 \text{ в затрав}})$	$35,28 + 266,75 + (0,001 \cdot 266,75)$	302,3
H <sub>2</sub> O	$M_{H_2O \text{ в гасн}} + M_{\text{не связ в}} + M_{H_2O \text{ в затрав}} + (0,1 \cdot M_{H_2O \text{ в затрав}})$	$12,452 + 56,246 + 519,43 + (0,1 \cdot 519,43)$	640,07
Итого	–	–	1470,88

Состав обескремненного алюминатного раствора рассчитан в таблице 5.

Таблица 5 - Состав обескремненного алюминатного раствора  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.6>

Параметр	Формула	Расчет	Значение, кг
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$M_{Al_2O_3 \text{ р-ра}} - M_{Al_2O_3 \text{ в гаси}} - (0,1 \cdot M_{Al_2O_3 \text{ в затрав}})$	1713,8 – 35,28 – –(0,1 · 266,75)	1651,84
R <sub>2</sub> O	$M_{R_2O \text{ р-ра}} - M_{R_2O \text{ в гаси}} - (0,1 \cdot M_{R_2O \text{ в затрав}})$	1607,8 – 21,445 – –(0,1 · 162,14)	1570,14
SiO <sub>2</sub>	$M_{SiO_2 \text{ р-ра}} - M_{SiO_2 \text{ в гаси}} - (0,001 \cdot M_{SiO_2 \text{ в затрав}})$	39,2 – 35,28 – –(0,001 · 266,75)	3,65
H <sub>2</sub> O	$M_{H_2O \text{ р-ра}} - M_{H_2O \text{ в гаси}} - M_{\text{не связ в}} - (0,1 \cdot M_{H_2O \text{ в затрав}})$	8554,9 – 56,246 – 12,452 – –(0,1 · 519,43)	8434,26
Итого		–	11895,0

Масса R<sub>2</sub>O<sub>y</sub> остается неизменной, т.е. R<sub>2</sub>O<sub>y</sub> = 235,1.

Кремниевый модуль полученного алюминатного раствора составит:

$$\mu_{\text{КМ}} = \frac{1651,84}{3,65} = 452,158 \text{ ед.}$$

В практике КМ алюминатного раствора после первой стадии обескремнивания составляет (250÷450) ед. Полученный КМ алюминатного раствора отвечает данным практики. Полученные данные сведем в таблицу 6.

Таблица 6 - Материальный баланс после первой стадии обескремнивания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.7>

Наименование	Компоненты, кг					Итого
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>y</sub>	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	
Алюминатный раствор	1713,80	1607,80	235,10	39,20	8554,90	12150,80
Затравка	266,75	162,14	0,00	266,75	519,43	1215,08
Итого	1980,55	1769,94	235,10	305,95	9074,33	13365,88
Алюминатный раствор	1651,84	1570,14	235,10	3,92	8434,26	11895,00
Шлам	328,71	199,80	0,00	302,30	640,07	1470,88
Итого	1980,55	1769,94	235,10	305,95	9074,33	13365,88

Таким образом, приведенный баланс позволяет рассчитывать КМ при изменении входного сырья.

Показатели техпроцесса зависят также от теплообменных процессов в батарее автоклавов. Рассмотрим математические модели изменения масс и температур на примере одного автоклава.

#### Математическая модель тепло-массо-обмена в автоклаве

В автоклав через входную трубу поступает алюминатный раствор и шламовая затравка, а через паровой коллектор непрерывно поступает греющий пар. Составим обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие баланс в автоклаве. Изменение массы пульпы внутри автоклава выражено уравнением 3:

$$\frac{dm_{\text{пульп}}}{dt} = m_{\text{р-р вход}} + m_{\text{пар}} - m_{\text{р-р выход}} \quad (3)$$

Изменение температуры пульпы внутри автоклава описывается следующим образом:

$$c_{\text{пульп}} m_{\text{пульп}} \cdot \frac{dT_{\text{пульп}}}{dt} = c_{\text{пар}} m_{\text{пар}} (T_{\text{пар}} - T_{\text{пульп}}) + c_{\text{р-р}} m_{\text{р-р вход}} (T_{\text{р-р}} - T_{\text{пульп}}),$$

где t – время, сек;

$m_{\text{пар}}$  – количество пара, кг/сек;  
 $m_{\text{р-р вход}}$  – количество раствора поступающего в автоклав, кг/сек;  
 $m_{\text{пульп}}$  – количество пульпы выходящей из автоклава, кг;  
 $T_{\text{пар}}$  – температура греющего пара, °С;  
 $T_{\text{р-р}}$  – температура алюминатного раствора, °С;  
 $T_{\text{пульп}}$  – температура пульпы, Дж/кг°С;  
 $c_{\text{пар}}$  – теплоемкость греющего пара, Дж/кг°С;  
 $c_{\text{р-р}}$  – теплоемкость алюминатного раствора, Дж/кг°С;  
 $c_{\text{пульп}}$  – теплоемкость пульпы, Дж/кг°С.

Используя метод конечных разностей для уравнений (3) и (4), мы получаем разностные схемы для расчёта баланса в первом автоклаве:

$$m_{\text{пульп}}^n = m_{\text{пульп}}^{n-1} + (m_{\text{р-р вход}}^n + m_{\text{пар}}^n - m_{\text{р-р выход}}^n) \cdot \Delta t,$$

$$T_{\text{пульп}}^n = T_{\text{пульп}}^{n-1} + \left( c_{\text{пар}} m_{\text{пар}}^n (T_{\text{пар}} - T_{\text{пульп}}^{n-1}) + c_{\text{р-р}} m_{\text{р-р вход}}^n (T_{\text{р-р}} - T_{\text{пульп}}^{n-1}) \right) \cdot \frac{\Delta t}{c_{\text{пульп}} m_{\text{пульп}}^n}$$

где  $\Delta t$  – шаг интегрирования, сек;

$m_{\text{р-р вход}}^n$  – количество пульпы на текущем шаге, кг;  
 $m_{\text{пульп}}^{n-1}$  – количество пульпы на прошлом шаге, кг;  
 $m_{\text{р-р вход}}^n$  – массовый расход раствора на текущем шаге, кг/сек;  
 $m_{\text{пар}}^n$  – массовый расход пара на текущем шаге, кг/сек;  
 $m_{\text{р-р выход}}^n$  – массовый расход раствора из автоклава на текущем шаге, кг/сек;  
 $T_{\text{пульп}}^n$  – температура пульпы в автоклаве на текущем шаге, °С;  
 $T_{\text{пульп}}^{n-1}$  – температура пульпы в автоклаве на предыдущем шаге, °С;  
 $c_{\text{пар}}$  – теплоемкость греющего пара, Дж/кг°С;  
 $c_{\text{р-р}}$  – теплоемкость алюминатного раствора, Дж/кг°С;  
 $c_{\text{пульп}}$  – теплоемкость пульпы, Дж/кг°С.  
 $T_{\text{пар}}$  – температура греющего пара, °С;  
 $T_{\text{р-р}}$  – температура алюминатного раствора, °С;  
 $T_{\text{пульп}}$  – температура пульпы, Дж/кг°С.

### Тестовые расчёты

Проверку модели будем производить в ПП “Excel”, на основе данных, представленных в таблице 7.

Таблица 7 - Данные для расчётов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.8>

№	Параметр	Условные обозначения	Единицы измерения	Значение
1	Выход пульпы	$m_{\text{пульп вых}}$	кг/сек	0-102
2	Массовый расход раствора	$m_{\text{р-р}}$	кг/сек	0-93,75
3	Массовый расход пара	$m_{\text{пар}}$	кг/сек	0-8,33
4	Масса пульпы в автоклаве	$m_{\text{пульп}}$	кг	0-71500
5	Температура пульпы	$T_{\text{пульп}}$	°С	95-250
6	Температура алюминатного раствора	$T_{\text{р-р}}$	°С	95
7	Температура острого пара	$T_{\text{пар}}$	°С	240
8	Теплоемкость греющего пара	$c_{\text{пар}}$	Дж/кг°С	4200
9	Теплоемкость алюминатного раствора	$c_{\text{р-р}}$	Дж/кг°С	560

10	Теплоемкость пульпы	$C_{пульпы}$	Дж/кг $^{\circ}$ С	3400
11	Шаг интегрирования	$\Delta t$	сек	240

На рисунке 2 представлен временной тренд работы автоклава, сценарий следующий: с отметки 2 минуты включается подача алюминатного раствора и за 8 минут рабочий объем автоклава, равный 72 тоннам, заполняется раствором, через 8 минут открывается подача острого пара и пульпа начинает плавно нагреваться с 95  $^{\circ}$ С до 150  $^{\circ}$ С в течение 2 часов, автоклав входит в рабочий режим. Через 12 минут имитируется авария насоса, раствор поступает в автоклав в меньшем количестве, вследствие чего раствор перегрелся спустя 52 минуты, но спустя 8 минут насос починили и раствор начал поступать в штатном режиме, следовательно, температура раствора начала приходить в норму, однако через 16 минут имитируется авария на линии подачи острого пара и раствор переохлаждается за 2 часа.

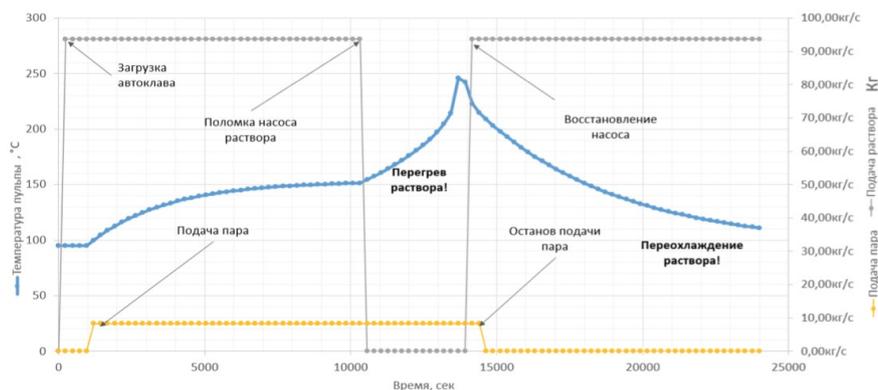


Рисунок 2 - Временной тренд работы автоклава  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.9>

Таким образом, качественно модель работает адекватно, логично, что при уменьшении подачи раствора, оставшийся раствор в автоклаве перегреется при условии подачи греющего пара, а также при остановке подачи пара раствор постепенно охладится до температуры раствора на входе, на рабочий режим автоклав выходит за 2 часа, что соответствует оптимальному времени работы автоклава [15].

### Программа имитации изменения температуры в батарее автоклавов

Код программы работает по следующему алгоритму, представленному на рисунке 3.



Рисунок 3 - Алгоритм работы программы  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.10>

На основе алгоритма составим следующую схему работы первой стадии участка обескремнивания (рисунок 4).

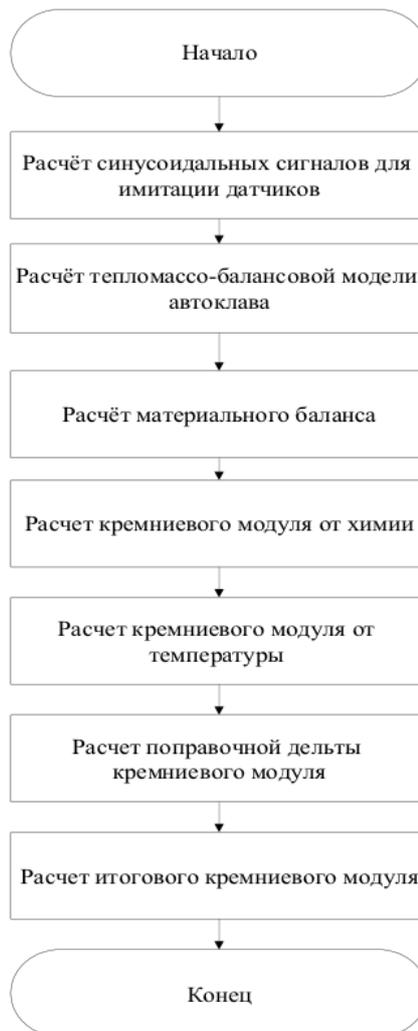


Рисунок 4 - Схема работы первой стадии участка обескремнивания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.11>

Интерфейс ПО отделения обескремнивания представлен на рисунке 5.

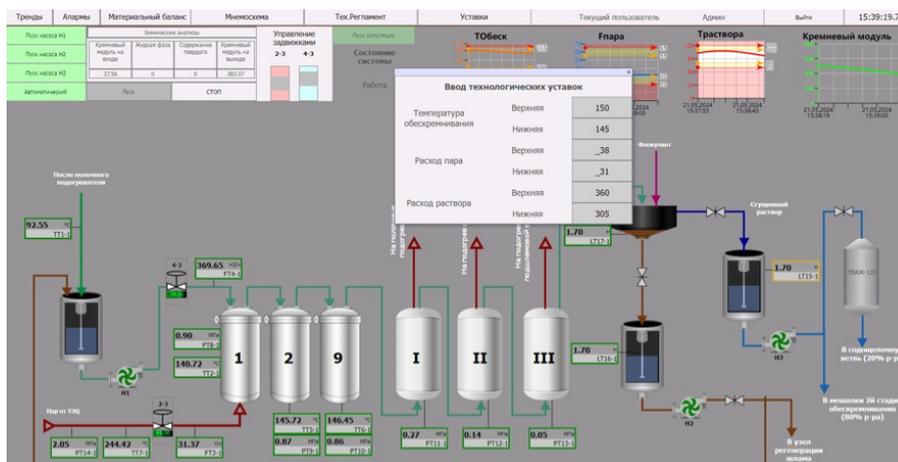


Рисунок 5 - Интерфейс ПО отделения обескремнивания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.12>

Также, был составлен следующий алгоритм расчёта материального баланса и КМ, представленный на рисунке 6.



Рисунок 6 - Алгоритм расчёта материального баланса и КМ  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.37.13>

Последовательность действий алгоритма: оператор вводит результаты химического анализа после отделения выщелачивания, программа получает текущее значение объёмного расхода пара, затравки и раствора, переводит их в массовые расходы, рассчитывает количество ГАСНа, рассчитывает баланс пульпы входящей и выходящей из автоклава, составляет балансовое уравнение и определяет КМ. Для вывода результатов расчёта материального баланса было разработано графическое окно «Материальный баланс», представленное на рисунке 7.

Нажав кнопку «материальный баланс» – открывается окно «материальный баланс», вводим в результаты анализа следующие значения:  $Al_2O_3 = 1800$ ,  $R_{20k} = 1600$ ,  $R_{20y} = 220$ ,  $SiO_2 = 25$ ,  $H_2O = 9000$ .



10. Дим Д.Т. Современные технологии получения алюминия / Д.Т. Дим, А.Ю. Ключин, В.К. Клемайкин // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития. — Чебоксары, 2016. — С. 36–37.
11. Лайнер А.И. Производство глинозема: учеб. пособие / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер и др. — Москва : Metallurgia, 1978. — 344 с.
12. Самарянова Л.Б. Технологические расчеты в производстве глинозема: учеб. пособие для техникумов / Л.Б. Самарянова, А.И. Лайнер. — Москва : Metallurgia, 1981. — 280 с.
13. Певзнер И.З. Обескремнивание алюминатных растворов: учебное пособие / И.З. Певзнер, Н.А. Макаров. — Подольск : Metallurgia, 1974. — 113 с. — URL: <https://cat.gpntb.ru/?id=FT/ShowFT&sid=7abd6c35e2b2f2476e4e9ba074a6d85d> &page=3&query= (дата обращения 18.10.2023)

### Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST R 57700.37–2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Cifrovye dvojniki izdelij. Obshhie polozhenija [Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (accessed: 12.07.2024) [in Russian]
2. Piskazhova T.V. Virtual Aluminum Reduction Cell / V.V. Yurkov, V.Ch. Mann, T.V. Piskazhova [et al.] // Light Metals. — 2001. — P.1259–1266.
3. Yakiv'yuk P.N. Virtual casting and rolling lines development / P.N. Yakiv'yuk, T.V. Piskazhova, V.M. Belolipetskiy [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Volume 537, Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0. — 2019. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/3/032094> (accessed: 12.07.2024)
4. Ivanov R.D. Razrabotka cheloveko-mashinnogo interfejsa dlja upravlenija kaskadom mel'nic pri poluchenii shihty nefelinovoj rudy [Development of a human-machine interface for controlling a cascade of mills in the production of a charge of nepheline ore] / R.D. Ivanov, G.B. Danykina, T.V. Piskazhova [et al.] // Sibirskij ajerokosmicheskij zhurnal [Siberian Aerospace Journal]. — 2022. — Vol. 23. — № 3. — P. 542-550. — DOI: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-542-550. [in Russian]
5. Timofeev A.A. Virtualizacija trubchatogo vyshhelachivatelja pri proizvodstve glinozema [Virtualization of tubular leachate in alumina production] / A.A. Timofeev, G.B. Danykina, T.V. Piskazhova [et al.] // iPolytech Journal. — 2022. — №26(3). — P. 554–565. — DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-554-565. [in Russian]
6. Timofeev A.A. Sovershenstvovanie upravlenija trubchatym vyshhelachivatelem pri proizvodstve glinozema [Improving the management of tubular leachate in the production of alumina] / A.A. Timofeev // Prospekt Svobodnyj [Prospect Svobodnyj] — 2021: proceedings of the XVII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists; Siberian Federal University. — Krasnoyarsk, 2021. — P. 1951–1953. — URL: <https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b72/free/i-209394574.pdf> (accessed: 29.05.2024) [in Russian]
7. Dubovikov O.A. Pererabotka nizkokachestvennogo boksitovogo syr'ja sposobom termohimija-Bajer [Processing of low-quality bauxite raw materials by the thermochemistry-Bayer method] / O.A. Dubovikov, E.E. Yaskelainen // Zapiski Gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]. — 2016. — Vol. 221. — P. 668–674. [in Russian]
8. Abramov V.Ya. Vyshhelachivanie aljuminatnyh spjokov: uchebnik [Leaching of aluminate sinters: textbook] / V.Ya. Abramov, N.I. Eremin. — Moscow : Metallurgy, 1988. — 257 p. [in Russian]
9. Arlyuk B.I. Kompleksnaja pererabotka shhelochnogo aljuminij sodержashhego syr'ja: uchebnik [Complex processing of alkaline aluminum-containing raw materials: textbook] / B.I. Arlyuk, Yu.A. Liner, A.I. Pivnev. — Moscow : Metallurgy, 1994. — 384 p. [in Russian]
10. Dim D.T. Sovremennye tehnologii poluchenija aljuminija [Modern technologies of aluminum production] / D.T. Dim, A.Y. Klyushin, V.K. Klemaiki // Nauka, obrazovanie, obshhestvo: tendencii i perspektivy razvitija [Science, education, society: trends and prospects of development]. — Cheboksary, 2016. — P. 36–37. [in Russian]
11. Liner A.I. Proizvodstvo glinozema: ucheb. posobie [Alumina production: textbook manual] / A.I. Liner, N.I. Eremin, Yu.A. Liner [et al.] — Moscow : Metallurgy, 1978. — 344 p. [in Russian]
12. Samaryanova L.B. Tehnologicheskie raschety v proizvodstve glinozema: ucheb. posobie dlja tehnikumov [Technological calculations in alumina production: textbook. manual for technical schools] / L.B. Samaryanova, A.I. Liner. — Moscow : Metallurgy, 1981. — 280 p. [in Russian]
13. Pevsner I.Z. Obeskremlivanie aljuminatnyh rastvorov: uchebnoe posobie [Desilination of aluminate solutions: a textbook] / I.Z. Pevsner, N.A. Makarov. — Podolsk: Metallurgy, 1974. — 113 p. — URL: <https://cat.gpntb.ru/?id=FT/ShowFT&sid=7abd6c35e2b2f2476e4e9ba074a6d85d> &page=3&query= (accessed: 18.10.2023) [in Russian]