

УДК 004.94

DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-3-0-8

Резников Н.Г.<sup>1</sup>  
Жихарев А.Г.<sup>2</sup>

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЫРЬЕВЫХ  
КОМПОНЕНТОВ В ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫЙ КЛИНКЕР**

<sup>1</sup>) Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Победы д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

<sup>2</sup>) Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород,  
308012, Россия

*e-mail: reznikov\_n@bsu.edu.ru; zhikharev@bsu.edu.ru*

**Аннотация**

В статье рассматривается построение имитационной модели абстрактного процесса преобразования сырьевых компонентов в портландцементный клинкер в среде имитационного моделирования UFOModeler. Разработан алгоритм генерации псевдослучайного оксидного (химического) состава компонентов на основе опытных данных реального производства и расчета для двухкомпонентной и трехкомпонентной сырьевых смесей. Рассмотрен алгоритм расчета основных показателей состава клинкера на основе. Проведен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** сырьевая смесь, клинкер, химический состав, минералогический состав алгоритм генерации химического состава, имитационная модель, системно-объектный подход.

**Для цитирования:** Резников Н.Г., Жихарев А.Г. Применение системно-объектного подхода для имитационного моделирования преобразования сырьевых компонентов в портландцементный клинкер // Научный результат. Информационные технологии. – Т.6, №3, 2021. – С. 58-64. DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-3-0-8

Reznikov N.G.<sup>1</sup>  
Zhikharev A.G.<sup>2</sup>

**APPLICATION OF THE SYSTEM-OBJECT APPROACH TO SIMULATION  
OF THE CONVERSION OF RAW MATERIALS INTO  
A PORTLANDCEMENT CLINKER**

<sup>1</sup>) Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

<sup>2</sup>) Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012,  
Russian Federation

*e-mail: reznikov\_n@bsu.edu.ru; zhikharev@bsu.edu.ru*

**Abstract**

The article discusses the construction of a simulation model of the abstract process of converting raw materials into Portland cement clinker in the UFOModeler simulation environment. An algorithm for generating a pseudo-random oxide (chemical) composition of components based on experimental data of real production and calculation for two-component and three-component raw mixtures has been developed. An algorithm for calculating the main indicators of the composition of clinker based on. The analysis of the obtained results is carried out.

**Keywords:** raw mix, clinker, chemical composition, mineralogical composition, chemical composition generation algorithm, simulation model, system-object approach.

**For citation:** Reznikov N.G., Zhikharev A.G. Application of the system-object approach to simulation of the conversion of raw materials into a portlandcement clinker // Research result. Information technologies. – Т.6, №3, 2021. – P. 58-64. DOI: 10.18413/2518-1092-2021-6-3-0-8

## **ВВЕДЕНИЕ**

В цементной промышленности на качество готового продукта в большей степени влияет состав сырьевых компонентов при условии протекания технологического процесса в установленном технологическим регламентом рабочем режиме. Своевременная корректировка, внесенная в компонентный состав сырьевой смеси, поможет не только избежать выпуска брака, но и сохранить протекающие процессы в оптимальном режиме. Порой, необходимо спрогнозировать изменение различных характеристик цементного клинкера при заранее известном химическом составе сырьевых материалов, что может занять определенное время при ручных подсчетах, к тому же на правильность расчетов могут повлиять неочевидные ошибки в силу человеческого фактора.

Решение такой задачи, очевидно, предполагает построение определенной модели, независимо от выбора методов и инструментов решения. Другими задачами построения такой модели может быть, например, определение возможности работы предприятия с использованием сырьевых материалов непостоянного состава. Для этого может быть использована имитационная модель. Суть имитационного моделирования заключается в компьютерной реализации математической модели изучаемой системы для использования в целях симуляции (имитации) поведения реальной системы [1].

В источнике [2] авторы приводят справедливое замечание: «Необходимость замены изучаемой системы моделью, с достаточной точностью ее описывающей, естественным образом вынуждает использовать системный подход для создания такой модели». Поэтому был выбран системно-объектный метод имитационного моделирования [3], который позволяет рассматривать любую систему или предметную область как совокупность:

- взаимодействующих «перекрестков» с набором входящих и исходящих связей, называемых узлами;
- методов обработки связей узлов, называемых функциями;
- обработчиков связей узлов, называемых объектами.

Построение моделей производственно-технологических процессов на основе УФО-подхода [4], а также имитацию функционирования построенной модели в реальном времени позволяет реализовать программная среда имитационного моделирования UFOModeler.

Актуальность настоящей статьи заключается в построении имитационной модели для решения вышеописанных задач с использованием алгоритмов расчета для сырьевых смесей в области производства цемента, а также расчета некоторых характеристик продукта обжига – клинкера.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Современные предприятия цементной промышленности стараются действовать в рамках концепций энерго- и ресурсосбережения. В связи с этим, на производствах активно применяют шлаки доменные и мартеновские (отходы металлургического производства). В построенной модели (рис. 1) абстрактно рассматривается преобразование сырьевой смеси в готовый продукт, так как для решения поставленных задач важно понимать зависимость между качественными характеристиками входных и выходных потоков, не задумываясь о самом протекании процесса преобразования. Приближаясь к реальному производству завода «AKKERMANN cement» в г. Новотроицк, графоаналитическая модель отражает такие особенности, как:

- первичное смешение основных компонентов: известняка и глины в так называемый «микс», и последующее дозирование трех компонентов в сырьевую смесь;
- в качестве энерго- и ресурсосберегающих добавок использование шлаков доменного и мартеновского производства.



Рис. 1. Графоаналитическая модель преобразования сырьевых компонентов в клинкер  
Fig. 1. Graphic-analytical model of conversion of raw materials into clinker

Сперва рассмотрим связи в системе на примере компонента «известняк», так как все входящие связи имеют сходные параметры (рис.2).

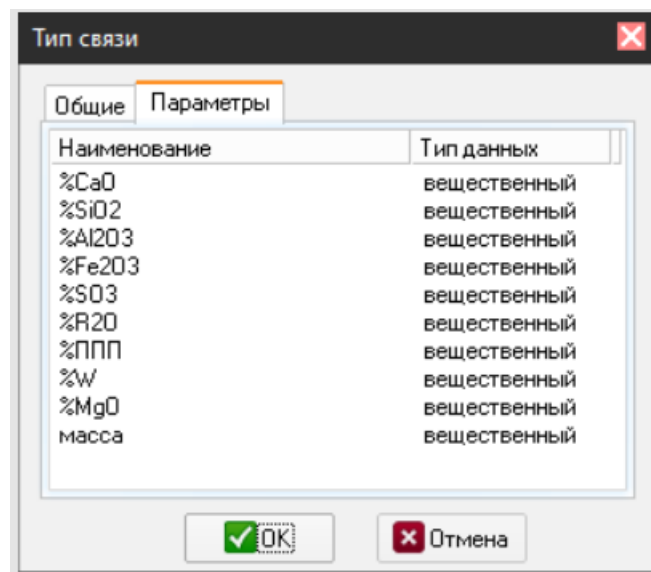


Рис. 2. Параметры входящих связей  
Fig. 2. Input link parameters

Основными минералообразующими оксидами в клинкере являются оксиды кальция (CaO), кремния (SiO<sub>2</sub>), алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). На основании их количества рассчитываются модульные характеристики сырьевой смеси и клинкера такие, как коэффициент насыщения (KH), силикатный (n) и глиноземный (p) модули, которые непосредственно участвуют в расчетах и характеризуют качественные и количественные характеристики сырья и клинкера [5].

В качестве исходных данных были ранее предоставлены данные химического состава 3х проб каждого компонента, результаты которого сведены в таблицу.

Таблица

Table

Химический состав исходных материалов, %

Chemical composition of raw materials, %

№ п/п	Материал	ппп	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
И з в е с т н я к										
1	№ 1	40,75	3,38	0,86	2,58	51,90	0,34	0,08	0,02	0,09
2	№ 2	43,20	0,42	0,25	0,24	55,4	0,45	0,04	0	0
3	№ 3	43,85	0,18	0,13	0,17	55,4	0,26	0,01	0	0
Г л и н а										
4	№ 1	11,67	55,28	12,57	5,59	8,77	1,62	0,42	1,13	2,10
5	№ 2	11,23	51,7	14,4	5,21	9,72	3,32	0,23	0,84	2,27
6	№ 3	12,85	48,6	13,1	5,37	12,2	3,34	0,20	0,77	2,28
Щ е б е н ь ш л а к о в ы й ( д о м е н н ы й )										
7	№ 1	4,67	36,38	9,23	8,10	33,21	5,05	1,14	0,32	0,43
8	№ 2	1,40	38,05	9,83	1,22	42,89	4,01	1,18	0,29	0,51
9	№ 3	0,48	38,4	9,13	0,62	44,4	4,34	1,04	0,30	0,46
Щ е б е н ь ш л а к о в ы й ( м а р т е н о в с к и й )										
10	№ 1	2,54	22,56	3,97	27,56	25,22	9,95	0,44	0,13	0,08
11	№ 2	–	22,48	3,93	18,49	35,46	11,58	0,42	0,03	0,06
12	№ 3	–	20,1	6,72	12,7	32,6	18,8	0,17	0	0

Данные таблицы 1 формируют интервалы, в пределах которых будут сгенерированы псевдослучайные химические составы компонентов.

Пример фрагмента листинга скрипта генерации состава известняка представлен ниже:

```
SetLinkIn('Известняк.%CaO', (random(18)+40+(random(100)/100));
lsCaO:= GetLinkInF('Известняк.%CaO');
SetLinkIn('Известняк.%SiO2', (random(4)+(random(100)/100));
lsSiO2:= GetLinkInF('Известняк.%SiO2');
SetLinkIn('Известняк.%Fe2O3', (random(3)+(random(100)/100));
lsFe2O3:= GetLinkInF('Известняк.%Fe2O3');
SetLinkIn('Известняк.%Al2O3', (random(2)+(random(100)/100));
lsAl2O3:= GetLinkInF('Известняк.%Al2O3');
```

Так как сумма составляющих химического состава в % должна давать 100%, очевидно, что сгенерированный состав в большинстве случаев этому требованию не удовлетворяет. Поэтому после генерации, скрипт ведет пересчет сгенерированного химического состава до 100%:

```
lsSum:= lsCaO+lsSiO2+lsAl2O3+lsFe2O3+lsSO3+lsR2O+lsPPP+lsMgO;
if (lsSum<>100) then
begin
lsCaO:=100*lsCaO/lsSum;
lsSiO2:=100*lsSiO2/lsSum;
lsFe2O3:=100*lsFe2O3/lsSum;
lsAl2O3:=100*lsAl2O3/lsSum;
```

После этого шага имеются все необходимые данные для расчета двухкомпонентной (известняк и глина) и трехкомпонентной (микс, шлак доменный, шлак мартековский) сырьевой смеси. В методике расчета необходимо использовать модульные характеристики в количестве на единицу меньше, чем компонентов в смеси [5]. Соответственно, расчет смеси глины и известняка был проведен по КН, а расчет трехкомпонентной сырьевой смеси – по КН и п.

Скрипт третьего узла ориентирован на расчет химического и минералогического составов клинкера. Фрагмент минералогического состава представлен ниже:

```
SetLinkOut('Клинкер.%C3S', (4.07*clrCaO-7.6*clrSiO2-6.72*clrAl2O3-
-1.42*clrFe2O3));
clrCaO:= GetLinkOutF('Клинкер.%C3S');
SetLinkOut('Клинкер.%C2S', (8.6*clrSiO2+5.07*clrAl2O3+1.07*clrFe2O3-
-3.07*clrCaO));
clrCaO:= GetLinkOutF('Клинкер.%C2S');
SetLinkOut('Клинкер.%C3A', (2.65*clrAl2O3-1.7*clrFe2O3));
clrCaO:= GetLinkOutF('Клинкер.%C3A');
SetLinkOut('Клинкер.%C4AF', (3.04*clrFe2O3));
clrCaO:= GetLinkOutF('Клинкер.%C4AF');
```

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно [2, 3] к количеству основных минералов в клинкере предъявляются следующие требования:

- 3CaO·SiO<sub>2</sub> (C3S-алит) = 40...65%.
- 2CaO·SiO<sub>2</sub> (C2S-белит) = 10...35%.
- 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C3A) = 3...12%.
- 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·F<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C4AF) = 10...17%.

Сравним полученные данные в результате симуляции модели с этими требованиями. На рисунках 3-6 представлены графики изменения C3S, C2S, C3A и C4AF соответственно, в результате изменения состава сырьевой смеси один раз в секунду:

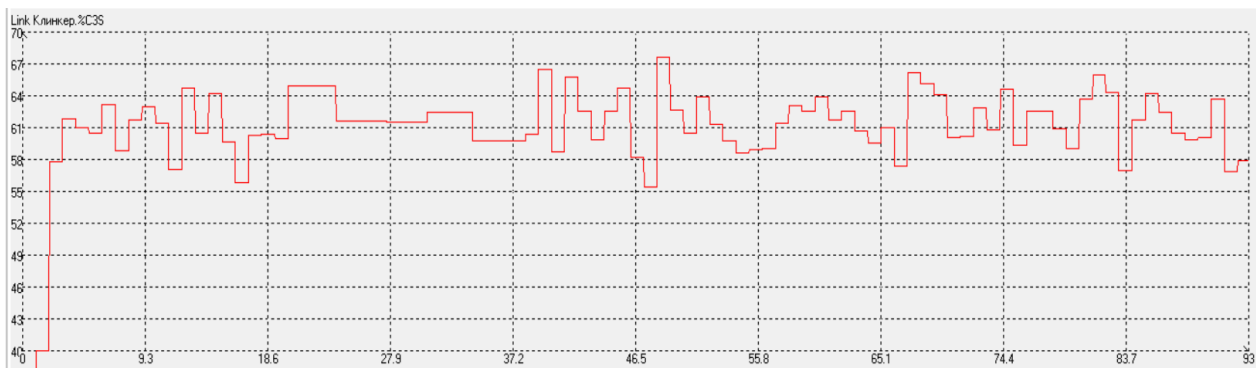


Рис.3. Изменение содержания C3S, %  
Fig. 3. Change of component C3S, %

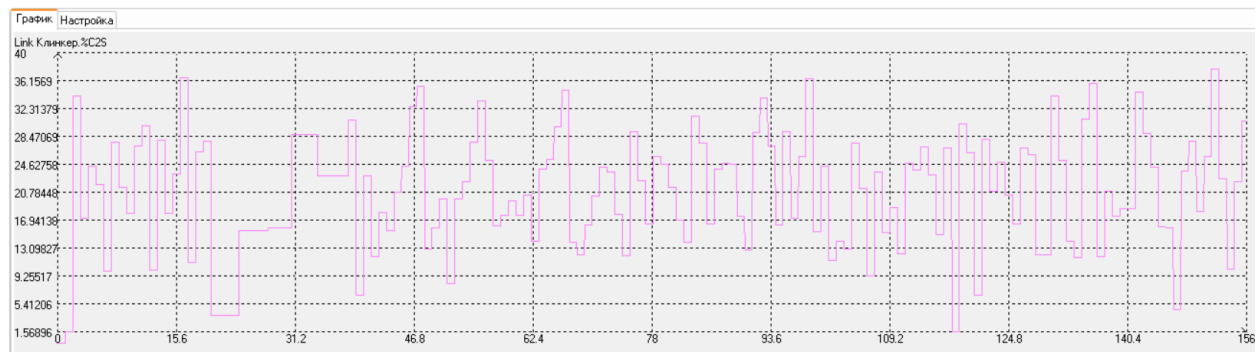


Рис.4. Изменение содержания C2S, %  
Fig.4. Change of component C2S, %

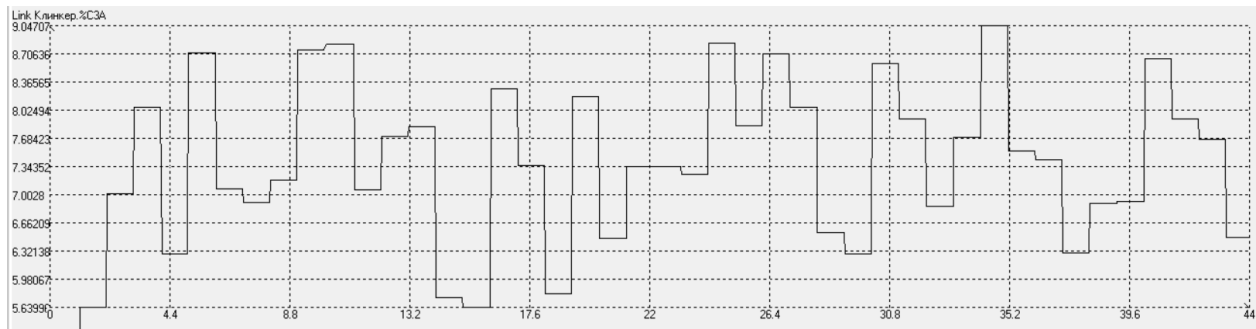


Рис. 5. Изменение содержания С3А, %

Fig. 5. Change of component C3A, %

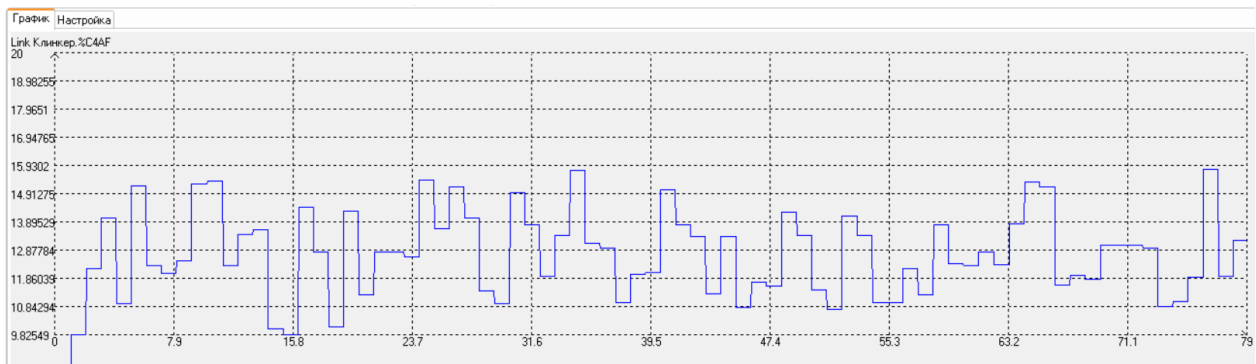


Рис.6. Изменение содержания С4АF, %

Fig.6. Change of component C4AF, %

Графики на рисунках показывают, что содержания основных минералов в клинкере изменяются в пределах допустимых значений. Бывают единичные выпадения из нормальных интервалов, но они немногочисленны и компенсируются при рассмотрении на более длинном промежутке времени, что допустимо. Ведь контроль качества на производстве не производится в режиме реального времени

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотренная модель, построенная с использованием средств в рамках системно-объектного подхода, демонстрирует его эффективность и простоту в рамках описания процессов на низком абстрактном уровне. В то же время подход дает возможность уточнять и усложнять имитационные модели в пределах одних и тех же процессов. Разработанный алгоритм показал свою эффективность в рамках решения описанных во введении задач и может иметь практическое применение на реальном производстве, лишенном соответствующих средств автоматизации.

### **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 19-07-00290, 19-07-00111.

### **Список литературы**

1. Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата // Москва: Издательство Юрайт, 2014. – 89 с.
2. Имитационное моделирование [Электронный ресурс] // URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Имитационное\\_моделирование](https://ru.wikipedia.org/wiki/Имитационное_моделирование).
3. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Егоров И.А., Раков В.И. Применение программного комплекса «UFOModeler» для решения обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с

использованием некоторых численных методов // Научный результат. Сер. Информационные технологии. – 2016. – Т. 1, № 2. – С. 16-20.

4. Жихарев А.Г., Корчагина К.В., Бузов П.А., Акулов Ю.В., Жихарева М.С. Об имитационном моделировании производственно-технологических систем // Научный результат. Сер. Информационные технологии. – 2016. – Т. 1, № 3. – С. 24-31.

5. ГОСТ 10178-85. Межгосударственный стандарт. портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. Дата введения 1987-01-01.

### References

1. Akopov A.S. Simulation modeling: textbook and workshop for academic bachelor's degree // Moscow: Yurayt Publishing House, 2014. – 389 p.

2. Simulation modeling [Electronic resource] // URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Simulation\\_modeling](https://ru.wikipedia.org/wiki/Simulation_modeling).

3. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Egorov I.A., Rakov V.I. Application of the UFOModeler software package for solving ordinary differential equations of the first order using some numerical methods // Research Result. Information Technology. – 2016. – Т. 1, No. 2. – P. 16-20.

4. Zhikharev A.G., Korchagina K.V., Buzov P.A., Akulov Yu.V., Zhikhareva M.S. On imitation modeling of production and technological systems // Reserch result. Information Technology. – 2016. – Т. 1, No. 3. – P. 24-31.

5. GOST 10178-85. Interstate standard. Portland cement and slag Portland cement. Technical conditions. Date of introduction 1987-01-01.

**Резников Никита Григорьевич**, ассистент кафедры информационных и робототехнических систем

**Жихарев Александр Геннадиевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

**Reznikov Nikita Grigorievich**, Assistant of the Department of Information and Robotic Systems

**Zhikharev Alexander Gennadievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software