

УДК 004.94

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

Резников Н.Г.¹
Жихарев А.Г.²**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЫРЬЕВЫХ
КОМПОНЕНТОВ В ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫЙ КЛИНКЕР**¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы д. 85, г. Белгород, 308015, Россия² 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.¹
Zhikharev A.G.²**APPLICATION OF THE SYSTEM-OBJECT APPROACH TO SIMULATION
OF THE CONVERSION OF RAW MATERIALS INTO
A PORTLANDCEMENT CLINKER**¹ Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia² 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).

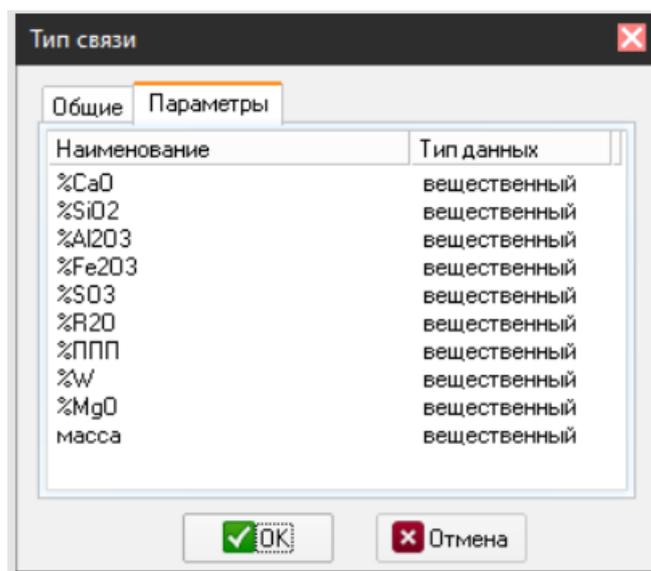


Рис. 2. Параметры входящих связей
Fig. 2. Input link parameters

Основными минералообразующими оксидами в клинкере являются оксиды кальция (CaO), кремния (SiO₂), алюминия (Al₂O₃) и железа (Fe₂O₃). 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 ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ 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 мартеновский) 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·SiO₂ (C3S-алит) = 40...65%.
- 2CaO·SiO₂ (C2S-белит) = 10...35%.
- 3CaO·Al₂O₃ (C3A) = 3...12%.
- 4CaO·Al₂O₃·F₂O₃ (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, %

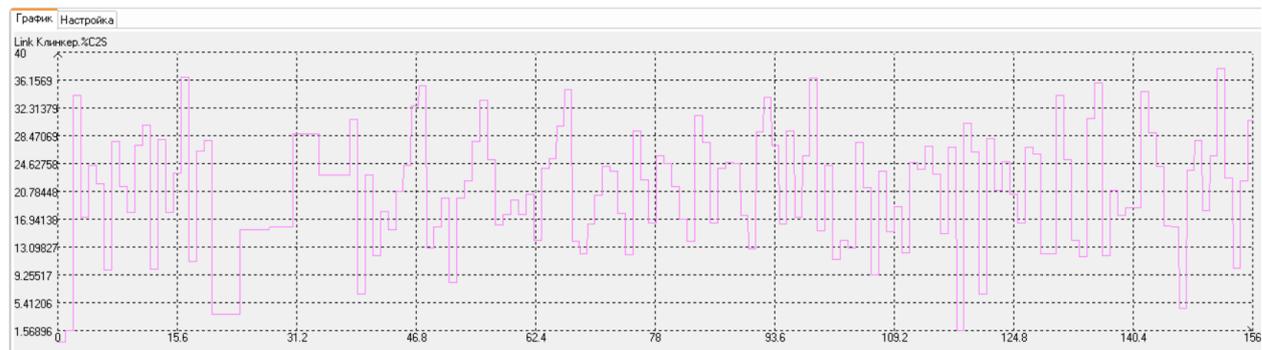


Рис.4. Изменение содержания C2S, %
Fig.4. Change of component C2S, %

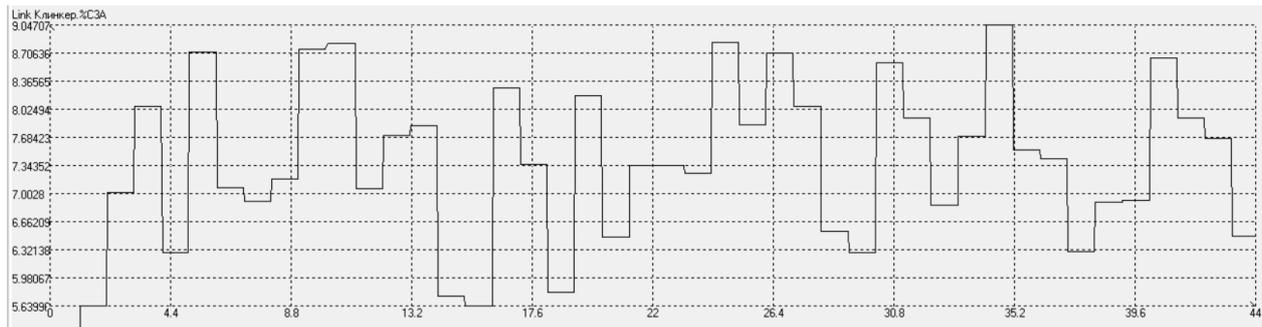


Рис. 5. Изменение содержания С3А, %

Fig. 5. Change of component C3A, %

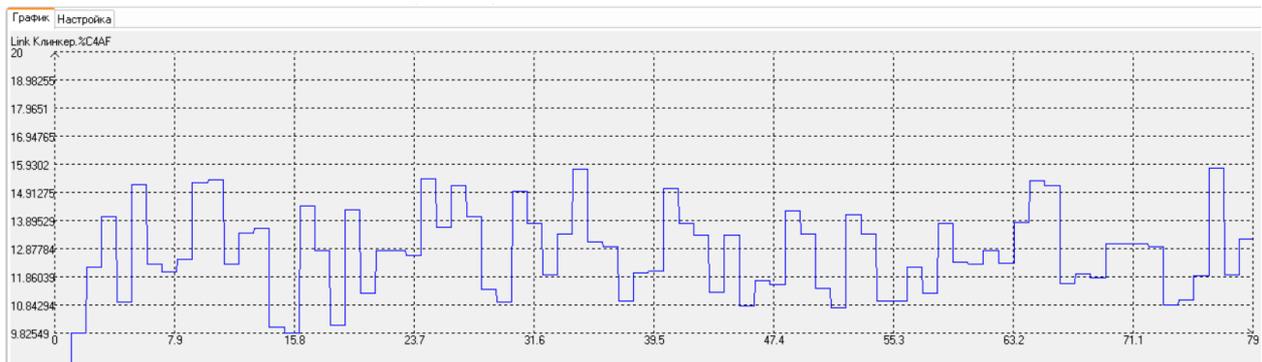


Рис.6. Изменение содержания С4АF, %

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.
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.

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