

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная автоматизация охватывает все уровни производства от автоматизации выполнения отдельных технологических операций до автоматизации целых производств и даже отраслей. Современное *рентабельное* производство немислимо без автоматизации, поэтому данным вопросам уделяют пристальное внимание еще на стадии проектирования. Поскольку на стадии

проектирования объекта еще нет, то приходится иметь дело с моделями. Здесь возникает масса проблем (адекватность модели, риски из-за неадекватности и т.п.), схожих при организации производства разных объектов. Предлагаем вниманию читателей несколько статей, посвященных решению проблем автоматизации производства на стадии проектирования.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Л. М. Яковис (СПбПУ)

Рассматривается проблема совместной разработки технологического комплекса и системы его автоматизации. Намечена общая схема решения задач системного проектирования автоматизированных технологических комплексов. Приведены примеры объектов системного проектирования. Применительно к смесительно-усреднительным комплексам показано, что последовательное применение системного подхода может дать значительный экономический эффект.

Ключевые слова: автоматизированный технологический комплекс, системный подход, система управления, непрерывный технологический процесс.

*Когда в товарищах согласья нет,
На лад их дело не пойдет,
И выйдет из него не дело, только мука.
(«Лебедь, Щука и Рак», И.А. Крылов)*

Введение

Автоматизированный технологический комплекс (АТК) представляет собой совокупность технологической и управляющей систем. Традиционная схема проектирования АТК предусматривает последовательную разработку этих двух составляющих. Вначале специалисты по ТП, обычно не знакомые с автоматикой, формируют технологическую схему и выбирают оборудование. Позже специалисты по автоматизации, рассматривающие полученный от технологов объект автоматизации как неизменяемую часть АТК, принимаются за разработку системы управления (СУ). При такой схеме разработки АТК технологи нередко не учитывают как возможности систем автоматизации, так и требования, выполнение которых обеспечит эффективность автоматизации. В свою очередь, «автоматчики» вынуждены создавать систему автоматизации как некий «довесок» к ТП, который в принципе может функционировать и без такой системы. В целом подобная последовательная схема разработки АТК может приводить к неоптимальным решениям как в части технологических структур и оборудования, так и в части автоматизированного контроля и управления. Рассматриваемая в статье альтернативная схема создания

АТК предусматривает комплексную разработку технологической и информационно-управляющей структур.

Общая проблематика задач системного проектирования АТК

Необходимость системного проектирования АТК все более осознается разработчиками как технологии, так и автоматизации, однако создание методологии такого подхода находится в начальной стадии. Одной из первых работ в области совместной оптимизации динамических операторов объекта и регулятора является статья [1], однако в силу сложности предлагаемых расчетных процедур она имеет главным образом теоретическое значение. В [2] рассматриваются задачи выбора объемов буферных емкостей с учетом возможностей оперативного управления работой и ремонтным обслуживанием оборудования. В [3] изучаются задачи статической многокритериальной оптимизации, возникающие при проектировании химико-технологических процессов с учетом возможностей выбора режимных параметров в ходе эксплуатации технологического объекта. В [4] содержится обширный обзор англоязычных публикаций по интеграции проектирования процессов и управления.

Вместе с тем остается недостаточно изученным широкий класс ТП, для которых на стадии проектирования технологии важно учитывать эффекты стабилизирующего управления, призванного поддерживать заданный режим ТП как по количеству, так и по качеству продукции.

Общая постановка и схема решения задач системного проектирования АТК с учетом требований к количеству и качеству продукции в развернутом виде обсуждается в [5]. Идея заключается в том, что вначале для каждого возможного комплекта технических средств определяется оптимальный по экономическому критерию и допустимый в рамках ресурсных и технологических ограничений вариант управления, а затем из всех вариантов АТК (получаемых путем объединения различных комплектов КТС с соответствующей системой управления) выбирается самый экономичный.

Типичной чертой многих непрерывных процессов является наличие существенных возмущений, обусловленных нестабильностью характеристик поступающих на переработку материалов. Вследствие возмущений возникают отклонения количественных и качественных показателей продукции от расчетных значений, что может приводить к нарушениям ограничений, накладываемых на отдельные показатели ТП. Для предотвращения таких нарушений приходится при решении задачи по определению максимального значения экономического показателя отступать от первоначально заданных допусков. Это достигается ужесточением требований, предъявляемых к характеристикам ТП, тем большим, чем больше нестабильность показателей. При использовании линейных или линеаризованных моделей производственных операций и экономических критериев решение задачи оптимизации лежит на границах допустимых областей, а тогда сужение этих границ ведет к экономическим потерям [6]. Отсюда ясно, что чем эффективнее работает система стабилизации режима ТП, подавляя возмущения, тем меньше экономические потери. В свою очередь, эффективность систем стабилизации зависит от динамических характеристик объекта и управляющей им системы и может быть различной для разных вариантов АТК. Таким образом, учет динамики управляемых технологических операций и прогнозирование эффективности систем стабилизации режима этих операций на ранних стадиях проектирования АТК необходимы в тех областях производства, где существенную роль играют разного рода возмущающие факторы и где различные варианты и параметры технологического комплекса существенно влияют на динамику систем управления.

Для расчетов по системному проектированию АТК необходимы

Совершенствовать надо не процесс, а участника процесса.

Дуглас Энгельбарт

математические модели ТП и возмущающих воздействий. Особенность состоит в том, что для построения таких моделей не могут быть применены методы идентификации, предполагающие использование данных эксплуатации управляемых объектов, так как на стадии проектирования АТК объекты проектирования еще не существуют. Остается возможность применения моделей, базирующихся на представлениях о физике рассматриваемых ТП, а также моделей уже функционирующих аналогов. В ряде отраслей производства (например в нефтепереработке [7] и металлургии [8]) такие модели применяются при разработке тренажеров для технологов-операторов и оптимизации режимов ТП. Облегчающее обстоятельство состоит в том, что расчеты по выбору рациональных параметров и структур АТК делаются на ранних стадиях проектирования, носят ориентировочный характер, а потому могут использовать упрощенные модели процессов.

Примеры объектов системного проектирования

Управляемый ТП с транспортировкой обрабатываемого материала. Рассмотрим непрерывный ТП обработки (измельчение, обжиг, обогащение и т.д.) материального потока (рис. 1). От дозатора до обрабатывающего агрегата материал доставляется транспортером. Необходимо в условиях неконтролируемых возмущений поддерживать на заданном уровне некоторый показатель качества (степень измельчения, температуру, выход полезного вещества и т.д.) путем регулирования расхода направляемого на обработку материала. Управляющий комплекс (УК) регулирует интенсивность материального потока по данным контроля интересующего показателя на выходе обрабатывающего агрегата. Суть примера в том, что от длины транспортера (который является частью КТС) решающим образом зависит запаздывание в контуре управления с обратной связью, а значит, и эффективность управления. Ком-

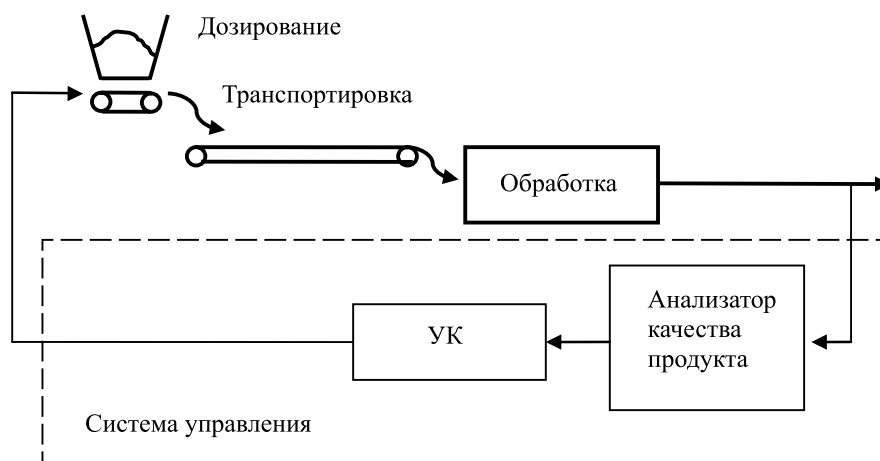


Рис. 1. Управляемый ТП с транспортировкой обрабатываемого материала

понуя технологическую схему без учета этого обстоятельства, можно сильно «подкопать» возможности стабилизации показателей конечного продукта, а это, в свою очередь, может привести к значительным экономическим потерям. Вместе с тем при параллельной схеме разработки АТК могут быть найдены такие решения, которые приблизят дозировочный блок к обрабатываемому агрегату, что улучшит динамические показатели замкнутой системы управления.

Управляемый ТП с двухстадийной обработкой материала и промежуточной емкостью. Пусть теперь обработка материального потока осуществляется по двухстадийной схеме в двух последовательных агрегатах (например, в ряде производств применяется схема двухстадийного измельчения) (рис. 2).

Для повышения надежности функционирования последовательной технологической цепочки между двумя агрегатами помещается буферная емкость. Если, как и в первом примере, управление дозированием осуществляется с обратной связью по данным текущего контроля характеристик продукции, то выбор величины буферной емкости существенно влияет на суммарное запаздывание в контуре управления, то есть на динамические характеристики системы управления. И здесь при интеграции процессов проектирования ТП и СУ должно быть найдено компромиссное решение, обеспечивающее как достаточную надежность функционирования непрерывного двухстадийного процесса, так и приемлемую степень его технологической управляемости.

Далее более подробно рассмотрен еще один типичный класс объектов системного проектирования, где совместный выбор параметров технологии и автоматизации с учетом динамики процессов дает значительный экономический эффект.

Смесительно-усреднительные АТК как объекты системного проектирования

Смесительно-усреднительные АТК предназначены для получения материалов с заданными стабильными показателями путем механического смешивания ряда исходных материальных потоков с различными и изменяющимися во времени свойствами. Указанная цель достигается как за счет целенаправленного управления интенсивностями потоков смешиваемых материалов, так и за счет сглаживания случайных возмущений при принудительном усреднении каждого из компонентов и (или) приготавливаемой смеси в оборудованных системами гомогенизации буферных емкостях [9].

Типичная схема приготовления смеси (рис. 3) включает последовательность непрерывных технологических операций усреднения исходных материалов, их дозирования в смеситель и окончательного усреднения полученной смеси. Система управления осу-

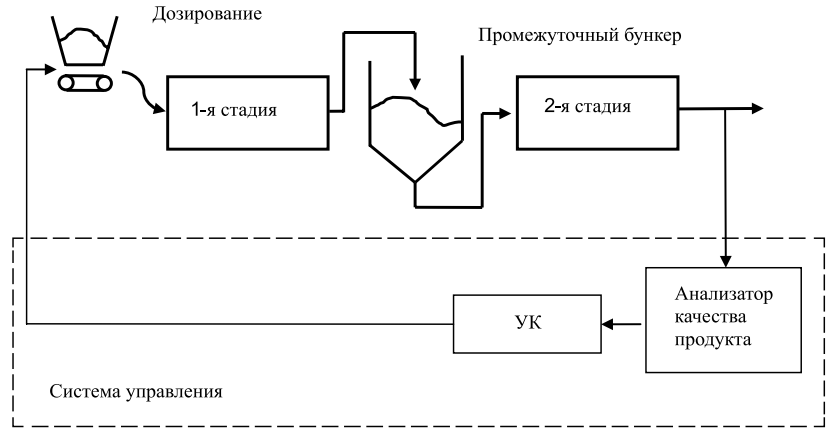
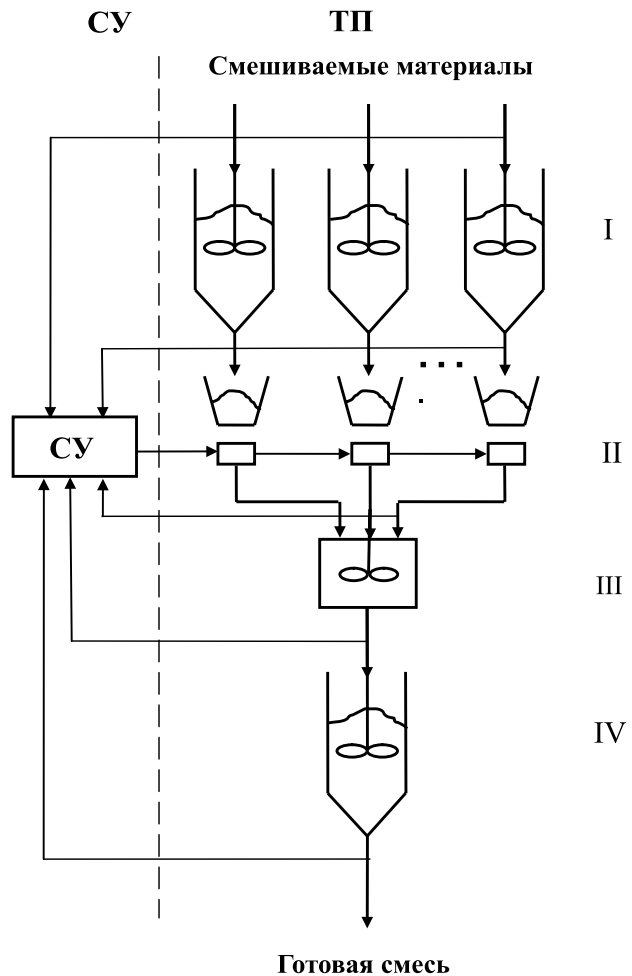


Рис. 2. Управляемый ТП с двухстадийной обработкой материала



I – предварительное усреднение; II – дозирование; III – смешивание; IV – окончательное усреднение; СУ – система управления

Рис. 3. Схема АТК приготовления многокомпонентной смеси

ществляет регулирование пропорций смешиваемых материалов по данным контроля свойств и расходов материалов в разных точках технологической линии.

Важной составной частью проблемы системного проектирования технологических схем смесеприготовления является задача выбора оптимальных объемов

усреднительных емкостей, обеспечивающих производство кондиционной смеси при наименьших затратах. Такой выбор должен осуществляться с учетом возможностей АСУ приготовлением смесей и исходить из условия минимизации суммарных затрат на создание и эксплуатацию усреднительных сооружений. Основу рассматриваемых расчетных методов составляет динамическая модель процесса смесеприготовления, базирующаяся на соотношениях материального баланса [9].

Применительно к конкретным объектам проектирования с естественными источниками минерального сырья вероятностные характеристики случайных возмущений получают путем статистической обработки данных геологоразведки соответствующих месторождений (или (и) месторождений аналогичной геологической структуры), а также по паспортным данным соответствующих проекту дозаторов и приборов контроля. В более общем варианте используются данные действующих объектов-аналогов.

Согласно общей схеме для каждого первоначально отобранного для анализа набора варьируемых параметров КТС ATK необходимо дать расчетную оценку достижимой (с учетом управления) степени стабильности показателей продукта смешивания и, сравнив ее с заданными предельными значениями, выяснить, допустим ли данный вариант. Наконец, среди всех принципиально пригодных вариантов КТС следует выбрать наиболее экономичный по затратам. Практическая реализация рассмотренной методики была осуществлена в рамках человеко-машинной процедуры применительно к смесительно-усреднительным ATK цементного производства [9]. В настоящее время для анализа и оптимизации смесительно-усреднительных ATK разработан программный комплекс (ПК) в среде Matlab-Simulink. С использованием ПК могут выполняться многовариантные расчеты при проектировании или модернизации цементных заводов, позволяющие дать обоснованные рекомендации при выборе типа, числа и размеров усреднительных емкостей, типа и характеристик средств контроля, структуры и параметров системы управления [5].

Расчет параметров автоматизированных комплексов приготовления двухкомпонентных смесей

Для сравнения аналитическими методами альтернативных подходов к проектированию ATK рассмотрим упрощенный вариант управляемой смесительно-усреднительной системы (рис. 4). Будем полагать, что смесь составляется из двух различных материалов, каждый из которых, как и составляемая из них смесь, характеризуется одним показателем β . Усреднительно-накопительную систему для сглаживания флуктуаций состава смеси будем рассматривать в виде работающего в проточном режиме идеального смесителя со временем заполнения T , чему соответствует передаточная функция инерционного звена первого порядка

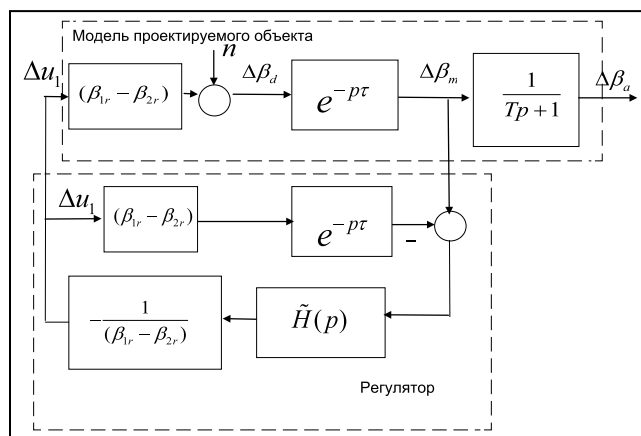


Рис. 4. Блок-схема системы управления приготовлением двухкомпонентной смеси, где $\Delta u_1, \Delta \beta_d, \Delta \beta_m, \Delta \beta_a$ - отклонения от номинальных (режимных) значений массовой доли первого компонента (управляющее воздействие), а также показателей состава смеси на выходе блока дозирования, смесителя и усреднительно-накопительной емкости; n - случайные возмущения со среднеквадратичным отклонением σ_n и длительностью спада корреляционной функции T_n (показатель плавности случайного процесса), вызванные вариациями состава смешиваемых материалов; β_{1r} и β_{2r} - средние значения показателей состава первого и второго компонентов смеси; τ - запаздывание; T - длительность заполнения усреднительно-накопительной емкости; $\tilde{H}(p)$ - оператор прогноза возмущений на время запаздывания.

$$\beta_a = \frac{1}{Tp + 1} \beta_m.$$

Из теории оптимального управления следует, что минимальная дисперсия выходной переменной достигается за счет выделения, оптимального прогноза и компенсации приведенных к выходу неконтролируемых возмущений [9]. Эти функции осуществляет регулятор, показанный на рис. 4.

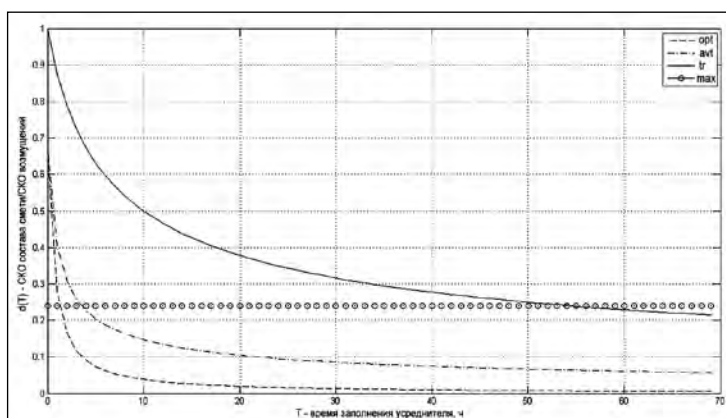


Рис. 5. Зависимость усреднительной способности ATK от емкости усреднителя при разных способах управления, где *opt* - оптимальное управление, минимизирующее СКО состава смеси на выходе усреднительно-накопительной емкости; *avt* - управление, минимизирующее СКО состава смеси на выходе смесителя; *tr* - отсутствие управления; *max* - максимальный допустимый уровень нестабильности состава смеси.

Численный пример. Выполним расчеты для конкретных значений параметров, характерных для цементного производства. Будем полагать:

$$\beta_{1r} = 50\%, \beta_{2r} = 5\%, \sigma_n = 2,1\%, T_n = 3,3 \text{ ч}, \tau = 1 \text{ ч}, \sigma_{\beta_a}^{\max} = 0,5\%.$$

Далее с использованием приведенных в [10] соотношений могут быть сформированы безразмерные зависимости $d^{opt}(T) = \sigma_{\beta_a}^{opt}(T) / \sigma_n$, $d^{tr}(T) = \sigma_{\beta_a}^{tr}(T) / \sigma_n$ и $d^{avt}(T) = \sigma_{\beta_a}^{avt}(T) / \sigma_n$, определяющие достижимые показатели стабильности выходного продукта участков смешивания и усреднения при трех различных тактиках проектирования АТК. Графики этих зависимостей приведены на рис. 5.

Там же графически найдены значения параметра T , определяющего требуемую емкость усреднительной системы. Отвечающие разным схемам проектирования значения T могут быть получены на пересечении соответствующих кривых с горизонталью, проведенной на уровне $\sigma_{\beta_a}^{\max} / \sigma_n = 0,24$. В итоге имеем $T^{opt} = 1,25 \text{ ч}$, $T^{tr} = 54,7 \text{ ч}$, $T^{avt} = 3,55 \text{ ч}$. При производительности технологической линии 100 м/ч емкости усреднителей должны составлять $P^{opt} = 125 \text{ м}$, $P^{tr} = 5470 \text{ м}$, $P^{avt} = 355 \text{ м}$. Поскольку $\sigma_{\beta_a}^{opt}(0) / \sigma_n = 0,67 > 0,24$, то ясно, что в отсутствие усреднительной системы автоматика не может обеспечить требуемую степень стабильности состава смеси. Из расчетов видно, что последовательное применение системного подхода, вариант *opt*, позволяет в несколько раз или даже в несколько десятков раз уменьшить закладываемые в проекты объемы усреднительно-накопительных емкостей, варианты *avt* и *tr*, что напрямую связано со значительной экономией средств при реализации проектов АТК.

Заключение

В статье применительно к АТК непрерывных производств рассмотрена проблема совместной разработки объекта управления и управляющей им системы. Выявлен экономический смысл такого совместного рассмотрения и показано, каким образом могут ставиться и решаться проблемы подобного рода. Реализация предлагаемой методики рассмотрена применительно к смесительно-усреднительным АТК. На примере АТК сырьевых переделов цементных заводов пояснена особая актуальность системного проектирования для многотоннажных производств, связанных с переработкой не однородного по свойствам природного сырья. Приведены результаты расчетов, показывающие, что последовательное применение системного подхода позволяет «в разы» уменьшить закладываемые в проекты объемы усреднительно-накопительных емкостей, что влечет значительную экономию как капитальных затрат, так и эксплуатационных расходов.

Яковис Леонид Моисеевич – д-р техн. наук, проф. Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Контактные телефоны: (812) 759-71-21, +7 921 578-34-67.

E-mail: leonid@yakovis.com

Особую актуальность тематике предварительно-го расчетного анализа различных вариантов АТК придает то обстоятельство, что в настоящий период большая часть оборудования и автоматики приобретается за рубежом, причем инофирмы заинтересованы продать заказчику наиболее дорогостоящие комплекты. В этих условиях предварительная сравнительная экспертиза различных предлагаемых проектных решений «в сборе» может принести отечественным инвесторам серьезный экономический эффект.

Список литературы

1. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Синтез САУ в допустимом множестве динамических характеристик объекта управления и управляющих подсистем // Техническая кибернетика. 1980. №6. С. 126-135.
2. Гельфанд Я.Е., Лурье Я.М., Савицкий Ю.П. Выбор размеров буферных емкостей в химико-технологических схемах с учетом стратегий управления ремонтами // Автоматика и телемеханика. 1980. №1. С. 138-145.
3. Островский Ю.М., Волин Г.М. Многокритериальная оптимизация технологических процессов в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. № 3, 2007, с. 165-180.
4. Sharifzadeh, M. Integration of process design and control: A review // Chemical Engineering Research and Design. 91(12), 2013, pp. 2515-2549.
5. Яковис Л.М., Герок С.А. Системный подход к проектированию автоматизированных технологических комплексов (на примере управляемых процессов приготовления многокомпонентных смесей) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, №1 (140), 2012, с. 98 -106.
6. Яковис Л.М. От единого информационного пространства к единому пространству управления производством // Автоматизация в промышленности, № 1, 2013, с. 20 -26.
7. Дозорцев В. М., Агафонов Д. В., Назин В. А., Новичков А. Ю., Фролов А. И. Компьютерный тренинг операторов: непреодолимая актуальность, новые возможности, человеческий фактор//Автоматизация в промышленности, № 5, 2015, с. 8 -20.
8. Генкин А. Л., Власов С. А., Кравцов С. В., Волочек Н. Г., Никулина И.В. Имитационное моделирование в интегрированном управлении металлургическими комплексами // Сборник докладов Третьей всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2007), том II, 2007, с. 47-51.
9. Яковис Л.М. Многокомпонентные смеси для строительства: Расчетные методы оптимизации состава // Л.: Стройиздат. 1988. 296 с.
10. Yakovis L.M., Chechurin L.S. Systematic design of automated processing complexes // Proceedings of International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), June 23 - 26, 2015, Wolverhampton, West Midlands, United Kingdom, Volume 1, Pages 438-445.