

**РЕГУЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ  
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

**Тигарев А.М.**, к.т.н., доцент,  
*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова*  
amtigar@ukr.net

**Тигарева Т.Г.**,  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
tigra9000@yandex.ru

**Аннотация.** Развитие строительной индустрии требует создания новых строительных материалов, обладающих заданными прочностными характеристиками и минимальной массой. Характеристики материалов в значительной мере зависят от качества смешивания их компонентов. Рассмотрены методы контроля качества смешивания порошковых компонентов полимерных композитных материалов. Предложено использование радиоизотопного метода анализа в системе регулирования качества смешивания компонентов непосредственно в ходе технологического процесса. Предложена система регулирования качества смешивания порошковых компонентов, выполнено её моделирование в программном пакете MATLAB-Simulink. Результаты моделирования позволяют предложить подобную систему для внедрения в производство.

**Ключевые слова:** полимерные композитные материалы, качество смешивания компонентов, радиоизотопный датчик, дисперсный состав, система регулирования смешивания.

**РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ  
ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ  
В ПРОЦЕСІ ЇХ ВИРОБНИЦТВА**

**Тігарєв А.М.**, к.т.н., доцент,  
*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова*  
amtigar@ukr.net

**Тігарєва Т.Г.**,  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
tigra9000@yandex.ru

**Анотація.** Розвиток будівельної індустрії вимагає створення нових будівельних матеріалів, що володіють заданими характеристиками міцності та мають мінімальну масу. Характеристики матеріалів залежать в значній мірі від якості змішування їх компонентів. Розглянуто методи контролю якості змішування порошкових компонентів полімерних композитних матеріалів. Запропоновано радіоізотопний метод аналізу, який можливо використовувати для регулювання якості змішування компонентів безпосередньо в процесі виробництва. Запропоновано систему регулювання якості змішування порошкових компонентів, виконано її моделювання в програмному пакеті MATLAB-Simulink. Результати моделювання дозволяють запропонувати подібну систему для впровадження у виробництво.

**Ключові слова:** полімерні композитні матеріали, якість змішування компонентів, радіоізотопний датчик, дисперсний склад, система регулювання змішування.

# REGULATION OF POLYMER COMPOSITE BUILDING MATERIAL MIXING COMPONENTS QUALITY IN THE PRODUCTION PROCESS

**Tigariev A.M.**, PhD., Assistant Professor,  
*Odessa A.S. Popov National Academy of Telecommunications*  
amtigar@ukr.net

**Tigarieva T.G.**,  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
tigra9000@yandex.ru

**Abstract.** The development of the construction industry requires creation of new materials with specified strength characteristics and minimal weight. The characteristics of materials largely depend on the quality of mixing their components. Two main technological processes are: mixing different powder fillers and mixing obtained mixture with polymers. In both processes, the required quality must be ensured.

The quality of mixing of powder materials is characterized by obtaining a homogeneous mixture (the dispersion composition of the sample, taken in any volume, must coincide with average dispersion composition of mixture).

The radioisotope method of analysis that can be used to control the quality of mixing components directly in the production process was suggested in the article. The control system of the powdery components mixing process was proposed, the simulation in the software MATLAB-Simulink was performed. The simulation results allow us to propose a similar system for implementation in the production process.

**Key words:** polymer composite materials, quality of mixing components, radioisotope sensor, disperse composition, control system of mixing.

**Введение.** При разработке новых технологий изготовления строительных материалов часто возникает необходимость значительного улучшения прочностных характеристик изделий при минимизации их массы. Для решения этой задачи при производстве строительных конструкций применяют композитные материалы на полимерной основе. За последние годы достигнуты значительные успехи в программировании свойств таких материалов. Тем не менее, при производстве и переработке композитов существенная роль пока принадлежит интуитивному подходу, а количественные оценки весьма ограничены.

Полимерные композитные материалы (ПКМ) состоят из полимеров и наполнителей. Введение наполнителей в полимеры преследует, как правило, одну из трех целей:

- 1) повышение механической прочности и твердости полимеров;
- 2) снижение себестоимости полимерных материалов;
- 3) придание полимерам специальных свойств (снижение горючести, улучшение фрикционных, электрических, теплофизических, адгезионных и других характеристик).

В качестве наполнителей могут использоваться различные материалы после придания им соответствующей структуры, формы и размеров. Обычно наполнителями являются порошковые материалы [1, 2]. Количество, природа, размеры и форма частиц дисперсного наполнителя определяются целью и задачами создания ПКМ, размерами изделия и технологиями производства материалов и изделий из них.

Влияние дисперсного наполнителя на механические и прочие свойства полимера зависит в значительной степени от свойств самого наполнителя. Среди этапов производства ПКМ одним из наиболее важных является смешивание. При этом существует два основных технологических процесса смешивания: смешивание различных порошковых наполнителей и смешивание полученной смеси с полимерами. В обоих случаях необходимо обеспечивать требуемое качество смешивания и его стабилизацию в ходе технологического процесса.

**Цели и задачи.** Целью работы является разработка системы регулирования качества смешивания наполнителей при производстве композитов на основе полимерных материалов. Основными задачами являются выбор современного датчика, способного работать в сложных условиях производства строительных материалов, разработка модели системы регулирования и её моделирование с учетом различных возмущающих воздействий.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследования является технологический процесс смешивания компонентов при производстве композитных материалов. Предметом исследования является система регулирования качества однородности смеси на этапе смешивания порошковых компонентов композитных строительных материалов. Методы исследования: при решении поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, имитационное моделирование системы регулирования на основе программного пакета MATLAB-Simulink с использованием пропорционально-интегральных (ПИ) и пропорционально-интегральных-дифференциальных (ПИД) регуляторов.

Известны следующие методы оценки качества смешивания материалов: весовой, рассевом на ситах и оптический. Первый и второй методы позволяют определять коэффициент неоднородности смеси, компоненты которой различаются по весу или по размеру частиц. При использовании оптического метода определение концентраций ключевого компонента проводится на основе сравнительного анализа способности компонентов смеси поглощать, отражать и преломлять свет. Существует также оценка качества смешивания по срезу готового изделия с последующей обработкой полученного изображения. К недостаткам перечисленных способов следует отнести их трудоемкость и значительные затраты времени на проведение анализа качества смешивания.

Основным показателем качества смешивания порошков является получение однородной смеси, проба которой, взятая в любом ее объеме, соответствует среднему дисперсному составу. Современные критерии оценки качества смеси (степень смешивания) основаны на методах статистического анализа.

Известно, что наиболее просто смешиваемый материал оценивается одной случайной статистической величиной (средним диаметром частиц, медианой, дисперсией распределения по размерным параметрам и пр.) [3]. Для оценки качества смешивания одной случайной величиной смесь условно считают двухкомпонентной. Для этого выделяют из смеси один компонент, называемый ключевым, а все остальные объединяют во второй условный компонент. В качестве ключевого компонента выбирают такой компонент, который либо легко анализируется, либо его распределение в смеси особенно важно по технологическим требованиям.

В большинстве критериев, применяемых для оценки однородности смеси присутствует в той или иной интерпретации статистический результат пробоотбора смеси: размах значений концентрации компонентов, дисперсии значений концентрации ключевого компонента, вероятность отклонения значений концентрации от среднего значения и др. Наиболее часто в качестве критерия оценки качества смеси применяется коэффициент неоднородности [3, 4].

**Анализ исследований и публикаций.** Рентгеноспектральные и радиоизотопные приборы, основанные на поглощении излучения исследуемой средой [5, 6], известны более 50-ти лет, но сведения об их использовании для оценки качества смеси и, тем более, для управления качеством смешивания в технологических процессах, в доступных источниках не обнаружены. Современные, более совершенные, приборы [6-9] дают возможность применять их для оценки качества смеси и использовать в системах регулирования.

Задачей регулирования процесса смешивания является поддержание заданного состава смеси. Обычно регулирование выполняется путем дозирования компонентов и стабилизацией скорости вращения смесителя или смесительных органов в течение определенного времени. Количество компонентов обычно бывает 5 и более. При этом вследствие неточности дозирования или колебаний дисперсного состава компонентов наблюдается либо недостаточное смешивание, либо, при излишне длительном смешивании,

происходит сегрегация в смеси. Контроль качества смешивания, как правило, выполняется периодически, длительными лабораторными методами через определенные интервалы времени, что вносит значительное запаздывание и ухудшает качество смешивания, и, в конечном итоге, качество готового композитного материала. Такая ситуация была обусловлена недостаточным развитием и внедрением экспресс-методов контроля непосредственно в ходе технологического процесса (ТП) смешивания. Учитывая достоинства рентгеноспектральных и радиоизотопных методов, предлагается использовать их для оценки качества смешивания в ходе ТП. Безусловно, при использовании рентгеноспектральных методов наилучшим является применение промышленного томографа, позволяющего получить наиболее полную информацию о распределении компонентов в объеме смеси. Однако его применение требует разработки специальных методов и устройств для пробоотбора смеси компонентов. Кроме того, стоимость томографов достаточно высока.

Более приемлемым решением является применение радиоизотопных плотномеров, которые способны работать в тяжелых производственных условиях и, самое главное, могут работать непрерывно в ходе ТП, без осуществления дополнительного периодического пробоотбора. Поэтому предлагается использовать радиоизотопный плотномер для измерения плотности смеси, от которой зависит степень поглощения смесью  $\gamma$ -излучения [7, 8]. Для этого в зоне выгрузки смесителя на конвейер устанавливаются источник  $\gamma$ -излучения, которое ослабляется смесью и регистрируется приемником, расположенным с противоположной стороны конвейера. Известно [5], что ослабление потока  $\gamma$ -излучения описывается приближенно экспоненциальным законом:

$$J = J_0 e^{-\mu_m \rho D}, \quad (1)$$

где  $J_0$  – поток  $\gamma$ -излучения, регистрируемый приемником при отсутствии смеси;

$J$  – поток излучения, прошедшего через слой смеси и ленту конвейера общей толщиной  $D$ , см;

$\mu_m$  – массовый коэффициент поглощения, см<sup>2</sup>/г;

$\rho$  – суммарная плотность смеси и ленты конвейера, г/см<sup>3</sup>.

В случае сложного химического состава смеси (поглотителя) выражение для массового коэффициента поглощения имеет вид:

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n k_i \mu_{m_i}, \quad (2)$$

где  $k_i$  – весовая концентрация  $i$ -го компонента вещества;

$\mu_{m_i}$  – массовый коэффициент поглощения излучения  $i$ -м компонентом.

При выборе источника  $\gamma$ -квантов их энергия должна быть достаточно высокой, не менее примерно 0,5 Мэв (обычно используются изотопы кобальт-60 или цезий-137) [5, 6]. Это обусловлено толщиной конвейерной ленты и необходимостью обеспечения достаточно малых погрешностей измерения плотности перемешиваемой смеси.

Точность измерения прошедшего потока излучения зависит от плотности упаковки частиц в зоне измерения [3, 4]. Примем, что при статистически рыхлой упаковке [3] в зоне измерения (т.е. при максимальной плотности упаковки  $\varphi_{max} = 0,6$ ), суммарная плотность смеси в зоне измерения, с учетом рецептуры обычно составляет  $\rho_{ном.} = 2,8 \dots 3,0$  г/см<sup>3</sup> (на основании расчета степени поглощения каждого компонента и геометрии измерительного объема).

**Результаты исследований.** Применение радиоизотопного плотномера позволит оценивать качество смешивания и останавливать процесс при достижении стабильного значения прошедшего потока излучения, либо выполнять регулирование путем изменения частоты вращения смесителя или его рабочих органов. Предлагаемый способ регулирования смешения компонентов подходит для применения в смесителях непрерывного типа.

В зависимости от вида компонентов смеси, их физических и технологических свойств,

назначения изделий и других факторов время смешивания может колебаться от нескольких минут до нескольких часов. Чем сложнее состав смеси и чем сильнее отличаются смешиваемые компоненты по плотности, форме и дисперсности частиц, тем более длительно проходит смешивание.

При постоянной скорости вращения смесителя либо его рабочих органов управление смешиванием в смесителях периодического действия выполняется достаточно просто: для этого после загрузки компонентов контролируется значение поглощения  $\gamma$ -излучения и при достижении им постоянной величины выполняется выгрузка смеси. В смесителях непрерывного действия степень смешивания можно регулировать путем одновременного изменения загрузки компонентов, либо изменением частоты оборотов вращения смесителя или его рабочих органов. Недостатком первого способа является сложность управления одновременным изменением точности дозирования различных компонентов, поскольку дозаторы обычно имеют различную конструкцию. В случае второго способа регулирования стабилизируют производительность дозаторов (что гораздо проще) и изменяют частоту оборотов смесителя. Для имитационного моделирования ТП смешивания двигатель смесителя с редуктором представлен звеном с передаточной функцией:

$$W_{\text{дв}} = \frac{k_{\text{дв}}}{Ts+1}, \quad (3)$$

где  $k_{\text{дв}}=20$  – коэффициент передачи двигателя с редуктором;  
 $T=10$  с – постоянная времени;  
 $s$  – переменная преобразования Лапласа [10].

Выражение  $Ts+1$  характеризует динамические свойства двигателя с редуктором. Смеситель представлен апериодическим звеном второго порядка с передаточной

функцией: 
$$W_{\text{смес}} = \frac{k_{\text{смес}}}{T_1s^2 + T_2s^2 + 1}, \quad (4)$$

где  $k_{\text{смес}}=0,068$  – коэффициент передачи двигателя смесителя;  
 $T_1=0,5$  с и  $T_2=10$  с – постоянные времени динамики перемешивания в смесителе.

Моделирование смесителя при номинальном количестве оборотов рабочего органа  $\omega=40$  об/с и при возмущениях  $\pm 20\%$  от номинального показывает, что изменение плотности смеси относительно номинальной  $\rho_n=2,8$  г/см<sup>3</sup> составляет  $\pm 0,7$  г/см<sup>3</sup> (рис. 1).

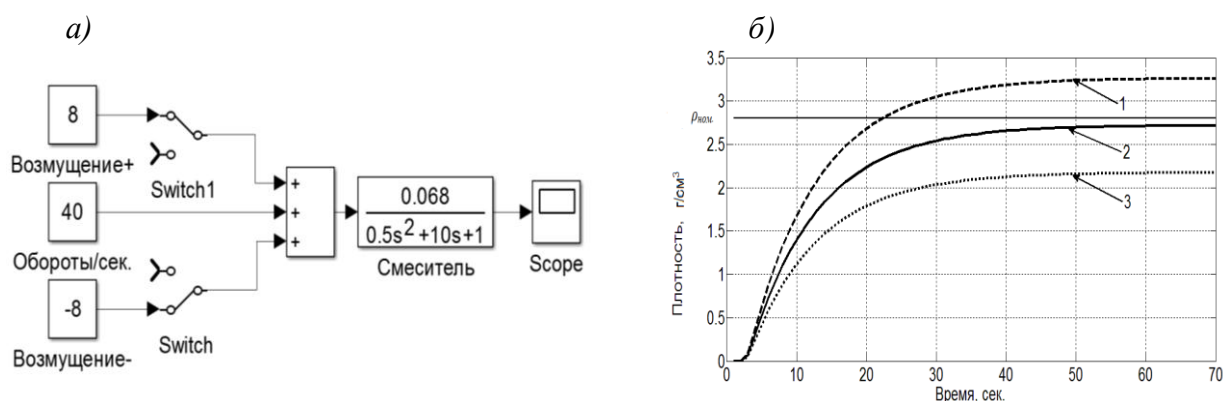


Рис. 1. Модель смесителя (а) и результаты моделирования (б):

1 – возмущение 48 об/с; 2 – номинальный режим 40 об/с; 3 – возмущение 32 об/с

Для стабилизации степени смешивания разработана математическая модель системы регулирования по отклонению с отрицательной обратной связью в программном пакете MATLAB-Simulink [11] при использовании ПИ и ПИД регуляторов. В этой модели датчик упрощенно представлен звеном запаздывания с постоянной времени  $\tau=10$  с (рис. 2).

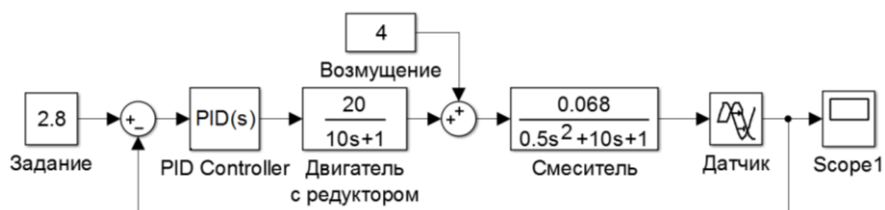


Рис. 2. Модель системы регулирования смешиванием компонентов

Проведенное моделирование предложенной системы регулирования в программном пакете MATLAB-Simulink показало, что время регулирования ( $t_{рег} \approx 200c$ ) и точность поддержания плотности смеси ( $\Delta_{откл} \approx \pm 0,02\rho$ , г/см<sup>3</sup>) обеспечивает стабилизацию качества смешивания при изменениях частоты оборотов смесителя (рис. 2), что наглядно видно при сравнении графиков на рис. 1б и рис. 3.

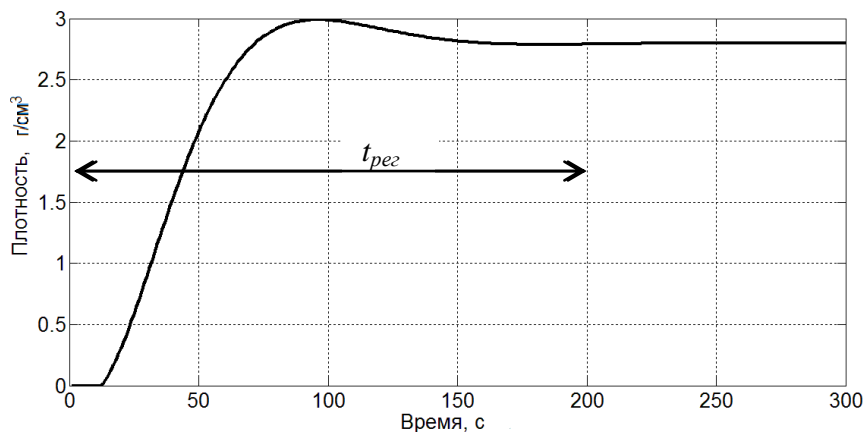


Рис. 3. Кривая переходного процесса системы регулирования смешивания компонентов

Для оценки влияния возмущающих воздействий, действующих на систему регулирования, на основе предположения, что отклонения точности дозирования подчиняются нормальному закону распределения, была разработана модель возмущений, учитывающая колебания дозирования компонентов. Моделирование возмущения по влажности было построено на предположении о линейном нарастании влажности от 2% до 15% при хранении смешиваемых порошковых компонентов. С учетом влияния этих возмущающих воздействий проведено моделирование системы регулирования смешивания (рис. 4).

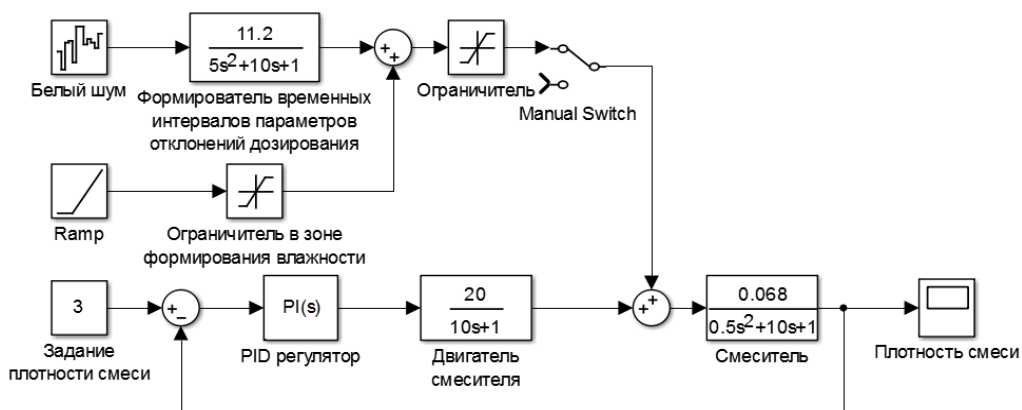


Рис. 4. Модель системы регулирования смешивания компонентов с учетом возмущений

Для оценки возможности применения системы регулирования при изменении состава компонентов проведено моделирование с заданиями различных плотностей смеси от 2,4 г/см<sup>3</sup> до 3,5 г/см<sup>3</sup> (рис. 5) с учетом возмущений.

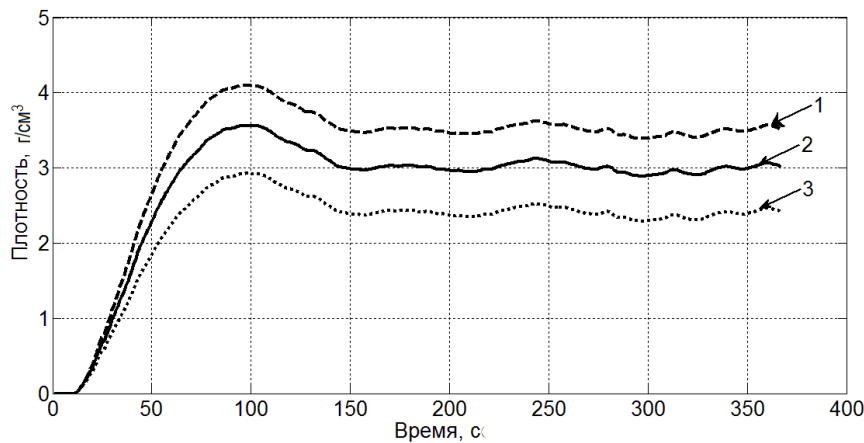


Рис.5. Моделирование системы регулирования с ПИД регулятором при наличии возмущений при заданных плотностях компонентов:  
 $1 - \rho = 3,5 \text{ г/см}^3$ ;  $2 - \rho = 3 \text{ г/см}^3$ ;  $3 - \rho = 2,4 \text{ г/см}^3$

**Выводы.** Проведенное моделирование системы регулирования с учетом возмущений в пределах  $\pm 5\%$  показывает, что отклонение  $\Delta\rho = 0,25 \text{ г/см}^3$  от заданного значения плотности смеси не превышает  $\pm 0,3\%$  (рис. 5).

Результаты моделирования доказывают, что предложенную систему с радиоизотопным плотномером в качестве датчика оценки степени смешивания можно рекомендовать для применения в технологических процессах смешивания компонентов полимерных материалов. Система регулирования позволит повысить качество смешивания, сократить время смешивания, благодаря чему снизятся энергозатраты и улучшатся экономические показатели производства.

### Литература

1. Строительное материаловедение: Учеб. пособие для строит. спец. вузов / И.А. Рыбьев. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.
2. Белов В.В. Строительные композиты из оптимизированных минеральных смесей: монография / В.В. Белов, М.А. Смирнов. – Тверь: ТвГТУ, 2012. – 112 с.
3. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов: Монография / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
4. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: [учебное пособие] / В.В. Белов, И.В. Образцов, В.К. Иванов, Е.Н. Коноплев. – Тверь: ТвГТУ, 2015. – 102 с.
5. Неразрушающий контроль. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева в 8-ми томах. Т. 1. Кн. 2: Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 560 с.
6. Журнал MEGATECH #2-3 2013 Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности [Электронный ресурс] /. – Режим доступа: [http://www.iamega.ru/pdf/megatech\\_02\\_03\\_2013.pdf](http://www.iamega.ru/pdf/megatech_02_03_2013.pdf)
7. Плотномер радиоизотопный ПРИЗ-Т [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://tetra.ua/production/radioisotope\\_apparatus/priz-t/](http://tetra.ua/production/radioisotope_apparatus/priz-t/) (дата обращения: 12.10.2016)
8. Плотномер радиоизотопный ПР-1026М [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://v-kip.com/plotnomer-radioizotopniy-pr-1027m> (дата обращения: 9.01.2017)
9. Density Measurement with Uni-Probe LB 491 [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <https://www.berthold.com/en/pc/density-measurement/uni-probe-lb-491> (дата обращения: 4.02.2017)
10. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребне, М.Э. Сальвадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
11. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 784 с.

Стаття надійшла 30.01.2017