УДК 621.9.015

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА POLYJET ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАСТЕР-МОДЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Балякин А.В., Вдовин Р.А., Добрышкина Е.М., Курбатов В.П.

Самарский Государственный национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Самара, e-mail: dobryshkina93@mail.ru

Непрерывное развитие аддитивных технологий позволяет использовать их при изготовлении моделей сложной конфигурации с высокой точностью. Однако многие производители не предоставляют никаких указаний к параметрированию оборудования для достижения оптимальных результатов. В связи с этим настоящая статья посвящена исследованию влияния технологических режимов процесса PolyJet на шероховатость поверхности фотополимерных изделий. В статье рассмотрено влияние расположения образцов на столе построения на следующие параметры линейной усадки, на размерную точность получаемых образцов и на механические свойства синтезируемого материала. Был составлен план полнофакторного эксперимента, связанного с поиском оптимальных условий и параметров технологического процесса послойного выращивания образцов. Были построены: регрессионная модель технологического процесса выращивания в зависимости от геометрических размеров и линейной усадки; регрессионная модель технологического процесса выращивания в зависимости от твердости; регрессионная модель технологического процесса выращивания в зависимости от прочностных свойств. На основе анализа результатов проведенных экспериментов подобраны оптимальные режимы и дана рекомендация по расположению модели на платформе построения с учетом влияния на шероховатость поверхности, точность воспроизведения геометрии детали и прочностные свойства. Проведенные исследования позволили повысить качество получаемых изделий и уменьшить процент брака при изготовлении лопаток турбины.

Ключевые слова: аддитивные технологии, фотополимерные изделия, шероховатость поверхности, линейная усадка, механические свойства, синтезируемый материал

ANALYSIS OF POLYJET PROCESS PARAMETERS FOR MANUFACTURING MASTER MODELS BY THE PLANNING OF THE EXPERIMENT

Balyakin A.V., Vdovin R.A., Dobryshkina E.M., Kurbatov V.P.

Samara State National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University), Samara, e-mail: dobryshkina93@mail.ru

Continuous development of additive technologies makes it possible to use them in manufacturing of complex shape models to a high precision. However, many manufacturers do not provide any instructions for equipment parametrization with view to achieving optimal results. In this regard, the article focuses on the study of the influence of PolyJet process technological conditions on the surface roughness of photopolymer parts. The article deals with the influence of the samples arrangement on the construction table on linear shrinkage parameters, dimensional accuracy of the obtained samples, and mechanical properties of synthesized material. A plan for a full factorial experiment related to the search of optimal conditions and technological process parameters of layer growth is represented. The estimation of dimensional accuracy, linear shrinkage, material hardness and mechanical properties influence on the regression model of layer growth technological process is given. Based on the analysis of experiment results, the optimal technological conditions have been selected. With the surface roughness, geometry accuracy and strength properties taken into account, recommendations on the model location on the construction table are given. The research has made it possible to raise the quality of products and to reduce the defect ratio. Researches witch have carried out have allowed to raise quality of received products and reduce the percent of defect in the fabricating turbine's vanes.

Keywords: additive technologies, photopolymer products, surface roughness, linear shrinkage, mechanical properties, synthesized material

В последнее время в условиях частых изменений конструкции при многономенклатурном производстве хорошо зарекомендовала себя технология быстрого прототипирования [1–3], которая легко адаптируется под изготовление деталей сложной формы [4, 5], к которым относятся лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). Особенностью данной технологии является изготовление мастер-модели с помощью установки послойного выращивания. По полученной мастер-модели изготавливается силиконовая эластичная форма для литья восковых модельных масс. При использовании такой технологии первая восковая модель получается в среднем через 5 рабочих дней, в то время как при традиционной технологии этот этап занимает от 3 до 6 месяцев.

Особо ответственным этапом является изготовление физического прототипа по его 3D цифровой модели. Для этого в своей работе мы подробно рассматриваем технологию PolyJet [6, 7], которая используется в установке послойного выращивания Objet Eden 350. Для получения мастер-моделей лопаток статора ГТД требуемого качества были сформулированы основные требова-

ния: литейные радиусы сопряжений профильных поверхностей с поверхностями полок 2 ± 0,2 мм, Ra 1,6 мкм, допуск формы профилей в сторону утолщения профиля 0,2 мм, в сторону утонения – 0,15 мм. Для выполнения представленных выше требований были исследованы получаемая шероховатость поверхности мастер-модели, режимы выращивания (Matte или Full Glossy), основные механические характеристики при проведении прочностных испытаний в зависимости от расположения синтезируемых моделей на платформе построения установки.

Целью данного исследования является определение взаимосвязей между параметрами установки Objet Eden 350 и качеством получаемой мастер-модели по технологии PolyJet и механическими свойствами печатной детали. Данные исследования проводились в соответствии с методом полного факторного эксперимента.

Материалы и методы исследования

Анализ прочностных свойств и стабильности получения геометрических размеров в зависимости от ориентации на платформе построения был проведен на 3D печатной системе Objet Eden 350. В качестве основного (модельного) фотополимерного материала использовался прозрачный материал Transparent – FullCure720.

Измерение шероховатости поверхности всех образцов проводилось на профилографе Hommel – Etamic Tester W55. Определение твердости по Либу исследуемых образцов производилось с помощью портативного ударного твердомера Hardness Tester TH160. Испытание на разрыв производилось с помощью универсальной испытательной машины Testometric FS 150 AX.

Исследование влияния технологических режимов установки послойного выращивания на шероховатость поверхности фотополимерных изделий

Исследование шероховатости поверхности выращенных образцов проводилось для подбора наиболее оптимальной ориентации и параметров процесса выращивания для получения изделий требуемой чистоты поверхности. В соответствии с ГОСТ [8] были спроектированы и пронумерованы 36 образов. Каждый из них обладал отличными от других свойствами: расположение на платформе построения, характер материала поддержки, матовая или глянцевая поверхность. В таблице представлены все возможные комбинации значимых параметров, используемых в эксперименте. С помощью программного обеспечения Objet Studio на виртуальной платформе 3D принтера Objet Eden 350 все образцы были расположены в строгом соответствии с таблицей и выращены по технологии PolyJet при постоянных параметрах (скорость – 12 мм/час и толщина слоя – 16 мкм) из фотополимерного материала, с варьированием материала поддержки. Все параметры изготовления прототипа на 3D-печатной системе Objet Eden 350 были заданы относительно технологической инструкции ТИ.001, разработанной Самарским университетом [9]. После выращивания возможно оценить точность получаемых образцов и на шероховатость.

Как известно [10], на шероховатость поверхностей значительным образом оказывает влияние ступенчатый метод выращивания деталей, который используется во всех технологиях, относящихся к аддитивному производству. Ввиду того, что установка выращивает деталь послойно, то существенное влияние на шероховатость будет оказывать ориентация образа на платформе построения выращиваемого слоя.

На полученных образцах с целью минимизации влияния случайных параметров исследуемого процесса на конечный результат эксперимента необходимо провести серию опытов при одних и тех же условиях – рандомизировать опыты во времени [11]. Таким образом, число исследуемых образцов необходимо увеличить до 72 штук. Каждый образец подвергался измерению шероховатости в двух направлениях (по горизонтали и по вертикали), оно проводилось с помощью профилометра Hommel Wave.

Анализ результатов измерения шероховатости показал, что наименьшая шероховатость была достигнута на образцах под номерами: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 28, 29, 30. Это свидетельствует о том, что модели при выращивании необходимо располагать максимальным размером вдоль оси X и минимальным вдоль оси Y (направление, перпендикулярное плоскости выращивания). При этом желательно, чтобы покрытие поверхности было глянцевым (Full Glossy). Количество материала поддержки в процессе выращивания значительного влияния не оказывает на шероховатость получаемой поверхности. Образцы, изготовленные вертикально (номера 19, 20, 21, 31, 32, 33), имеют наиболее грубую шероховатость поверхности. Подобного расположения моделей на платформе построения необходимо избегать.

Исследование влияния линейной усадки и ориентации моделей на размерную точность изделий, изготовленных по технологии PolyJet

Для определения свободной линейной усадки и оценки стабильности геометрических размеров в количестве 72 штук были изготовлены образцы из фотополимерного материала путем послойного выращивания на 3D принтере Objet Eden 350 по технологии PolyJet.

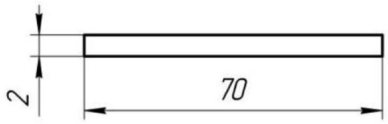
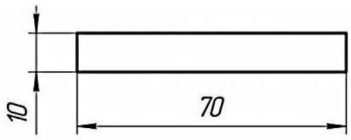
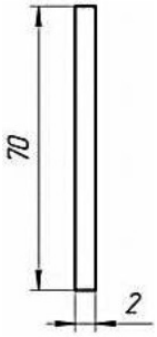
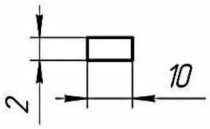
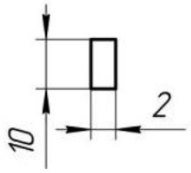
Температура материала в процессе выращивания образцов составила 75 °C. Для накопления статистических данных образцы выращивались в 2 этапа, по 36 штук в каждом этапе. Время выращивания образцов каждого этапа составило 5 часов. Температура хранения образцов составила 17…19 °C. Наружные измерения линейных размеров (длина, ширина, высота) образцов производились с помощью гладких микрометров МК с диапазоном измерений 0–25, 25–50 и 50–75, имеющих цену деления 0,01 мм и допустимую погрешность ± 0,004 мм.

Измерения образцов и расчет величин свободной линейной усадки, проводились по формуле

$$\alpha_l = (l_0 - l) / l_0, \quad (1)$$

где l_0 – соответствующий размер на 3D модели, мм;
l – соответствующий размер на образце после усадки, мм.

Варианты сочетаний параметров процесса выращивания
и ориентация образцов на платформе построения

№ п/п	Характер расположения образца на платформе построения	Характеристика поверхности	Использование материала поддержки
1		Matte (матовая)	Lite (min)
2			Heavy (mid)
3			Default (max)
4		Full Glossy (глянцевая)	Lite (min)
5			Heavy (mid)
6	→ направление выращивания		Default (max)
7		Matte (матовая)	Lite (min)
8			Heavy (mid)
9			Default (max)
10		Full Glossy (глянцевая)	Lite (min)
11			Heavy (mid)
12	→ направление выращивания		Default (max)
13		Matte (матовая)	Lite (min)
14			Heavy (mid)
15			Default (max)
16		Full Glossy (глянцевая)	Lite (min)
17			Heavy (mid)
18	→ направление выращивания		Default (max)
19		Matte (матовая)	Lite (min)
20			Heavy (mid)
21			Default (max)
22		Full Glossy (глянцевая)	Lite (min)
23			Heavy (mid)
24	→ направление выращивания		Default (max)
25		Matte (матовая)	Lite (min)
26			Heavy (mid)
27			Default (max)
28		Full Glossy (глянцевая)	Lite (min)
29			Heavy (mid)
30	→ направление выращивания		Default (max)
31		Matte (матовая)	Lite (min)
32			Heavy (mid)
33			Default (max)
34		Full Glossy (глянцевая)	Lite (min)
35			Heavy (mid)
36	→ направление выращивания		Default (max)

Проведенный анализ показал, что наиболее стабильные геометрические размеры с минимальными отклонениями от номинала присущи образцам: 5, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 28. Данные образы соответствуют вариантам, при которых выращиваемая модель располагается максимальным габаритом вдоль оси X в плоскости XY. Желательно, чтобы покрытие поверхности было матовым. Необходимо отметить, что с увеличением габаритного размера (длины) отклонение от номинала сокращается. Самое большее отклонение линейного размера образца соответствует диапазону от 0 до 55 мм. Наименьшее отклонение линейного размера соответствует диапазону более 50 мм. Данный факт необходимо учитывать на этапе проектирования 3D моделей отливок деталей.

Исследование влияния расположения моделей на механические свойства синтезируемого материала

Механические свойства определяют конструкционную прочность материалов. В численном виде они характеризуют поведение материалов под действием внешних нагрузок, что позволяет их сравнивать между собой и рационально выбирать материалы для изготовления различных изделий. К основным механическим свойствам материала относятся: прочность, жесткость, упругость, пластичность, твердость, ударная вязкость.

Испытания на твердость являются одними из самых распространенных видов механических испытаний. Требования к качеству испытуемой поверхности зависят от метода испытаний и обычно предполагают ее шлифование и даже полирование. Измерение проводилось с помощью портативного ударного твердомера Hardness Tester TH160. При измерении проводилось три повторения (три точки) на каждом образце. В результате HL – это прямое, стандартизированное (ASTM A956) измерение твердости. Результаты измерений образцов из фотополимерного материала FullCure 720 представлены на рис. 1.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшей твердостью обладают образцы с номерами 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 28, 29. Данные образцы соответствуют ориентации синтезируемой модели на платформе построения установки Eden 350 максимальным габаритным размером вдоль осей X или Y. Поверхность покрытия образца и характер материала поддержки не оказывает особого влияния на твердость.

Механические свойства определяются по результатам механических испытаний стандартных образцов материалов. Каждое из этих испытаний отличается схемой нагружения образца, преобладающим направлением возникающих в образце напряжений, типом разрушения образца [12]. В результате статистических испытаний определяют прочностные, упругие и пластические свойства материалов.

Испытание на растяжение было проведено на разрывной машине Testometric FS 150 AX. Растяжению подверглись все образцы, в количестве 72 штук. Результаты испытаний представлены на рис. 2.

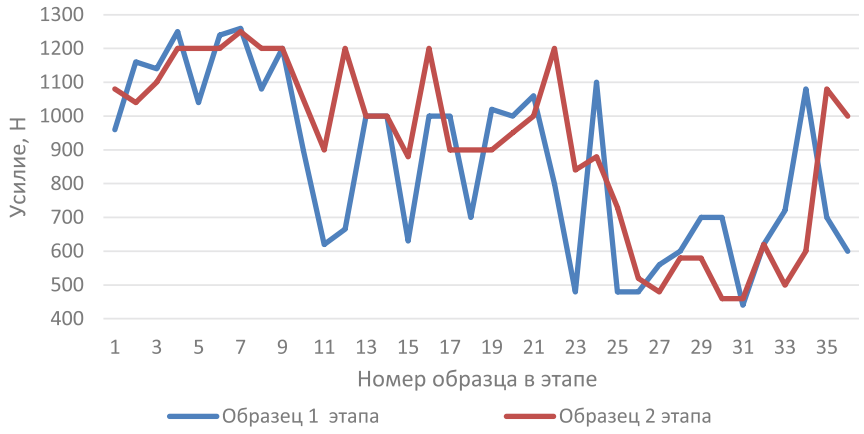
Анализ результатов, полученных при испытании на растяжение образцов из фотополимерного материала, показал, что наиболее высокие прочностные и пластические свойства материала FullCure 720 наблюдаются у образцов с номерами 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Данные образцы характеризуются расположением максимальным габаритом вдоль оси X на платформе построения установки Objet Eden 350. Как показали результаты исследования, покрытие поверхности образцов и характер материала поддержки существенного влияния на прочностные свойства влияния не оказывают.

Результаты исследования и их обсуждение

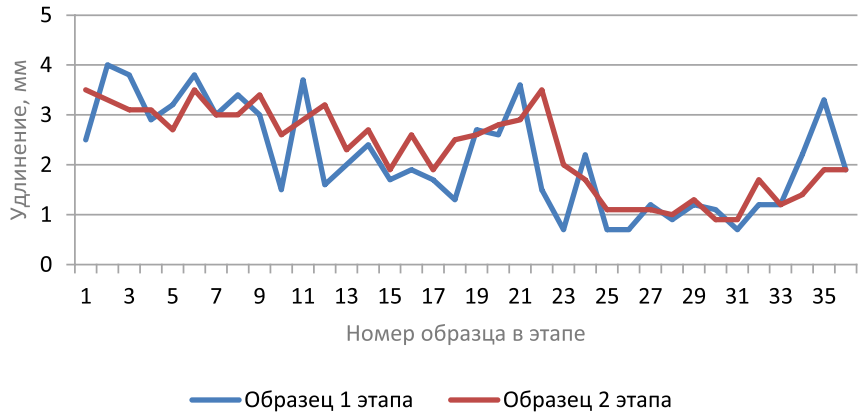
Проведение многофакторного эксперимента, связанного с поиском оптимальных условий и параметров технологического процесса послойного выращивания деталей, осуществлялось в соответствии с моделью полного факторного эксперимента. На основании экспертных оценок была собрана вся необходимая априорная информация, анализ которой позволил выбрать экспериментальную область факторного пространства [19, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. На основании теоретических сведений были рассчитаны коэффициенты регрессионной модели:

$$b_0 = 27{,}77;\ b_1 = 4{,}85;\ b_2 = 1{,}19;\ b_3 = -1{,}44;$$
$$b_{12} = 0{,}94;\ b_{13} = -1{,}35;\ b_{23} = -0{,}1;\ b_{123} = -0{,}02.$$

Рис. 1. Результаты измерения твердости образцов по Либу (HL)



а)



б)

Рис. 2. Результаты испытания на растяжение образцов: а – диаграмма усилия (Н); б – диаграмма удлинения образца (мм)

На основании предложенной методики [13] доверительный интервал коэффициентов регрессии равен 0,19. Из этого следует, что статистически значимые коэффициенты – b0, b1, b2, b3, b12, b13. Статистически незначимые коэффициенты (в данном случае b_{23}, b_{123}) из модели можно исключить.

Таким образом, регрессионная модель процесса в кодированных переменных имеет вид

$$Y = 27{,}77 + 4{,}85X_1 + 1{,}19X_2 - 1{,}44X_3 +$$

$$+ 0{,}94\, X_1\, X_2 - 1{,}35\, X_1\, X_3.$$

Аналогичным образом были построены:

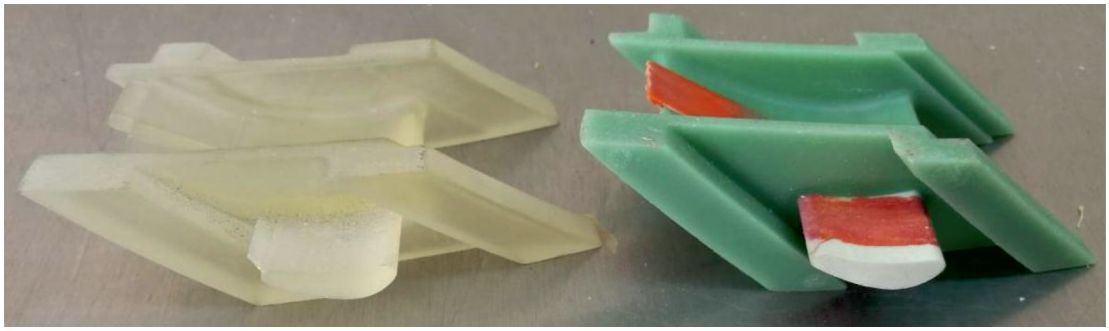
– регрессионная модель технологического процесса выращивания в зависимости от геометрических размеров и линейной усадки;

– регрессионная модель технологического процесса выращивания в зависимости от твердости;

– регрессионная модель технологического процесса выращивания в зависимости от прочностных свойств.

Выводы

Анализируя комплексно результаты, можно сделать вывод, что для процесса послойного выращивания изделий на установке Objet Eden 350 по технологии PolyJet основное влияние на шероховатость поверхности, точность воспроизведения геометрии детали, прочностные свойства прототипа (или в ряде случаев конечного изделия), а также твердость имеет расположение модели на платформе построения наибольшим габаритным размеров вдоль оси *X* – вдоль направления движения печатающего блока. При невозможности такого расположения – модель можно расположить максимальным габаритным размером вдоль оси Y, что приведет к незначительной потери качества. Данному выводу соответствуют образцы с номерами 5, 7, 8, 9.



а) *б)*

Рис. 3. Мастер-модель (а) и восковая модель (б) лопатки статора турбины ГТД

Опираясь на результаты исследований, представленных выше, была разработана методика получения мастер-моделей по технологии PolyJet трактовых деталей ГТД (рис. 3, а). Используя методы быстрого прототипирования [4, 14], разработан технологический процесс получения восковых моделей охлаждаемых лопаток статора турбины (рис. 3, б) по мастер-модели, что позволило снизить время технологической подготовки производства, себестоимость изделия при неизменном качестве.

Исследования были проведены на оборудовании ЦКП CAM-технологий (RFMEFI59314X0003). Эта работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Список литературы

1. Добрышкина Е.М. Использование технологий быстрого прототипирования при изготовлении лопаток статора компрессора / Е.М. Добрышкина, Р.А. Вдовин, В.Г. Смелов, А.В. Балякин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции. – 2016. – С. 32–34.

2. Добрышкина Е.М. Исследование применения технологий быстрого прототипирования для изготовления лопаток турбины ГТД / Е.М. Добрышкина, А.В. Балякин, Р.А. Вдовин, В.П. Алексеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4–6. – С. 1168–1172.

3. Шумков А.А. Применение технологии быстрого прототипирования в изготовлении медицинских имплантатов / А.А. Шумков // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22876 (дата обращения: 06.07.2018).

4. Балякин А.В. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания / А.В. Балякин, В.Г. Смелов, Л.А. Чемпинский // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2012. – № 3–2 (34). – С. 47–52.

5. Белов П.С. Технология создания 3d-моделей и изготовления опытных образцов с помощью быстрого прототипирования / П.С. Белов, О.Г. Драгина, Д.Ю. Никифоров // Технология машиностроения. – 2014. – № 6. – С. 34–36.

6. Смирнов Д.А. Анализ технологии печати 3d моделей FDM и POLYJET / Д.А. Смирнов, И.П. Баландюк // Наука и производство Урала. – 2015. – № 11. – С. 112–113.

7. Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2017 – № 48–49 – С. 84–88.

8. ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент». Введ. 01.01.1986. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 10 с.

9. Техническая инструкция на изготовление прототипа детали на 3D-печатной системе Objet EDEN 350 из фотополимера семейства Full Cure / А.В. Балякин, Р.А. Вдовин. – 2016. – 8 с.

10. Vieira L.F., Paggiand R.A., Salmoria G.V. Thermal and dynamic-mechanical behavior of FullCure 3D printing resin post-cured by different methods. In: Proceedings of (he 5th international conference on advanced research in virtual and rapid prototyping, Leiria, 28 September-1 October 2011 Boca Raton: CRC Press, 2011.

11. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

12. Механические испытания материалов. Методы испытаний: [лабораторный практикум по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов»] / сост. А.Э. Козловский, В.В. Бойцова. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2007. – 60 с.

13. Хаймович И.Н. Математическое моделирование материалов и процессов / И.Н. Хаймович, Е.Г. Демьяненко. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 82 с.

14. Agapovichev A.V., Balaykin A.V., Smelov V.G. Application of additive technologies in the production of aircraft engine parts // Modern applied science. – 2015. – Т. 9, № 4. – С. 151–159.