

---

---

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 621.01

**ВЫБОР И ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОМОЩИ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ИННОВАЦИЙ  
НА БАЗЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА**© 2019 г. Д. Л. Раков<sup>1,\*</sup>, Р. Ю. Сухоруков<sup>1</sup>, М. А. Печейкина<sup>2</sup><sup>1</sup> *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, г. Москва, Россия*<sup>2</sup> *Московский энергетический институт, г. Москва, Россия*

\* e-mail: rdl@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

В статье рассматривается применение прогрессивного морфологического подхода в качестве автоматизированной системы поддержки инноваций (Computer-Aided Innovation – CAI) при выборе и оценке новых технологических решений. Основной целью подхода является расширение ряда потенциальных вариантов, кластеризация и эффективный выбор для синтеза пространства решений с целью увеличения уровня обоснованности инновационных решений при проектировании. Предлагаемый метод основан на кластерном анализе и теории множеств, составлении набора правил для максимизации потенциального уровня разрабатываемых технологий. Применение подхода продемонстрировано на ряде примеров. Рассматривается анализ и выбор технологических решений, технологических процессов и систем управления для установок микродугового оксидирования и технологических процессов для измельчения пенополиуретанов.

*Ключевые слова:* технологические решения (ТР), автоматизация инновационных процессов, автоматизированная поддержка инноваций, CAI (computer-aided innovation), пространство решений, прогрессивный морфологический подход

DOI: 10.1134/S0235711919020123

**Введение.** При заданных ресурсах (затратах) эффективность создаваемых технологических систем (ТС) определяется прогрессивностью нововведений, которые закладываются на стадии анализа и синтеза технологических решений (ТР). Синтез и обоснование параметров технологических систем в основном осуществляется на этапах технического предложения и эскизного проекта. Согласно [1], в перечень работ, выполненных на этой стадии, входят: выявление вариантов возможных технологических решений и их проработка (глубина такой проработки должна быть достаточной для сравнительной оценки рассматриваемых ТР); проверка вариантов на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформление заявок на изобретения; сравнительная оценка рассматриваемых вариантов. Сравнение проводится по показателям качества изделия.

Общепринятых правил по описанию технологических систем не существует, они являются следствием общей модели исследования. Для анализа и синтеза новых инновационных решений в настоящее время широко развиваются методы CAI (computer-aided innovation) – методы компьютерной поддержки разработчиков при выборе и оценке инновационных технологических решений [2, 3].

**Морфологический подход для синтеза технологических решений.** Для синтеза и оценки технологических решений можно эффективно использовать морфологический подход [4–6]. Он заключается в построении морфологической матрицы (ММ), заполнении ее возможными альтернативными вариантами и в выборе из всего множества комбинаций наилучших решений. Необходимо генерировать морфологическое множество решений – описание потенциально возможных решений данной задачи. Морфологический подход базируется на комбинаторном принципе поиска решений и обоснован в работах швейцарского астрофизика Ф. Цвикки [7].

Морфологические методы по частоте использования занимают первое место среди дискурсивных подходов. По статистике немецких исследователей, количество всех фирм, использующих морфологию составляет более 40%, при этом их регулярно используют более 20% [8]. В морфологических подходах можно использовать генетические алгоритмы [9]. Область применения возможна для технических и технологических задач поиска новых решений [10, 11].

Прогрессивный морфологический подход (ПМП) является развитием известных морфологических методов и основан на кластерном анализе и теории множеств, составлении набора правил для максимизации потенциального уровня разрабатываемых технологий [12].

Согласно морфологическому подходу в упрощенном виде процедура генерации и сравнения технологических решений осуществляется последовательным выполнением ряда процедур. Вначале формируется морфологическая матрица из известных решений, проектов и патентов [7]. В морфологическую матрицу заносятся несколько опорных технологических решений, выбирается ряд критериев, которым присваиваются экспертным путем балльные оценки. В дальнейшем генерируется некоторое количество альтернатив и формируется морфологическое пространство решений, которое разбивается на кластеры. Сначала исследуются варианты технологических решений кластера, в котором находятся лучшие варианты. В дальнейшем проводят разработку других кластеров. С опорными вариантами сравниваются ТР, выясняется возможность их улучшений [11].

Предложенный подход применялся для синтеза и оценки ряда технологий и технических решений, в частности для анализа и оценки инновационных технологических процессов для газотурбинных двигателей [13]. Исследовался процесс формообразования заготовок для ответственных деталей (полых валов, дисков) газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов в изотермических условиях. [14, 15]. В результате была определена наиболее эффективная технология изготовления изделий методом раскатки заготовок в изотермических условиях, обеспечивающая регламентированную структуру материала, высокие механические свойства и КИМ. В настоящей статье приведены конкретные примеры применения подхода – при выборе режимов технологических процессов для установок микродугового оксидирования и при синтезе технологических решений для технологий переработки пенополиуретанов.

**Анализ и выбор технологий для установок микродугового оксидирования.** Существует ряд новых технологий, позволяющих получать покрытия с многофункциональными свойствами. Одним из прогрессивных методов является метод микродугового оксидирования (МДО) [16]. Суть метода заключается в формировании на поверхности детали в условиях воздействия микродуговых разрядов высокопрочного износостойкого покрытия, состоящего из корунда (на алюминиевых сплавах).

Для оценки вариантов при помощи экспертных оценок была составлена морфологическая матрица со следующими признаками – режимы нанесения покрытий, применяемые электролиты, используемые материалы, управление процессом нанесения, частотное регулирование и т.д. [17, 18]. Мощность морфологического множества равна 262144 вариантам.

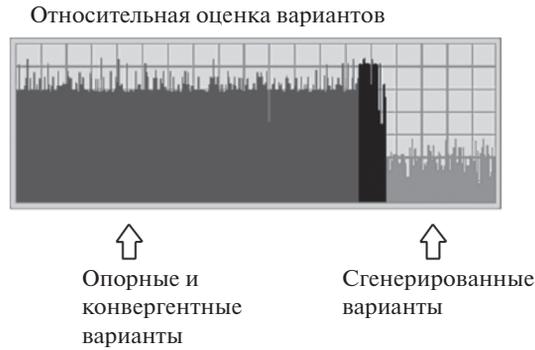


Рис. 1. Генерация и отбор вариантов (экранная форма).

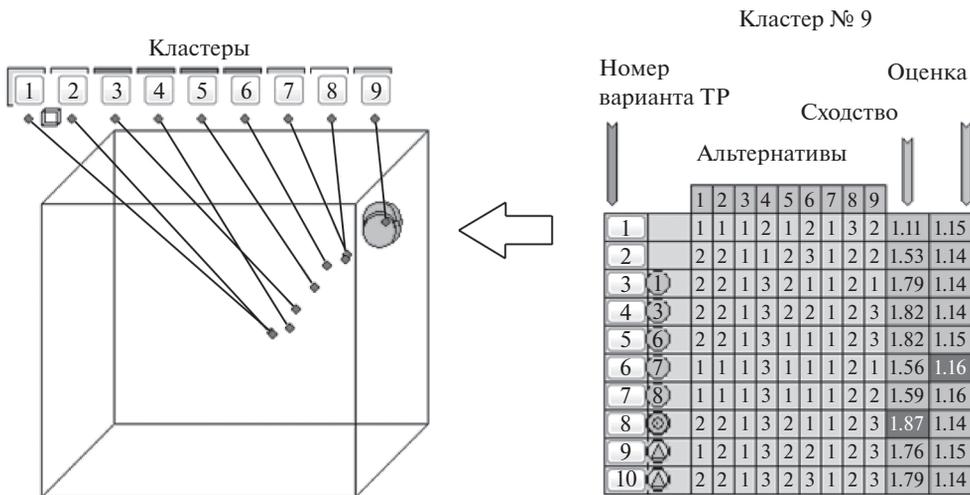


Рис. 2. Расположение опорных технологических решений в поле решений (экранная форма).

В дальнейшем был выбран ряд критериев, характеризующих конструктивные и экономические показатели технологических решений, а именно – стоимость установок и технологического процесса, твердость и толщина покрытия, экологичность, энергопотребление, управление процессом, вес установки. Далее экспертным путем назначаются весовые коэффициенты на базе метода приписывания баллов, имеющего преимущество в выборе свободы действий перед методами ранжирования. В матрицу были также занесены двенадцать опорных вариантов технологических решений. В дальнейшем каждой альтернативе проставлялись балльные оценки по каждому критерию. Были сгенерированы 1648 вариантов и отобрано 256 для дальнейшей кластеризации (рис. 1). Все варианты были рассчитаны на меру сходства. Из 256 сгенерированных и отобранных вариантов были сформированы 9 кластеров, содержащих сходные технологические решения. Среди всех кластеров наиболее высокую оценку (на 14%, чем средняя оценка) имеет кластер № 9 (рис. 2), который в первую очередь исследовался. Варианты 9 и 10 (улучшаемое технологическое решение) с высокими уровнями сходства и оценками находятся в этом кластере и характеризуются высоким техниче-

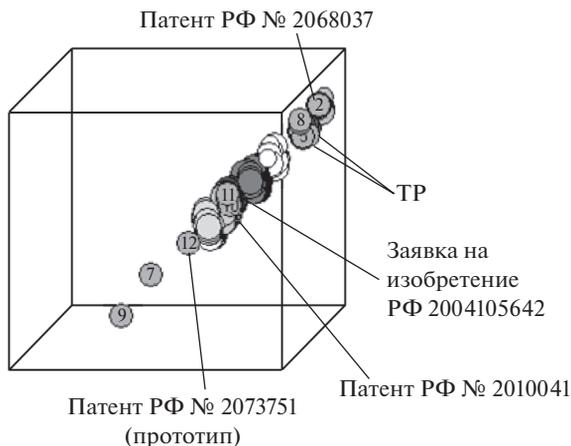


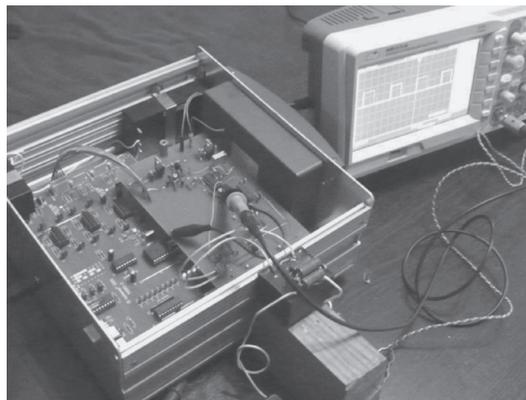
Рис. 3. Расположение опорных технологических решений в морфологическом поле решений.

ским уровнем. Варианты 5 и 6 с высокими экономическими параметрами были исключены из-за невозможности управления процессами нанесения покрытий. Наиболее типичным решением кластера является вариант 8. Но после дополнительного анализа данное решение было скорректировано, так как из-за используемого исключительно анодного режима невозможно получить твердые керамические покрытия большой толщины.

Специфической особенностью опорных вариантов и большинства вариантов данного кластера является управление протекающими технологическими процессами при помощи биполярных транзисторов с изолированным затвором, что ведет к расширению возможности управления и контроля. Эти варианты отличаются от других опорных вариантов – изобретений более высокими характеристиками (рис. 3).

В итоге было создано итоговое технологическое решение, являющееся комбинацией из вариантов 8–10 и расширенное в признаке применяемых электролитов. Решение характеризуется широкими возможностями управления процессами в частности, на первоначальном этапе реализуется только анодный режим, который позволяет быстро нарастить керамическое покрытие, в дальнейшем осуществляется анодно-катодный режим нанесения с частотным регулированием при помощи транзисторов, управляемых микроконтроллером. Для выбранного технологического решения создана экспериментальная установка МДО (рис. 4) с применением биполярных транзисторов с изолированным затвором и широкими возможностями регулирования процессов нанесения покрытий – по величине и геометрии тока, напряжения, частотным характеристикам и соотношению анодной и катодной составляющих, что позволило достичь экономии электроэнергии до 15%.

**Анализ и синтез технологий для переработки пенополиуретанов.** В настоящее время объем образования твердых отходов полимеров в Москве составляет порядка 300 тыс. тонн в год. При этом по оценкам, перерабатывается не более 10 тыс. тонн, остальная же часть в виде мусора вывозится на свалки [19, 20]. Весомую долю в твердых отходах занимают отходы пластических масс, в частности, пенополиуретаны (ППУ). Существующие технологии позволяют измельчить пенополиуретаны до кусков с минимальными размерами – около 5 мм. Задача тонкого измельчения эластичных пенополиуретанов не решена до сих пор. Проблема заключена в физико-химических свойствах материалов, а именно: их малая плотность не позволяет провести тонкое



**Рис. 4.** Экспериментальная установка МДО (слева – блок управления, справа – измерительная система).

измельчение при помощи ножевых мельниц при увеличении скорости вращения ножей частицы начинают плавиться с выделением ядовитых веществ. После декомпозиции способов измельчения материалов и их анализа была составлена морфологическая матрица (табл. 1).

В результате анализа возможных вариантов было синтезировано решение, предполагающее мокрое измельчение отходов пенополиуретанов при режущем типе измельчения при нормальных температурах и вертикальном расположении (рис. 5).

Для измельчения пенополиуретанов разработан и опробован экспериментальный стенд и по результатам испытаний – опытно-экспериментальная установка (рис. 6).

В ходе экспериментов удалось добиться стабильного процесса измельчения, а также получить узкую фракцию измельченного материала. Проведенные эксперименты показали, что сверхмелкие отходы пенополиуретанов можно в количестве до 10% добавлять в исходную смесь при их производстве и получать образцы с однородной структурой. Предлагаемое новое технологическое решение [21, 22] позволяет эффективно перерабатывать отходы пенополиуретанов путем сверхтонкого измельчения в жидкостной среде.

**Таблица 1.** Способы измельчения ППУ (выделено найденное ТР)

	Признак	Альтернатива 1	Альтернатива 2	Альтернатива 3	Альтернатива 4
1	Рабочее тело	Воздух	Песок	Вода	Инертный газ
2	Тип измельчения	Раскалывающее действие	Раздавливающее действие	Истирающе-раздавливающее действие	Режущее действие
3	Температурный режим	Повышенные температуры	Температуры окружающей среды	Пониженные температуры	Криогенные температуры
4	Расположение	Вертикальное	Горизонтальное	Наклонное	Вращающееся

Примечание: Выделено найденное технологическое решение.

	$p^1$	$p^2$	$p^3$	$p^4$
$P_1$	$P_1^1$	$P_1^2$	$P_1^3$	$P_1^4$
$P_2$	$P_2^1$	$P_2^2$	$P_2^3$	$P_2^4$
$P_3$	$P_3^1$	$P_3^2$	$P_3^3$	$P_3^4$
$P_4$	$P_4^1$	$P_4^2$	$P_4^3$	$P_4^4$

Рис. 5. Технологическое решение в морфологической матрице.

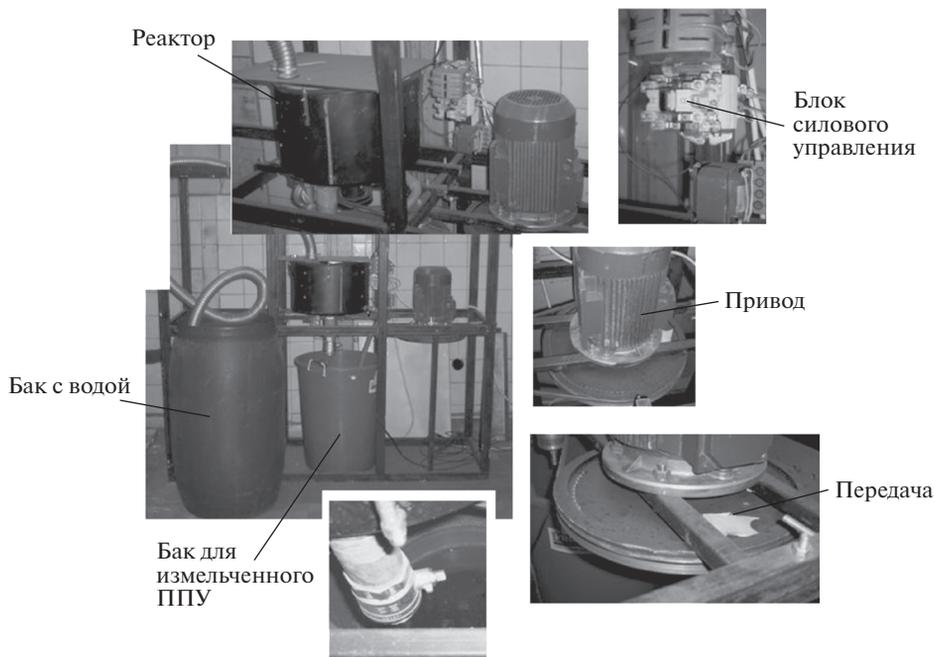


Рис. 6. Опытно-экспериментальная установка измельчения пенополиуретана.

**Выводы.** Разработанный на базе морфологического подхода метод позволил расширить ряд потенциальных вариантов, провести кластеризацию и осуществить эффективный выбор ряда ТР:

- Синтез технологических процессов для установок микродугового оксидирования с применением биполярных транзисторов с изолированным затвором, что позволило реализовать широкое регулирование технологических процессов – по величине и геометрии тока, напряжения, частотным характеристикам и соотношению анодной и катодной составляющих. Это позволило достичь экономии электроэнергии до 15% при синтезе покрытий.

• Синтез технологических процессов измельчения из пенополиуретана, обеспечивающий размер измельченных частиц до 500 микрон, что позволило внедрять эти частицы (до 10%) в исходную смесь при производстве пенополиуретанов и получать образцы с однородной структурой. Тем самым решена задача утилизации отходов пенополиуретанов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.118-73 (1995) ЕСКД / Техническое предложение. Дата введения 1974-01-01. Утвержден Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 февраля 1973 г. № 500. Переиздание (март 1995 г.) с изменениями № 1, 2, 3, 4, утвержденными в августе 1981 г., ноябре 1982 г., сентябре 1985 г., в январе 1987 г. (ИУС № 10-81, 2-83, 12-85, 4-87). 14 с.
2. *Kohn S., Hüsig S.* Open CAI 2.0 – Computer Aided Innovation in the era of open innovation and Web 2.0 // *Computers in Industry*. 2011. V. 62. P. 407–413.
3. *Зарипова В.М., Петрова И.Ю., Цырульников Е.С.* Классификация автоматизированных систем поддержки инновационных процессов на предприятии (Computer-Aided Innovation – CAI) // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012. № 1. С. 26–35.
4. *Одрин В.М.* Метод морфологического анализа технических систем // М.: ВНИИПИ, 1989. 309 с.
5. *Ritchey T.* Problem Structuring using Computer-Aided Morphological Analysis // *J. Operational Res. Soc. (JORS)*. 2006. V. 57. № 7.
6. *Rakov D., Timoshina A.* Structure synthesis of prospective technical systems // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2010. V. 25. Is. 2. P. 4–10.
7. *Zwicky F.* Morphology of aerial propulsion // *Helvetica Physica Acta*. 1948. V. XXI. H 5. S. 299–340.
8. *Smerlinski M., Stephan M., Gundlach C.* Innovationsmanagement in hessischen Unternehmen. Eine empirische Untersuchung zur Praxis in klein- und mittelständischen Unternehmen. Discussion Paper on Strategy and Innovation, Marburg, Juni 2009, ISSN 1864-2039.
9. *Dučić N., Čojbašić Ž., Radiša R., Slavković R., Miličević I.* CAD/CAM design and genetic optimization of feeders for sand casting process. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. 2016. V. 14. № 2. P. 147–158.
10. *Скворцова Д.А., Скворцов А.В.* Принципы создания гибких производственных систем автоматизированной сборки // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2006. № 1. С. 52–59.
11. *Bardenhagen A., Gavrilina L.V., Klimenko V.M., Pecheykina M.A., Rakov D.L., Statnikov I.N.* A comprehensive approach to the structural synthesis and evaluation of engineering solutions in the design of transportation and technological systems // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. V. 46. № 5. P. 453–462.
12. *Rakov D.L., Sinev A.V.* The Structural Analysis of new Technical Systems on a Morphological Approach under Uncertainty Conditions // *J. Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. T. 44. № 7. P. 74–81.
13. *Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А., Кузьмин В.И.* Теплозащитные покрытия диоксида циркония, полученные методом высокоэнергетического плазменного напыления, для деталей горячего тракта ГТД // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2015. № 4. С. 89–95.
14. *Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В.* Анализ и оценка технологий и оборудования для изготовления заготовок длинномерных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на базе морфологического подхода // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2015. № 4. С. 136–143.
15. *Бурлаков И.А., Валитов В.А., Ганеев А.А., Забелян Д.М., Морозов С.В., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З.* Моделирование структурообразования в процессе горячей деформации заготовок деталей ГТД из жаропрочного никелевого сплава // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016. № 5. С. 94–101.
16. *Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В.* Микродуговое окисление металлов и сплавов. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2013. 522 с.

17. *Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В.* Анализ и выбор технологических процессов и систем управления для эффективного синтеза микродуговых покрытий // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 1. С. 75–80.
18. *Klimenko B., Rakov D.* Analysis and Synthesis of innovative engineering solutions and technologies based on advanced morphological approach // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. V. 658. P. 274–283.
19. *Заякин С.* Вторичная переработка полимеров // *Оборудование*. 2005. № 5 (101). С. 23–27.
20. *Горбань Т.В., Журавлев В.А., Онорина Л.Э., Кожина Т.В., Рак И.А.* Утилизация и вторичная переработка отходов производства полиуретанов // *Пластические массы*. 2001. № 4. С. 25–31.
21. *Раков Д.Л., Клименко Б.М.* Переработка эластичных пенополиуретанов // *Экология и промышленность России*. 2008. № 2. С. 6–8.
22. *Раков Д.Л.* Устройство для измельчения неметаллических материалов. Патент № 61631 от 10.03.2007. Бюллетень № 28.