

УДК 621.01: 536.75
DOI: 10.12737/article_58ef8090231697.44731419

М.Л. Хейфец, д.т.н.
(Президиум НАН Беларуси,
220072, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 66)
E-mail: mlk-z@mail.ru

От аддитивного производства к самовоспроизведению машин, их узлов и деталей

Проведен анализ состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства, позволивший показать новую парадигму его эволюции – переход к самовоспроизведению машин и их частей, а также организмов.

Предложена диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства, представляющая собой конечный автомат, которая может использоваться как для построения 3D-принтера, обеспечивающего «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала.

Рекомендовано границу распространения в материале изделия интенсивных воздействий – технологический барьер представлять вырождением распространения фронта волны возбуждения.

Ключевые слова: компьютеризированное производство; аддитивные технологии; самовоспроизведение машин; конечный автомат; клеточный автомат; мозаичное пространство.

M.L. Heifets, D. Eng.
(Presidium of NAS of Belarus,
66, Independence Avenue, Minsk, 220072, Belarus)

From additive production to self-reproduction of machines, their units and parts

The analysis of the state and outlooks of additive technology development in computer-aided production allowing the show of a new paradigm of its evolution – transition to the self-reproduction of machines and their parts and also organisms is carried out. A diagram of logical ties in processes of additive production representing an end automatic machine which can be used both for 3-D-printer formation ensuring the “growth of a complex product and structure and for the additive synthesis of its composite material is offered.

It is recommended that the boarder of the intensive impact spreading in product material – technological barrier should be presented as a degeneracy of excitation wave front propagation.

Keywords: computer-aided production; additive technologies; self-reproduction of machines, end automatic machine; cell automatic machine; mosaic area.

Машинные аналоги живого организма всегда соответствуют духу времени, это подчеркивал Норберт Винер, Клод Э. Шеннон и многие другие, широко известные ученые и специалисты различных отраслей знания [1, 2].

В качестве организма или идеализированной машины, а также их частей, на протяжении длительного времени, в том числе и на современном этапе выступает автомат. Теория автоматов изучает не их внутреннее устройство

во, а особенности внешних проявлений автоматов [2, 3].

Элементы организма или машины, рассматриваются как автоматы, чья внутренняя структура не обязательно должна быть открыта, но которые предполагаются реагирующими на отдельные определенные раздражители некоторым определенным образом [2].

Конечные автоматы и модели самовоспроизведения

«Черный ящик», имеющий конечное число дискретных внутренних состояний, называется «конечным автоматом». Обычно автомат имеет также конечное число возможных входных и выходных сигналов, а его состояние и выходной сигнал в любой момент времени зависят от состояния и входного сигнала в предыдущий момент времени [3].

В терминах логики автомат, который смог бы выполнять точно задаваемые операции, попытался определить А.М. Тьюринг. Машина Тьюринга представляет собой «конечный автомат» снабженный, однако, «бесконечной лентой» с инструкцией, записанной на ее конечном участке [2].

Несмотря на то, что биологические системы состоят из малонадежных компонентов, они высоконадежны и способны к самовосстановлению. Джон фон Нейман показал, как сделать машину, которая функционировала бы должным образом, даже если некоторые ее части выйдут из строя. Это обеспечивается за счет введения в машину избыточности или резервирования, например путем замены как одной схемы, так и ее элементов несколькими, включенными параллельно [2, 3]. В результате фон Нейман предположил, что наипростейшее из возможных описание операций, свойственных мозгу, может быть выполнено в виде **диаграммы**, отражающей все возможные его связи.

Фон Нейман первым рассмотрел методы создания *самовоспроизводящихся машин*. Он показал, что если машину снабдить соответствующей программой действий и поместить в среду – «кладовую», состоящую из таких же деталей, что и сама машина, то отыскивая необходимые детали она, обеспечит самовоспроизведение [2].

Фон Нейман в своей *модели самовоспроизведения* показал, как в условиях простого окружения с большим числом не очень разнообразных деталей или с малым числом состояний создать достаточно сложную машину. Он пришел к выводу, что команды, которые со-

общают машине, как построить саму себя, из логических противоречий не могут быть полными. Команды должны описывать не только автомат, но и самих себя, а в результате должен существовать план построения машины и так далее. Это можно избежать, если иметь две машины, каждая из которых по своему обращается с планом построения [2].

Далее фон Нейман обратился к абстрактной математической модели чисто логического характера. В качестве «кладовой» он выбрал среду в виде плоскости, разделенной на квадратные *клетки*. В каждую такую клетку он поместил одну из своих элементарных составляющих частей – машину с конечным числом состояний. Такие машины у фон Неймана не имеют ни входов, ни выходов, а обладают лишь некоторым числом допустимых состояний.

Каждая машина является детерминированной и синхронной, а состояние каждой клетки зависит от состояния ее самой и соседних с ней клеток в предыдущий момент времени [2]. Подобная система, состоящая из мозаичного пространства, **клеточных машин**, допустимых состояний, правил перехода, называется «*мозаичной структурой*». В свою очередь, «*конфигурацией*» в структуре называют конечный блок из клеток, состояния которых заданы.

В пределах среды находятся **конфигурации из клеток** (квадратных или других по форме сотовых структур) и именно их можно сделать самовоспроизводящимися. Клетки, находящиеся в состоянии покоя, являются сырьем, при этом клетка, отделенная от целой конфигурации не может внезапно активизироваться. Машина «дотягивается» до окружающего сырья только через локальные действия. В результате все сводится к построению мозаичной структуры из отдельных клеток с небольшим числом различных состояний, а также выбору **правил перехода** и последующей организации этих клеток в конфигурации, которые смогут воспроизводить себе подобные.

Решение таких задач сходно с составлением компьютерных программ [2, 4]. Таким образом, самовоспроизведение машин можно рассматривать с позиций компьютеризации производства, а 3D-принтеры, печатающие машины, их узлы и детали тогда проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Поэтому для моделирования 3D-печати прежде всего необходимо:

1) предложить **диаграмму** связей в процессах «выращивания» изделий, представляющую собой *конечный автомат*;

2) трансформировать в **клеточную машину** с ограниченным числом *состояний и правил перехода*, предложенный конечный автомат;

3) сформировать **конфигурации из клеток** конечного блока *клеточных машин* для различных процессов «выращивания» изделий;

4) рассмотреть *мозаичные структуры*, формируемые различными конфигурациями клеток, в зависимости от их состояний и **правил перехода**.

Аддитивные технологии компьютеризированного производства

Современный технологический уклад реализует провозглашенную Р.Фейнманом новую парадигму производства «снизу – вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху – вниз».

Сущность аддитивного производства (*AF – Additive Manufacturing*) заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [5].

Различают две основные группы аддитивных методов как с «предварительным формированием слоя» материала по технологиям *BD – Bed Deposition*, подразумевающим наличие определенной платформы, на которой послойно «выращивается» материал и изделие, так и «непосредственное осаждение слоя» материала на сложнопрофильную поверхность изделия по технологиям *DD – Direct Deposition* [6].

В настоящее время методы аддитивного производства классифицируются по стандарту ISO/ASTM 52900-15 (ASTM F2792-12a):

1. *Vatphotopolymerization* («фотополимеризация в ёмкости»);

2. *Materialjetting* («разбрызгивание материала» или «струйные технологии»);

3. *Materialextrusion* («выдавливание материала»);

4. *Powderbedfusion* («плавление материала в заранее сформированном слое»);

5. *Binderjetting* («разбрызгивание связующего вещества»);

6. *Sheetlamination* («соединение листовых материалов»);

7. *Directedenergydeposition* («прямой подвод энергии непосредственно в место построения»);

Классификации в принципах получения изделий без формообразующей оснастки, соответствуют, в представленной последовательности, «традиционные» методы, созданные уже более 30 лет назад [7, 8]:

1. Стереолитография (*Stereo lithography Application – SLA*);

2. Послойное уплотнение материала (*Solid Ground Curing – SGC*);

3. Послойное экструдирование расплава (*Fused Deposition Modeling – FDM*);

4. Селективное лазерное спекание (*Selective Laser Sintering – SLS*);

5. Прямое создание литейных форм (*Direct Shell Part Creation – DSPC*);

6. Послойное ламинирование из листового материала (*Laminated Object Manufacturing – LOM*), и соответственно другие, не столь распространенные в производстве.

Перспективные аддитивные технологии послойного синтеза позволяют реализовать высокоэффективный, ресурсосберегающий подход по сравнению с традиционными методами к проектированию и изготовлению машин, их узлов и деталей. Основные преимущества замены традиционных технологий на аддитивные заключаются в существенном снижении времени проектных и производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий; сокращении и упрощении цепочек поставок; локализации производства на площадках одного небольшого предприятия и использовании принципиально новых подходов к проектированию изделий, позволяющих создавать сложнопрофильные и облегченные конструкции из композиционных материалов, производство которых традиционными технологическими методами невозможно.

Моделирование технологий аддитивного производства

Для обозначения процессов аддитивного производства изделий в технологической системе традиционно употребляют термины [9, 10]: прямое получение изделий сложной формы – «выращивание» (*Solid Freeform Fabrication*); послойный синтез (*Laminate Synthesis*); быстрое макетирование – «прототипирование» (*Rapid Prototyping*); формирование – «3D-печать» трехмерных объектов (*3D Component Forming*). Поэтому встает вопрос определения взаимосвязи процессов

формообразования изделий и разграничения используемых терминов.

Для самовоспроизведения объектов, согласно модели фон Неймана [2], требуются машины: C – «копировщица плана построения»; O – «исполнительница плана построения»; S – «пусковое устройство» (включающее C и O в надлежащее время); B_{C+O+S} – «план построения автомата» (описывающий все элементы модели). В результате весь автомат выражается символически $C+O+S+B_{C+O+S}$. После начального запуска S получает в свое распоряжение план построения автомата в целом B_{C+O+S} , C копирует его, а O в свою очередь следует ему для построения C , O и S .

Таким образом, можно представить [9, 10]:

- запуск (S), как прямой доступ к потокам вещества и энергии;
- получение плана (B_{C+O+S}), как самонастройку программы воспроизведения;
- копирование плана (C), как трансляцию информационного потока;
- построение автомата (O), как самоорганизацию его структуры.

Исследование процессов аддитивного производства в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности [10, 11] технологических операций (таблица) позволило представить совокупность процессов «выращивания» изделий в виде диаграммы логических связей (рис. 1).

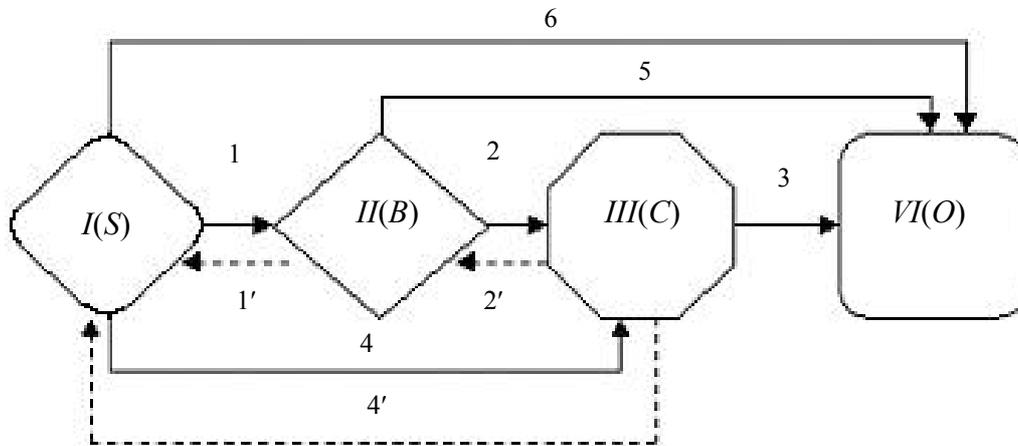


Рис. 1. Диаграмма логических связей, отражающая процессы аддитивного производства изделий

Диаграмма представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний [9]. Вершины графа изображают процессы аддитивного производства изделий и представляют логические операции: трансляцию информации, потоков вещества и энергии, запуск и остановку автоматического цикла.

Ребра графа отражают изменения состояний (1–6 и 1', 2', 4') материала технологической среды, а маршруты предусматривают различные комбинации изменений в зависимости от выбора начального и порядка выполнения последующих процессов. Так, различные варианты технологических маршрутов имеют вид последовательностей при выборе в качестве начального процесса (см. рис. 1):

I) прямого получения деталей: 1→2→3; 4→3; 1→5; 4→2'→5; 6;

II) послойного синтеза: 1'→4→3; 2→3; 1'→6; 2→4'→6; 5;

III) быстрого прототипирования: 2'→1'→6; 4'→6; 2'→5; 4'→1→5; 3.

Рассматривая замену в модели самовоспроизведения процессов (прямого доступа к потокам вещества и энергии; самонастройки программы воспроизведения; трансляции информационного потока; самоорганизации структуры автомата) обеспечивающими их элементами технологической системы (деталью, инструментом, приспособлением, станком), приходим к выводу, что невозможно при использовании формообразующей оснастки создать конечный автомат, так как для изготовления детали должна существовать оснастка, а, в свою очередь, для ее создания должна быть также изготовлена оснастка и т.д. [9].

Таким образом, алгоритмы [9, 10] предложенные согласно модели самовоспроизведения фон Неймана [2], позволяют описывать аддитивные технологии производства изделий без формообразующей оснастки, а обратные

им последовательности – технологии, использующие оснастку, непредставимы в качестве конечного автомата.

Описание в соответствии с существующими терминами процессов аддитивного производства алгоритмами по предложенной диаграмме логических связей предоставляет возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий.

Синтез композиционных материалов в аддитивных технологиях

Для изучения явлений пространственно-временного распределения результатов технологических воздействий при аддитивном синтезе композиционного материала, следует рассматривать материал как распределенную систему с позиции общей теории систем [12]. Такой подход предполагает, что свойства системы определяются свойствами элементов, из которых она построена, и организацией взаимодействий этих элементов. Благодаря ему становится возможным изучение роли локальных свойств элементов и оптимизация их связей в определении глобальных свойств системы.

Для описания свойств композиционного материала в первую очередь рассматривается распределенная система взаимодействующих элементов в структурно-фазовом масштабе технологической среды [13]. Состояние и акты изменения состояния формируемого материала можно моделировать на дискретной однородной среде логических функций, относящихся к классу моделей «непрерывных сред» с дискретными модификациями, поскольку они удовлетворяют следующему основному принципу: функционально связными при изменении свойств являются только соседние клетки, которые при иллюстрации связей рационально обозначить точками.

Для выделения моделей тканей с локальными взаимодействиями точек-клеток используют название «точечная ткань», поскольку передача возбуждения здесь осуществляется по принципу «от точки к точке». Точечная ткань – это множество локально взаимодействующих точек-клеток. Как модель непрерывной возбудимой среды, точечная ткань является кинематической моделью и удобна для изучения глобальных свойств распространения волн «возбуждения» без учета динамических эффектов, присущих реальным технологическим средам.

Дискретные модели ткани определяют на

сетевых графах. Определение некоторого графа G означает задание возможных функциональных связей во множестве клеток-вершин X . Дальнейший переход от данной структурной схемы $G(X)$ к некоторой модели ткани $T(X)$ связан с выбором формы функционального оснащения структурных элементов графа. При формальном подходе вершинам приписываются некоторые свойства клеток, а ребрам – свойства передачи некоторых воздействий, влияющих на свойства вершин-клеток [13].

Диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства представляет собой конечный автомат. Приняв за функциональные состояния технологической системы различные способы наращивания слоев, построим кинетическую схему конечного автомата: I) при прямом получении деталей; II) послойном синтезе; III) быстром прототипировании; IV) формировании трехмерных объектов (рис. 2).

Представив блок-схемами совокупности режимов для каждого функционального состояния, получаем алгоритмические схемы состояний технологической среды. После соединения алгоритмических схем состояний строим клеточную машину технологической среды при «выращивании» изделий (рис. 3).

Рассматривая взаимосвязи состояний конечного автомата, получим граф состояний клетки-элемента технологической среды (рис. 4).

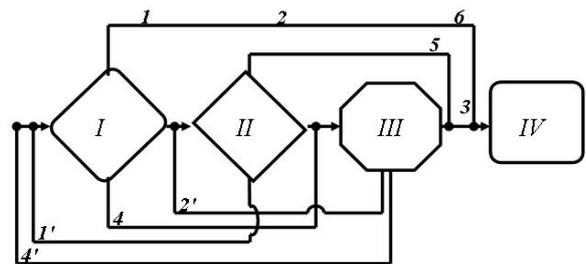


Рис. 2. Кинетическая схема функциональных состояний технологической системы

Конфигурации клеточных машин, отражающие их потактовые возбуждения (рис. 5), представленные графами состояний клеточных автоматов технологической среды (см. рис. 4), в совокупности описывают поведение элементов мозаичной структуры (см. рис. 3) при «выращивании» изделий. Рассмотренные конфигурации для «мозаичного пространства» состояний (см. рис. 5):

I – прямого получения деталей, главным образом будет представляться режимами с разбиением состояния покоя (рис. 5, в);
 II – послойного синтеза, прежде всего будет описываться разбиениями состояний

рефрактивности и возбуждения (рис. 5, б);
 III – быстрого прототипирования, в первом приближении – общей упрощенной схемой (рис. 5, а).

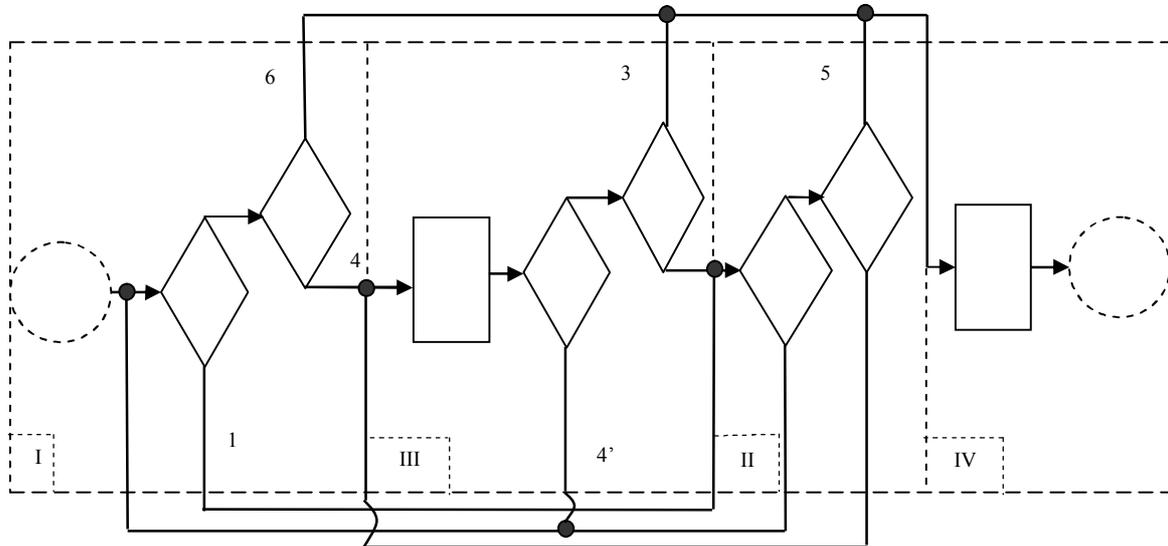


Рис. 3. Клеточная машина технологической среды

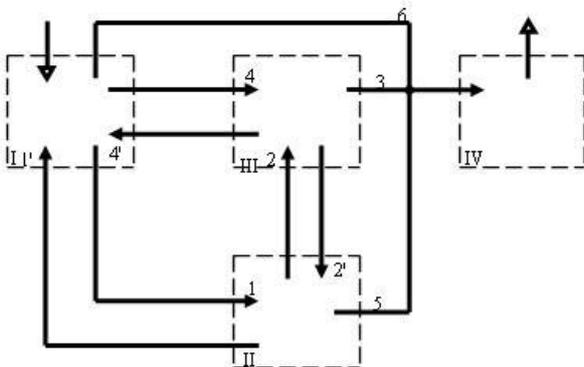


Рис. 4. Граф состояний клеточного автомата технологической среды

В результате граф состояний автомата (см. рис. 4) может быть эффективно использован для описания функциональных состояний элементарных клеток технологической среды [13].

Трансформация клеточными автоматами структур материала

В общем случае «мозаичные» дискретные модели имеют структуру простых сетей N_S^n , а непрерывные модели определяются на непрерывных многообразиях типа действительного пространства R^n с использованием топологических связей этого пространства [13]. Свойства каждой клетки – вершины $x \in X$ «мо-

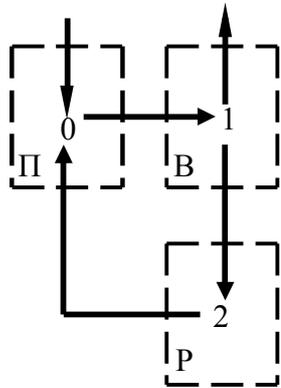
заичной структуры» можно описывать некоторым множеством состояний $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$ с указанием: графа переходов $P(Z)$ в этом множестве состояний; свойств переходов в P для разных воздействий действующих на данную клетку x через внутренние или внешние связи; связи с текущим состоянием клетки x , состояний ребер-связей, выходящих из x .

Процесс возбуждения клетки основывается на понятиях стимула и порога с выделением состояний (см. рис.5): z_0 – покоя; z_+ – возбуждения; z_- – рефрактерности [13].

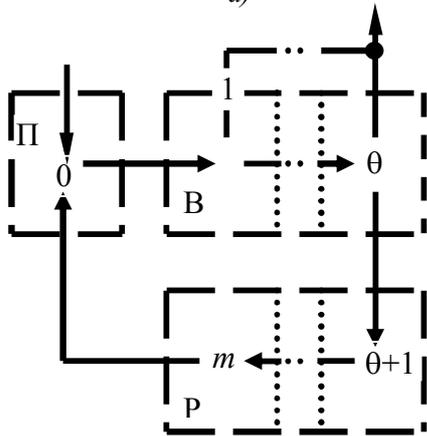
Состояние покоя z_0 является устойчивым при отсутствии внешних, по отношению к данной клетке, входных стимулов j_+ . Чтобы совершился переход в возбужденное состояние $z_0 \rightarrow z_+$, необходимо выполнение условия $j_+ \geq \aleph$, т.е. стимул должен превышать некоторый пороговый уровень \aleph , который будем сперва полагать равным единице, $\aleph = 1$. Возбуждение или переход $z_0 \rightarrow z_+$, при $j_+ \geq 1$ происходит мгновенно, но затем в состоянии z_+ клетка находится конечное время θ_+ , по истечении которого автоматически происходит переход в рефрактивное состояние $z_+ \rightarrow z_-$. Если θ_- – время жизни клетки в рефрактерном состоянии z_- , которое является состоянием невозбудимости клетки, то полный цикл одиночного возбуждения: $z_0 \rightarrow z_+ \rightarrow z_- \rightarrow z_0$ длится время $m = \theta_+ + \theta_-$.

Этот цикл клетки всегда проходит по авто-

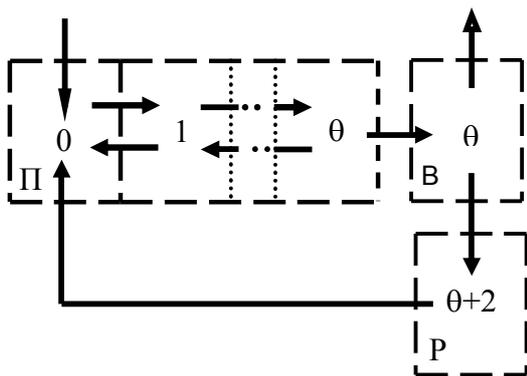
номной программе и внешней стимуляцией можно регулировать только момент запуска цикла возбуждения. В пределе, когда клетка находится под постоянным действием надпорогового стимула, в конце цикла вместо перехода $z_- \rightarrow z_0$ сразу осуществляется переход $z_+ \rightarrow z_+$, то есть новое возбуждение.



а)



б)



в)

Рис. 5. Конфигурации клеточных машин, отражающие состояния покоя (Π), возбуждения (В), рефрактивности (Р) возбудимых клеток-автоматов: при упрощенной схеме (а), разбиении состояний возбуждения $\{1, \dots, \theta\}$ и рефрактивности $\{\theta + 1, \dots, m\}$ на тактовые подсостояния (б) и разбиении состояния покоя $\{1, \dots, \theta\}$ на тактовые подсостояния (в)

Возбужденное состояние z_+ отличается от прочих главным образом тем, что в нем клетка является сама источником стимулирующего воздействия, которое называется выходным и обозначается j_- . Этой схеме можно дать графовое отображение $P(Z)$, где $Z = \{z_0, z_+, z_-\}$ (рис. 5, а).

При дискретном представлении времени τ удобно считать целыми длительности θ_+ и θ_- , чтобы в графе $P(z)$ состояния z_+ и z_- заменить цепочками состояний $z_+ = (z_1, \dots, z_i)$, $z_- = (z_{i+1}, \dots, z_m)$, где $i = \theta_+$, $m = 1 + \theta_+ + \theta_-$ (рис. 5, б).

Модификация графа $P(Z)$ при разбиении на тактовые подсостояния состояния $z_0 = (z_1, \dots, z_i)$, где $i = \theta_0$, дает жизненный цикл клетки $m = \theta_0 + 2$ (рис. 5, в). Состояние клетки в произвольный момент τ можно характеризовать вектором $z = z(\tau)$ порядка $m + 1$. Если в данный момент τ клетка находится в состоянии k , то $z(\tau) = e_k$, т.е. в этот момент только k -я компонента вектора z равна единице, а остальные – нулю.

Смена состояний за один такт описывается линейным уравнением:

$$z(\tau + 1) = Pz(\tau)$$

с матрицей перехода

$$P = \begin{pmatrix} q & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & q \\ p & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & p \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

которая является функцией времени $P = P(\tau)$, что заложено в свойствах переменных элементов p и q . Эти элементы выражаются функцией единичного скачка, аргументом в котором является разность стимула и порога:

$$p = \varepsilon(j_+ - 1), q = 1 - \varepsilon(j_+ - 1), \text{ т.е. если } j_+ \geq 1, \text{ то } p = 1, q = 0, \text{ а если } j_+ < 1, \text{ то } p = 0, q = 1.$$

Для описания межклеточных взаимодействий необходимо определить поведение во времени выходного стимула клетки $j_- (\tau)$, который можно выразить в виде скалярного произведения вектора состояния $z (\tau)$, с вектором $a_+ = e_1 + \dots + e_{\theta_+}$, являющимся «индикатором» состояний возбуждения:

$$j_- (\tau) = a_+ \cdot z(\tau)$$

Полное описание межклеточных взаимодействий в рамках данного формализма требует привлечения матрицы связей клеток, т.е. определения структурной модели пространства [13].

На основании описанной автоматной схемы возбуждения клетки, можно определить стохастические модификации модели возбуждения, в которых вектор \mathbf{z} описывает распределение вероятностей нахождения клетки в каждом из состояний множества Z , а элементы матрицы \mathbf{P} представляют вероятности переходов между состояниями. Тогда p – вероятность перейти в возбужденное состояние при действии стимула j_+ , $p = \alpha \varepsilon (j_+ - 1)$, где число $\alpha < 1$; при этом $q = 1 - p$.

Наиболее общей является модель, в которой все переходы между состояниями случайны и длительности состояний возбуждения и рефрактивности θ_+ и θ_- представляют собой случайные величины. Содержательной является модель с детерминированными длительностями θ_+ и θ_- , когда вероятностным образом определяется только переход $z \rightarrow z_+$.

Движение фронта передачи свойств в мозаичном пространстве

Структура точечной ткани $T(X)$ мозаичного пространства на множестве клеток-вершин X задается матрицей связей, порядок которой равен $|X|$. Выделим подмножества X_0, X_+, X_- , отвечающие разным состояниям вершин, $X = X_0 \cup X_+ \cup X_-$, $X_0 \cap X_+ \cap X_- = \emptyset$, и введем векторы-индикаторы этих множеств: $\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_+, \mathbf{u}_-$ соответственно. Порядок каждого из этих векторов равен $|X|$; отличны от нуля и равны 1 те элементы, например вектора \mathbf{u}_0 , которые соответствуют вершинам $x \in X_0$ и т.д. В общем случае, как сами множества X_0, X_+, X_- , так и их индикаторы являются функциями времени τ , которое считается дискретным. Вершина x является в возбужденном состоянии источником возбуждения для всех тех вершин, в которые от нее идут связи.

Траектория распространения возбуждения представляется объединением множеств $\Phi(x, \tau)$ для всех моментов времени τ существования возбуждения в $T(X)$.

Пусть до момента $\tau = 0$, в $T(X)$ отсутствует возбуждение, а в начальный момент внешним воздействием возбуждаются точки множества $X_+(0)$. Можно описать последующую мигра-

цию возбуждения для произвольных начальных множеств $X_+(0)$.

Волна возбуждения $\mathbf{u}_+(\tau) = \varphi(\tau)$ для $\tau \geq 0$ называется фундаментальной, если $X_+(0) = \{x_0\}$ – одиночная точка $x_0 \in X$ и $\mathbf{u}_+(\tau) \equiv 0$ для $\tau < 0$ [13]. Фундаментальная волна $\varphi(\tau)$ представляет «ответ» среды на локальное возмущение, которое для точечной ткани является актом возбуждения одиночной точки. Понятие фундаментальной волны связано с понятием «порядкового множества» вершин графа ткани. Если порог покоя $\aleph \leq 1$, то в каждом такте фронт фундаментальной волны «окупирует» в графе ткани $T(X)$ вершины одного порядка по отношению к начально возбужденной вершине x_0 , т.е. фундаментальное множество $\Phi(x, \tau)$ есть множество вершин порядка τ .

Например, в однородных сетях N_s^2 для $s = 3, 4, 6, 8$ (рис. 6) вершины последовательных фундаментальных фронтов $\Phi(x, \tau)$ (рис. 7) располагаются в соответствии с величинами периметров элементарных контуров.

В рассматриваемых дискретных моделях, в отличие от непрерывных воспроизводятся эффекты суммации воздействий, которые могут быть исследованы при оценке возможности распространения возбуждения в простых сетях при разных величинах порога покоя \aleph [16].

Траектория $\chi(\tau)$ называется конечной, если существует такой конечный момент времени τ_0 , что $\chi(\tau) = 0$ при $\tau > \tau_0$ и если $\chi(\tau) \neq 0$ при $\tau \geq \tau_0$. Траектория имеет длительность τ_0 , если она инициирована в момент $\tau = 0$ и $\tau_0 > 0$. Распространение возбуждения называется вырождающимся при конечной траектории и невырождающимся – в противном случае [13].

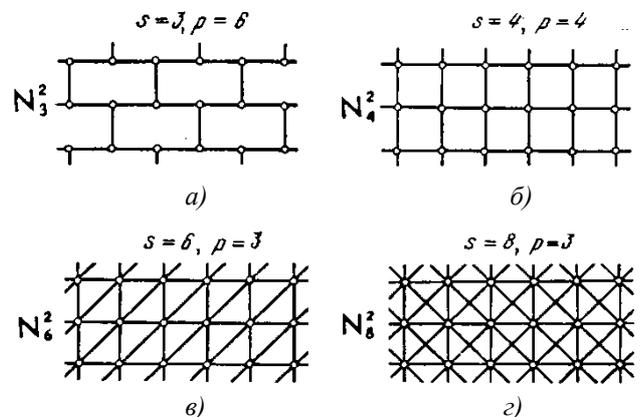


Рис. 6. Графы простых, двумерных N_s^2 сетей с величинами периметров p элементарных контуров, однородных по степени связности вершин $s = 3$ (а); 4 (б); 6 (г); 8 (з)

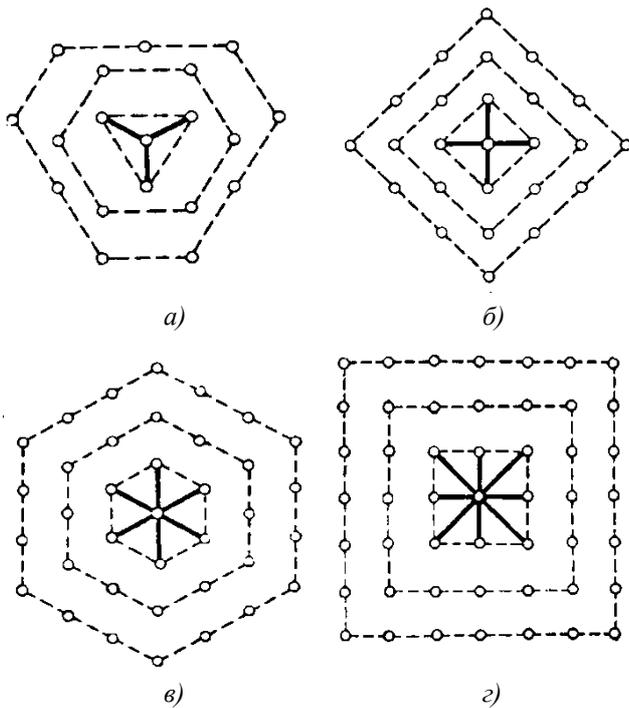


Рис. 7. Последовательные конфигурации фундаментальных фронтов в мозаичном пространстве простых двумерных сетей связности $s = 3$ (а); 4 (б); 6 (в); 8 (з)

Если $\aleph \leq 1$, то для возбуждения любой покоящейся точки в $T(X)$ достаточно, чтобы возбудилась только одна из ее соседних точек. Если при этом граф ткани не содержит поглощающих вершин, т.е. таких, из которых нет выходящих ребер, то фундаментальное распространение из любой вершины $T(X)$ существует и является невырождающимся при неограниченном множестве X .

Если же $\aleph > 1$, то возникает необходимость изменения определения фундаментального распространения. Действительно, пусть порог $\aleph = 2$, т.е. произвольная покоящаяся точка x возбуждается в момент $\tau + 1$, если в предыдущий момент τ возбуждены по меньшей мере две ее соседние по связям точки. Очевидно, в этом случае возбуждение одиночной точки ткани не достаточно для создания распространяющейся волны возбуждения. Поэтому, в общем случае $\aleph > 1$ фундаментальным называют такое распространение, которое инициируется начальным возбуждением некоторого минимального множества точек $\Phi(x, 0)$, где $|\Phi(x, 0)| > 1$ [13].

В сети N_3^2 можно так выбрать две точки, чтобы в следующем такте при $\aleph = 2$ они возбудили еще одну точку. Однако здесь никакое большее начальное множество $\Phi(x, 0)$ не способно создать траекторию длительностью более одного такта (рис. 8, а).

В сети N_4^2 и при $\aleph = 2$ начальное возбуждение пары диагональных точек тоже приводит к распространению только на один шаг, но возбуждение k диагональных точек, принадлежащих одной прямой, вызывает вырождающееся распространение длительностью $\tau = k - 1$ (рис. 8, б). Увеличить длительность траектории в N_3^2 и N_4^2 невозможно также за счет увеличения длительности θ возбуждения каждой точки.

Сеть N_6^2 в этом отношении существенно отличается от предыдущих. При $\theta = 1$, картина распространения в N_6^2 сходна с описанной для N_4^2 . Однако, если $\theta = 2$, то от пары соседних точек возбуждение распространяется 2 такта, а при начальном возбуждении трех точек одного треугольника (рис. 8, в), последующая волна возбуждения не вырождается. Таким образом, в сети N_6^2 , совмещая эффекты пространственной и временной суммации воздействий, можно создать невырождающееся распространение возбуждения при $\aleph = 2$, однако сеть теряет это свойство при $\aleph = 3$ [13].

Сеть N_8^2 , при $\aleph = 2$ и $\theta = 1$, позволяет создать невырождающееся распространение без использования временной суммации начальным возбуждением двух соседних точек. При выбранных начальных условиях диагональная пара точек этим свойством не обладает, а простая пара соседних точек – обладает. В последнем случае и при $\aleph = 2$ фронт имеет устойчивую форму: состоит из двух фронтов, содержащих по 4 точки (рис. 8, з). Этот случай характерен для создания в однородной изотропной среде неизотропной формы распространения возбуждения [13].

Таким образом, для понимания функциональной организации технологических сред моделируемых дискретными точечными тканями в «мозаичном пространстве» требуется определить необходимые и достаточные условия невырожденного распространения, инициированного начальным возбуждением клеточек-точек, со своей топологией связей, с последующим определением конфигурации фронта волны возбуждения. Начальные условия процесса в аддитивных технологиях определяются мощностью, расходом и распределением в пространстве и во времени потоков энергии и подачи материала [14].

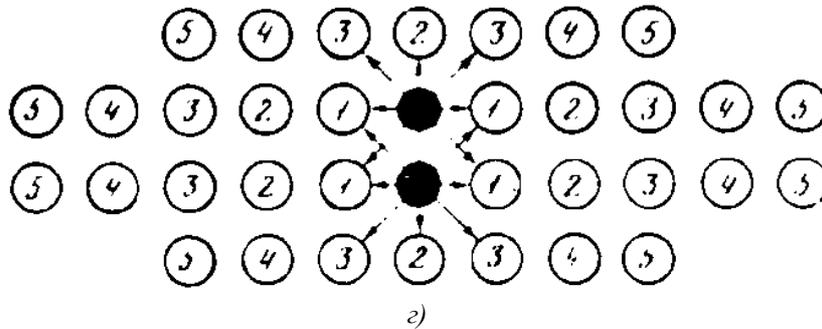
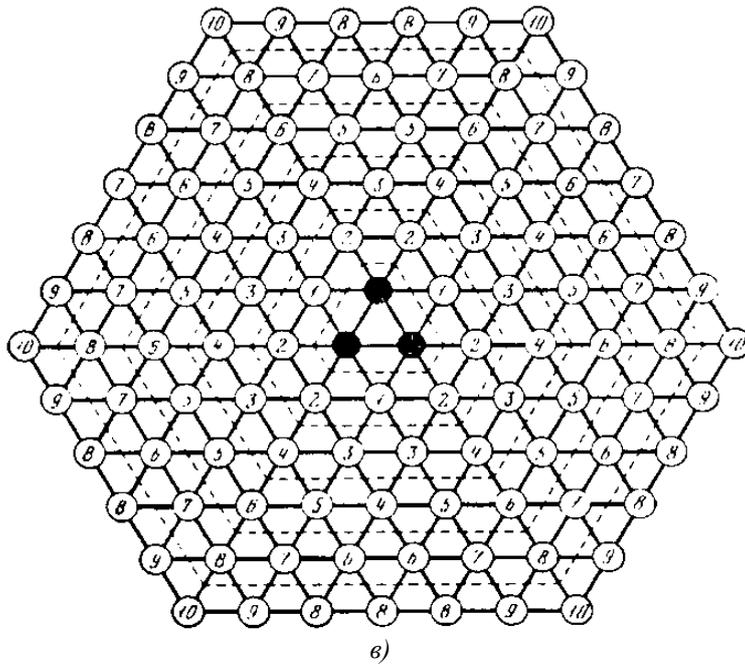
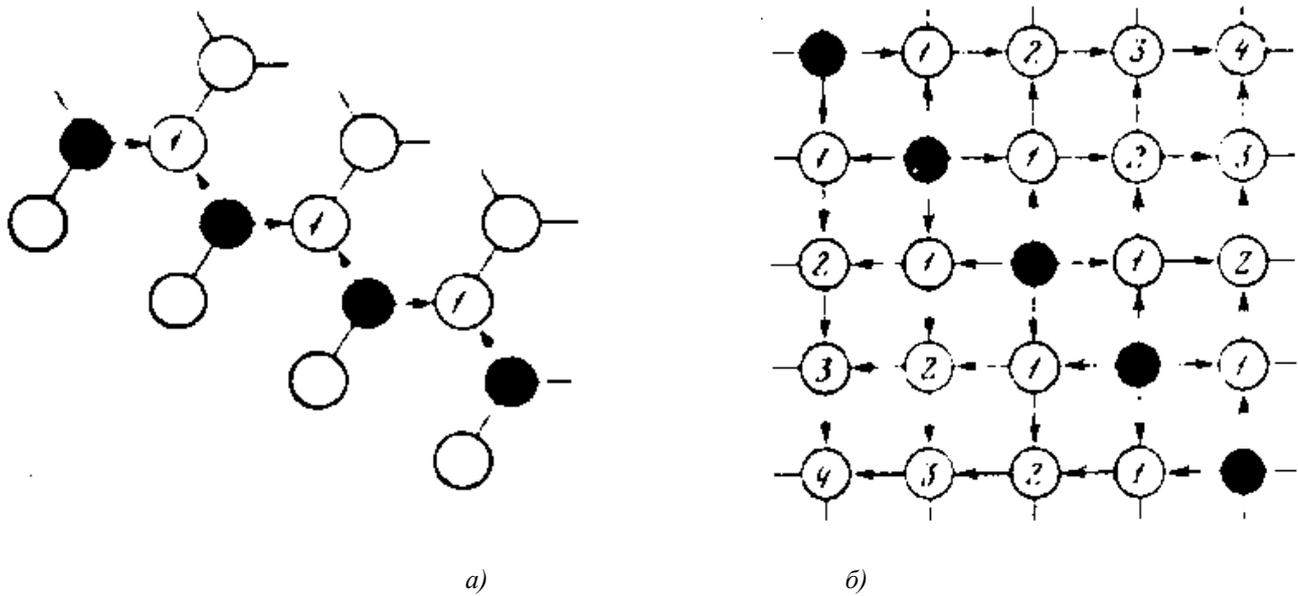


Рис. 8. Формы распространения возбуждения при пороге $\aleph = 2$: вырождение возбуждения в N_3^2 (a), N_4^2 (б); невырождающаяся волна в N_6^2 при $\theta = 2$ (e); в N_8^2 при $\theta = 1$ (z)

Заключение

1. Анализ современного состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства позволяет говорить о новой парадигме в его эволюции – «Индустрии 4.0», обозначающей переход к самовоспроизводству машин, в том числе в качестве частей организмов или самих организмов.

Формируется и детализируется концепция «цифрового предприятия», в которой аддитивные технологии являются определяющим звеном системы, включающей развитые подсистемы 3D-проектирования и управления производством и потреблением, начиная от моделирования изделия, его материалов и компонентов в соответствии с новыми технологическими возможностями и заканчивая получением и эксплуатацией функционально ориентированного кастомизированного изделия.

2. Предложена единая диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства изделий, представляющая собой конечный автомат и показано, что она может использоваться как для 3D-принтера, обеспечивающего прямое «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала. При этом структурные элементы «мозаичного пространства» клеточные машины, построенные на основе модели самовоспроизведения фон Неймана, могут применяться для описания процессов, как в конструкционных материалах, так и в функциональных биологических тканях.

3. Рассмотрена континуальная модель точечной ткани «мозаичного пространства», в которой каждая точка не отличается по свойствам от клеток дискретной модели и находится в одном из трех состояний: покоя, возбуждения и рефрактивности. Показано, что распространение воздействий в технологической среде может описываться с применением классических волновых принципов для моделирования изменений и передачи состояний, структур и свойств материала.

В результате с позиций теории распределенных систем, вырождением распространения фронта волны возбуждения, стало возможным представлять технологический барьер – границу распространения в материале изделия интенсивных физико-технических воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

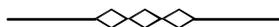
1. Кузин, Л.Н. Основы кибернетики. Т.2. Основы кибернетических моделей. – М.: Энергия, 1979. – 584 с.
2. Нейман фон Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. – М.: Мир, 1971. – 342 с.
3. Сигорский, В.П. Математический аппарат инженера. – Киев: Техника, 1977. – 768 с.
4. Голубев, О.П., Кухта, С.В., Мрочек, Ж.А. и др. Перспективные технологии машиностроительного производства / под общ. ред. Ж.А. Мрочека и М.Л. Хейфеца. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – 204 с.
5. Хейфец, М.Л. Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 4(58). – С. 3–9.
6. Чижик, С.А., Хейфец, М.Л. Синерготехнологии послойного синтеза изделий // Наука и инновации. – 2016. – № 2(156). – С. 13–16.
7. Витязь, П.А., Ильющенко, А.Ф., Хейфец, М.Л. Оперативное макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 3–8.
8. Чижик, С.А., Хейфец, М.Л., Филатов, С.А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – №4(29). – С.68–74.
9. Хейфец, М.Л. Технологические методы повышающие производительность формообразования и качество поверхностных слоев деталей // Технологическое управление качеством поверхности деталей: сборник научных трудов. – Киев: АТМ Украины, – 1998. – С. 42–50.
10. Хейфец, М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – 156 с.
11. Акулович, Л.М., Аношко, А.П., Зевелева, Е.З. и др. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под общ.ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чеминова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.
12. Дружинин, В.В., Конторов, Д.С. Проблемы системологии. – М.: Советское радио, 1976. – 296 с.
13. Смолянинов, В. В. Математические модели биологических тканей. – М.: Наука, 1980. – 368 с.
14. Чижик, С.А., Хейфец, М.Л., Филатов, С.А. Технологические барьеры при высокоинтенсивных воздействиях в процессах послойного синтеза и обработки материалов // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2015, – № 3. – С. 107–113.

REFERENCES

1. Kuzin, L.N. Fundamentals of cybernetics. Vol.2. *Fundamentals of Cybernetic Models*. – М.: Energy, 1979. – pp. 584 с.

2. Neuman von J. *Theory of Self-reproducing Automatic Machines*. – М.: Mir, 1971. – pp. 342.
3. Sigorsky, V.P. *Engineer's Mathematical Apparatus*. – Kyiv: Techniques, 1977. – pp. 768.
4. Golubev, O.P., Kukhta, S.V., Mrochek, Zh.A. et al. *Promising Technologies in Engineering Production* / under the general editorship of Zh.A. Mrochek and M.L. Heifets. – Novopolotsk: PSU, 2007. – pp. 204.
5. Heifets, M.L. Additive synergistic technologies of layer synthesis of composite products at energy flux impact // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 4(58). – pp. 3–9.
6. Chizhik, S.A., Heifets, M.L. Synergetic technologies of layer product synthesis // *Science and Innovations*. – 2016. – № 2(156). – pp. 13–16.
7. Vityaz, P.A., Iliyushchenko, A.F., Heifets, M.L. Efficient prototyping and production of complex composite products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – № 2. – pp. 3–8.
8. Chizhik, S.A., Heifets, M.L., Filatov, S.A. Outlooks in technological complex development for additive synthesis of composites and product shaping // *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. – 2014. – №4(29). – pp.68–74.
9. Heifets, M.L. Technological methods increasing shaping efficiency and surface layer quality in parts // *Technological Control of Surface Quality in Parts: Proceedings*. – Kyiv: ATM of Ukraine, – 1998. – pp. 42–50.
10. Heifets, M.L. *Material Properties Formation at Parts Layer Synthesis*. – Novopolotsk: PSU, 2001. – pp. 156.
11. Akulovich, L.M., Anoshko, A.P., Zeveleva, E.Z. et al. *Intelligent Production: State and Development Outlooks* / under the general editorship of M.L. Heifets and B.P. Chemisov. – Novopolotsk: PSU, 2002. – pp. 268.
12. Druzhinin, V.V., Kontorov, D.S. Problems in systemology. – М.: *Soviet Radio*, 1976. – pp. 296.
13. Smolyaninov, V.V. *Simulators of Biological Tissues*. – М.: Science, 1980. – pp. 368.
14. Chizhik, S.A., Heifets, M.L., Filatov, S.A. Technological barriers at high-intensive impacts in processes of layer synthesis and material treatment // *Proceedings of NAS of Belarus. Set of Physical-Engineering Sciences*. – 2015, – № 3. – pp. 107-113.

Рецензент д.т.н. В.И. Аверченко



Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбкова.

Сдано в набор 09.03.2017. Выход в свет 30.04.2017.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

