

УДК 330.46.001.57:338.33.001.76

ключевые слова: нанотехнологии, латентный спрос, имитационные модели

А. В. Гребёнкин, В. В. Акбердина

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ «НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО» ПОВЕДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ¹

В статье предложены и протестированы имитационные модели формирования условий диффузии нанотехнологий как основы модернизации существующих производств. Опрос руководителей промышленных предприятий Свердловской области выявил латентный спрос на нанотехнологические разработки, освоенные другими компаниями наноустройства, композитные материалы, технические системы, реализующие новые физико-химические свойства. В результате моделирования (на основе нелинейных моделей Вайдлиха) выявлены силы кооперативного и антагонистического воздействия, прямого и косвенного влияния темпов и условий развития технологий различного уровня. Получена и протестирована модель продвижения нанотехнологий.

Под инновационным поведением промышленных систем, разновидностью которого может рассматриваться «нанотехнологическое» поведение, мы понимаем широкий спектр намерений, желаний, готовности, восприимчивости и активности, аккумулирующихся в планах, программах и реальных действиях руководителей промышленных предприятий по поводу инновационных преобразований, в т. ч. нанотехнологической модернизации. Если вопросам общего инновационного поведения посвящено большое число исследований, то выделение нанотехнологического аспекта пока еще вне поля пристального внимания экономистов.

В то же время нанотехнологические исследования и разработки постепенно переходят к уровню промышленного освоения. Разработанная в Свердловской области программа развития нанотехнологий получила правовой статус 30.11.2007 г. в виде Постановления Правительства Свердловской области, включила не только поддержку фундаментальной науки в этой сфере, но и совместное финансирование внедрения отдельных проектов на промышленных предприятиях. За 2008–2009 гг. из областного бюджета было выделено 134 млн руб. [1, с. 11]. В 2010 г. финансируется 21 нано-

технологический проект. Несколько проектов вышли на уровень федеральной поддержки — через госкорпорацию «Роснано».

Опрос топ-менеджеров ряда промышленных предприятий региона (опрос проводился совместно с отделом науки и инноваций Министерства промышленности и науки Правительства Свердловской области) позволил получить 75 предложений-запросов на устройство и материалы с использованием нанотехнологий). Анализ предложений 23 предприятий (в т. ч. 15 крупных заводов металлургии, машиностроения и приборостроения — ОАО «Синарский трубный завод», ООО «ВИЗ-сталь», ОАО «Уральская фольга», ОАО «Уралбурмаш», ФГУП «Уралтрансмаш» и др.) показал, что преобладают запросы руководителей предприятия на интуитивно воспринимаемые новые свойства материалов (повышение прочности и износостойкости, снижение поверхностного трения и т. д.), известные из популярных нанотехнологических публикаций, и эффективные специальные наноустройства, например, устройства отображения информации с высокой разрешающей способностью, низким энергопотреблением и высокой светоотдачей.

Сигналы от руководителей промышленных предприятий свидетельствуют о том, что в регионе формируется латентный спрос на продукцию наноиндустрии, поставляемую со стороны. Руководители либо уверены в вечном существовании той технологической базы, которая определяет профиль их предприятий, либо убеждены, что на основе существующих российских институтов невозможна нанотехнологическая модификация действующих производств. Они ждут готовых решений, касается ли это покупки энергосберегающих светильников (светодиодов) или новых конструкционных наноматериалов.

Переход к новым технологиям, т. е. нанотехнологическая модернизация промышленности требует имитационного моделирования условий переходных процессов. Основой таких моделей могут служить математические модели В. Вайдлиха, которые в начале 1990-х гг. были применены к социальной динамике [2].

¹ Статья подготовлена при поддержке РФФИ, проект 10-06-00335а

Математическая модель Вайдлиха, описывающая взаимодействие кооперативных и антагонистических сил в обществе, является классическим примером в математической социологии и получила множество обобщений и усовершенствований вариантов применения. Такой подход к моделированию Вайдлих называет полукачественным, поскольку в нем играют роль не собственно числовые значения переменных, а общий характер их изменения. Полукачественные модели могут и должны быть достаточно общими и простыми и при этом описывать суть динамического поведения реальной системы независимо от конкретных деталей ее реализации. И только в случае когда в модели системы рассматриваются переменные, по которым проводятся измерения и присутствуют эмпирические данные, полукачественная модель может превратиться в количественную с помощью подстройки под данные своих параметров. В соответствии со спецификой переменных такие модели можно использовать в дальнейшем для кратко- и среднесрочных прогнозов.

К числу несомненных достоинств данной группы моделей следует отнести наглядность и прозрачность интерпретации.

Рассмотрим вначале возможности использования модели Вайдлиха для имитационного моделирования смены технологических укладов. Будем использовать понятие «технологический уклад» на национальном или региональном уровне, однако заметим, что рассмотренные ниже модели могут быть применены для описания механизма внедрения технологических инноваций на любом уровне.

Введем макропеременные, характеризующие объемы производства технологических укладов в промышленности: x — объем производства нового ТУ, y — совокупный объем производства устаревших ТУ.

Указанные макропеременные могут по-разному влиять друг на друга. Будем называть одну переменную кооперативной по отношению к другой, если первая стремится увеличить значение второй при больших собственных значениях и уменьшить при малых. Иными словами, кооперативная переменная стремится сравнять значение переменной, на которую она действует, со своим собственным значением. Но возможен и другой вариант: первая переменная будет подавлять вторую в том случае, если значение первой велико, и усиливать, если значение первой — мало. Следовательно, первая переменная стремится противопоставить ве-

личину второй переменной своей собственной величине. В этом случае будем называть первую переменную антагонистической по отношению ко второй.

Простым типом уравнений, способных содержать взаимодействия кооперативного или антагонистического типа, являются уравнения вида:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x[a(y)s - x], \\ \frac{dy}{dt} &= y[b(x)s - y],\end{aligned}\quad (1)$$

где t — безразмерное время; s — регулируемый параметр, характеризующий степень влияния макропеременных друг на друга; $a(y)$ и $b(x)$ — функции влияния, обуславливающие кооперативный или антагонистический характер взаимодействия макропеременных.

Функции влияния имеют следующий вид:

1) если воздействие y на x кооперативное:

$$\begin{aligned}a(y) &= a_- < 0, \text{ если } 0 < y \ll y_s, \\ a_+ &> 0, \text{ если } y_s < y \ll \infty;\end{aligned}\quad (2)$$

2) если воздействие y на x антагонистическое:

$$\begin{aligned}a(y) &= a_+ > 0, \text{ если } 0 < y \ll y_s, \\ a_- &< 0, \text{ если } y_s < y \ll \infty;\end{aligned}\quad (3)$$

3) если воздействие x на y кооперативное:

$$\begin{aligned}b(x) &= b_- < 0, \text{ если } 0 < x \ll x_s, \\ b_+ &> 0, \text{ если } x_s < x \ll \infty;\end{aligned}\quad (4)$$

4) если воздействие x на y антагонистическое:

$$\begin{aligned}b(x) &= b_+ > 0, \text{ если } 0 < x \ll x_s, \\ b_- &< 0, \text{ если } x_s < x \ll \infty.\end{aligned}\quad (5)$$

Очевидно, что при y_s воздействие y на x переключается с подавления на поддержание, согласно (2) или (3), при x_s воздействие x на y также переключается с подавления на поддержание, согласно (4) или (5).

Возможны четыре варианта воздействия макропеременных между собой:

— переменная x оказывает кооперативное воздействие на переменную y , а переменная y кооперативно действует на x ;

— переменная x оказывает антагонистическое воздействие на переменную y , а переменная y антагонистично действует на x ;

— переменная x оказывает кооперативное воздействие на переменную y , а переменная y антагонистично действует на x ;

— переменная x оказывает антагонистическое воздействие на переменную y , а переменная y кооперативно действует на переменную x .

В случае симметричного характера взаимодействия (случаи 1 и 2) система быстро приходит (в зависимости от начальных условий) к одному из двух состояний равновесия, которые являются устойчивыми узлами.

В асимметричных случаях (случаи 3 и 4) изображающая точка движется по фазовой плоскости квазициклично, с течением времени приближаясь к устойчивому фокусу (x_s, y_s) , причем интенсивность скручивания фазовой траектории определяется параметром системы s : чем больше s , тем медленнее затухают колебания, при $s \rightarrow \infty$ наблюдаются периодические незатухающие колебания. Все производные по времени в этой точке равны нулю; иными словами, если значения переменных каким-то образом достигли (x_s, y_s) , то ни в какой обозримой перспективе они уже практически не будут меняться. При всяком небольшом изменении x или y система, попав на любую из ближайших фазовых траекторий, скоро плавно и безболезненно вернется в исходное состояние.

Наиболее интересен для экономической интерпретации длинноволновой динамики случай 3 [3], когда новый ТУ действует кооперативно, совокупность устаревших ТУ — антагонистично. При таком характере взаимодействия макропеременных можно проинтерпретировать цикл Кондратьева:

1. Стадия процветания ($x > x_s, y > y_s$). Процветающий ТУ (y) поддерживается зарождающимся ТУ (x). Но отрасли существующего ТУ начинают подавлять новшества, поскольку их основная прибыль определяется апробированной серийной продукцией и масштабом производства.

2. Стадия спада ($x < x_s, y > y_s$). В то время как все еще продолжается подавление новых разработок (объем x), недостаток новых тенденций начинает приводить к износу стареющих отраслей (объем y) и приводит к спаду.

3. Депрессия ($x < x_s, y < y_s$). Стареющие отрасли (объем y) становятся убыточными и соскальзывают в кризис. Однако потеря ими поддерживающей силы приводит к возрождению новых отраслей.

4. Восстановление ($x > x_s, y < y_s$). Поскольку кризис устаревших отраслей y способствовал подъему сильных новых отраслей x , последние теперь помогают модернизации основных отраслей.

Модифицируем модель Вайдлиха для трехмерного пространства, что точнее описывает ситуацию многоукладности экономики, отражает экономико-технологическую реальность.

Выделим три типа промышленных систем (ПС) разного технологического уровня с точки зрения масштаба нанотехнологической модернизации. ПС-1 — системы с технологией, соответствующей III и IV технологическим укладам, отказывающиеся (по разным причинам: отсутствие средств, инерция мышления и др.) от инноваций в виде наноматериалов и наноустройств; ПС-2 — системы, проявляющие заинтересованность в указанном виде инноваций и реализующие элементы нанотехнологических разработок для улучшения качества и снижения издержек; ПС-3 — системы, освоившие и предлагающие новые технологии и оборудование для производства наноматериалов и наноустройств в целях получения конкурентных преимуществ. Условно можно отнести ПС-2 и ПС-3 к IV или V и VI технологическим укладам соответственно.

В этом случае z — объем производства ПС-1, которые во многих промышленных регионах России по-прежнему остаются доминирующими. Объемы x и y — объемы производства соответственно ПС-2 и ПС-3. Предприятия ПС-1 (z), рассматривая варианты нанотехнологической модернизации, будут выбирать вариант постепенного обновления (то есть переход к элементам нанотехнологии ПС-2 (x)) или вариант скачка (то есть переход к ПС-3 (y)).

Система эволюционных уравнений имеет в этом случае вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x[a(y, z)s - x], \\ \frac{dy}{dt} &= y[b(x, z)s - y], \\ \frac{dz}{dt} &= z[c(x, y)s - z], \end{aligned} \quad (6)$$

где t — безразмерное время; s — регулируемый параметр, характеризующий степень влияния макропеременных друг на друга; $a(y, z)$, $b(x, z)$, $c(x, y)$ — функции влияния, обуславливающие кооперативный или антагонистический характер взаимодействия макропеременных.

Очевидно, что z оказывает кооперативное воздействие на переменные x и y : чем больше объемы производства или число ПС-1, тем в конечном итоге после модернизации будут больше объемы (или число предприятий) ПС-2 либо ПС-3. В свою очередь, макропеременные x и y оказывают антагонистическое воздействие на переменную z , поскольку научно-технический прогресс имеет поступательную направленность. С другой стороны, малые объемы производства и спроса на продукцию ПС-2 и

ПС-3 приводят к нежеланию ПС-1 производить нанотехнологическую модернизацию из-за песимистичных рыночных ожиданий.

С учетом конкуренции можно предположить взаимно антагонистический характер взаимодействия макропеременных x и y . Например, чем больше объемы производства и спроса на продукцию ПС-2 (x), особенно на внутреннем рынке, тем более привлекательным для предприятий ПС-1 будет казаться переход к нанотехнологической модернизации.

В зависимости от начальных условий промышленности после переходного процесса модернизации, приходит к одному из двух устойчивых состояний равновесия $(x_s, 0, z_s)$ или $(0, y_s, z_s)$. Во время процесса структурной модернизации, который в реальном времени может быть весьма продолжительным и занимать десятилетия объемы производства (число предприятий) технологического вида ПС-1, внутренний спрос на продукцию которого был ниже, не увеличиваются (снижаются), что может привести к полному вытеснению его из совокупной промышленной системы.

Вместе с тем такие крайние решения практически не имеют под собой экономической логики. В этой связи рекомендации «слабому» технологическому укладу (x или y) основываются на анализе точки переключения влияния (x_s, y_s, z_s) , через которую проходит поверхность, разделяющая области притяжения аттракторов. Необходимо расширить границы области притяжения аттрактора, соответствующего «слабому» технологическому укладу. Для этого нужно уменьшить значение той координаты, которая отвечает за данный тип ПС. При этом существенно расширяется область притяжения устойчивого фокуса. Иными словами, нужно стараться всячески уменьшить значение объемов производства (числа предприятий) в «слабой» ПС, при достижении которого функция влияния начинает оказывать подавляющее воздействие на конкурирующий «сильный» тип ПС. Не следует гнаться за количеством, следует обратить внимание на финансовые затраты на модернизацию, новые качественные свойства продукции и соответствующую подготовку спроса.

Выше было отмечено, что при экономической интерпретации предложенной модели мы использовали понятие «технологический уклад». Переходя к численным решениям, уточним интерпретацию используемых переменных и будем говорить о модели продвижения нанотехнологий.

Все промышленные предприятия экономической системы, входящие в воспроизводственный цикл, разделим на три группы. Пусть $x(t)$ — число промышленных предприятий, которые в силу различных причин отказываются от нанотехнологической модернизации, $y(t)$ — число промышленных предприятий, которые заинтересованы в такой модернизации (ПС-2) и рассматривают варианты нанотехнологических решений, $z(t)$ — число предприятий, соответствующих типу ПС-3.

Предположим, что известно лишь начальное число предприятий и в любой момент $t_0 \in [0, T]$ известна общая численность, т. е. $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$, $z(0) = z_0$.

$$x(t) + y(t) + z(t) = x_0 + y_0 + z_0. \quad (7)$$

Тогда динамика продвижения нанотехнологий описывается такой системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \alpha zy - (\gamma_1 + \gamma_2) z^2, \\ \dot{y}(t) &= -\alpha zy - \beta y + \gamma_1 z^2 + \delta x, \\ \dot{x}(t) &= \beta y + \gamma_2 z^2 - \delta x. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь α — частота контактов предприятий z и y ; $\gamma = (\gamma_1 + \gamma_2)$ — коэффициент конкуренции среди предприятий z ; β и δ — частота случаев изменения предпочтения в отношении нанотехнологической модернизации.

Вытесненные в ходе конкуренции предприятия либо возвращаются в число склонных к такого типа модернизации, либо отказываются от модернизации (например, из-за высоких затрат). Из системы уравнений (8), после их почленного сложения получаем:

$$\frac{d}{dt} [x(t) + y(t) + z(t)] = 0. \quad (9)$$

Условие (9) согласуется с предположением о неизменном числе предприятий (7) в течение времени $[0, T]$.

Рассмотрим другой подход к описанию подобных процессов: к системе с начальными условиями добавляется условие постоянства суммы искомым функций, так что задача становится переопределенной и в такой постановке не имеет аналитического решения. Однако, учитывая иерархию времен, в таких моделях можно применить метод квазистационарных концентраций (КСК) редукации системы, впервые предложенный в химической кинетике и математически обоснованный А. Н. Тихоновым (см.: [4]).

Согласно этому методу, для «быстрой переменной» дифференциальное уравнение в сис-

теме заменяют алгебраическим. Таким образом, переходят к вырожденной системе, в которой начальное условие для «быстрой» переменной фактически не учитывается, так как последняя в течение своего периода индукции, короткого по сравнению с исследуемым в модели отрезком времени, достигает своего квазистационарного состояния.

Поведение такой системы для описанных выше предприятий без конкуренции описывается моделью, в которой наряду с системой трех уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= [a - b_1 y - b_2 z]x, \\ \dot{y}(t) &= [c - d_1 x - d_2 z]y, \\ \dot{z}(t) &= -[e - f_1 x - f_2 y]z.\end{aligned}\quad (10)$$

учтено условие постоянства общего числа:

$$x(t) + y(t) + z(t) = N. \quad (11)$$

Выражая тогда из (10) $x(t)$ — «быструю переменную», получим для нее алгебраическое уравнение:

$$x(t) = N - y(t) - z(t), \text{ где } y(t) > 0, z(t) > 0. \quad (12)$$

Подставляя в систему (10), получим для функций $y(t)$ и $z(t)$ двухвидовую модель с квадратичной нелинейностью:

$$\begin{aligned}\dot{y}(t) &= [-(d_1 N - c) + (d_1 - d_2)z]y + d_1 y^2, \\ \dot{z}(t) &= [(f_1 N - e) - (f_1 + f_2)z]z - f_1 z^2.\end{aligned}\quad (13)$$

При определенном подборе параметров система (12)–(13) может иметь стационарное решение.

Стационарное решение этой системы может быть либо устойчивым фокусом, либо центром (в случае предельного цикла). В системах без конкуренции существование всех трех видов может происходить в стационарном или автоколебательном режиме.

Анализ численных решений показал, что система (10) является неустойчивой к изменению параметров. В системе трех уравнений при наличии конкуренции, т. е. при наличии квадратичных членов в уравнениях возможны бифуркационные явления, приводящие к возникновению квазистохастических режимов [5]. В таких системах наряду с устойчивым состоянием равновесия возможны колебательные изменения числа всех трех типов предприятий. В некоторой области параметров может возникнуть предельный цикл сложной формы.

Выводы

— Анкетирование топ-менеджмента уральской промышленности показало знание ими ожидаемых результатов нанотехнологической революции и потенциальную готовность к внедрению продуктов реальной nanoиндустрии для увеличения дохода, повышения качества и снижения затрат на выпускаемую продукцию. Однако латентный спрос существует по отношению к готовым, технологически освоенным другими компаниями наноустройствам, биоматериалам, техническим системам, реализующим новые свойства наномира. Условия для нанотехнологической модернизации действующих промышленных производств пока не созданы, хотя существуют предпосылки в виде поддерживаемых областным бюджетом (в соответствии с Постановлением Правительства Свердловской области) отдельных промышленных нанотехнологических проектов (в 2010 г. — 21 проект).

— Исследование условий возможного выбора промышленниками-предпринимателями активной реализации нанотехнологических разработок в действующих производствах и освоению новых технологий проводилось на основе имитационных моделей, в основу которых легли полукачественные модели Вайдлиха и их модификации. В результате моделирования выявлены силы кооперативного и антагонистического воздействия, прямого и косвенного влияния темпов и условий развития технологий различного уровня. Получена и протестирована модель продвижения нанотехнологий, их диффузии в промышленную систему.

— Анализ численных решений предложенной системы нелинейных уравнений показал, что воспроизводственная система, включающая в себя различные типы промышленных систем по уровню восприятия нанотехнологической модернизации, является неустойчивой к изменению параметров. Система имеет стационарное решение только при сравнительно небольших значениях числа предприятий, готовых к нанотехнологической модернизации, и предприятий, предлагающих нанорешения. Вместе с тем, наличие такой устойчивой точки в динамике технологического развития может рассматриваться как отсутствие динамики, что противоречит самой сущности поступательного научно-технического прогресса с чередой бифуркаций. В этой связи в предложенной имитационной модели наряду с устойчивым состоянием равновесия возможны и колеба-

тельные режимы изменения числа всех типов предприятий, что определяет динамизм технологического развития и появление ситуаций резонансного улучшения условий «нанотехнологического» поведения владельцев и менеджеров промышленных предприятий.

Список литературы

1. Аннотации выполненных в 2009 году НИОКР по приоритетным направлениям развития нанотехнологий. Екатеринбург: НП «Уральский центр nanoиндустрии», 2009. 107 с.

2. Вайдлих В. Социодинамика. Системный подход к математическому моделированию в социальных науках:

пер. с англ. / под ред. Ю.С. Попкова, А.Е. Семечкина. М. : Едиториал УРСС, 2004. 480 с.

3. Трубецков Д. И. Введение в синергетику. Хаос и структуры. М.: Едиториал УРСС, 2004. 240 с.

4. Амироков С. Р. Применение метода конечных элементов к решению системы двух уравнений Лотки-Вольтерра // М-лы 7-й всероссийской науч.-тех. конф. 23 декабря 2003 г. «Современные проблемы математики и естествознания». Нижний Новгород: Межрегиональное Верхне-Волжское отделение АТН РФ, 2003. с. 32-33.

5. Базыкин А. Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Москва — Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.