

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Варшавский Л.Е.

В статье показывается близость моделей физико-химических систем и моделей конкуренции фирм, ориентированных на максимально возможный рост. Рассматриваются примеры использования одногрупповой модели кинетики ядерных реакторов при анализе и прогнозировании взаимосвязи между смежными направлениями инновационной деятельности, при распространении новых технологий мобильной беспроводной связи, а также при исследовании социальной стабильности.

DOI: 10.20537/mce2021econ09

Введение. Динамика поведения экономических систем может иметь много общего с динамикой физико-химических и биологических систем. Так, при некоторых условиях, процессы конкуренции в этих системах (конкуренция фирм, конкуренция химических компонентов, конкуренция биологических видов) описываются аналогичными или близкими по форме моделями. Понимание этого факта привело к широкому использованию моделей конкуренции видов Лотки–Вольтерра, «хищник–жертва», модели Басса, модели Фишера–Колмогорова и др. при исследовании процессов распространения технологий в технологическом прогнозировании [1, 2].

Вместе с тем, в экономических исследованиях может быть использован более широкий круг моделей физико-химических систем. Имеющаяся общность в описании явлений в разных типах систем может быть использована как при проведении исследований, так и при преподавании и изучении экономической теории.

Ниже рассматриваются модели некоторых экономических систем, тесно связанные с моделями динамики концентрации конкурирующих компонентов, а также с моделью кинетики ядерного реактора.

1. Конкуренция на рынке однородной продукции фирм, ориентированных на максимально возможный рост. В настоящем разделе предполагается, что стратегия участников рынка однородной продукции (фирм) состоит в инвестировании всей получаемой прибыли в развитие производства. Предполагается линейная зависимость объемов производства $Q_i(t)$ в момент t от стоимости основного капитала $K_i(t)$, т.е. $Q_i(t) = g_i * K_i(t)$, где g_i — капиталоотдача, $i=1,2,...,N$, N — число участников рынка (фирм). Тогда динамика основного капитала i -й фирмы описывается следующим уравнением [3]:

$$\frac{dK_i}{dt} = f_i K_i [p(Q) - c_i], \quad i=1,2,...,N. \quad (1)$$

где $p(Q)$ — обратная функция спроса, характеризующая связь между ценой продукта и суммарным объемом его выпуска $Q(t) = \sum_{i=1}^N Q_i(t)$ (предполагается, что она является монотонно убывающей функцией $Q(t)$), $f_i = (1 - \text{tax}) * g_i$, tax — ставка налога на прибыль, c_i — операционные затраты в расчете на единицу выпускаемой продукции (для упрощения записи величина отношения коэффициента выбытия фондов к f_i включена в c_i).

Как правило, на рынках высокотехнологичной продукции присутствует лидер, имеющий наименьшие значения операционных затрат, т.е. $c_N < c_i$, $i = 1,2,...,N$.

Тогда, при постоянстве всех f_i и g_i , $i = 1,2,...,N$, справедливо:

$$\frac{1}{f_i K_i} \frac{dK_i}{dt} - \frac{1}{f_N K_N} \frac{dK_N}{dt} = c_N - c_i, \quad (2)$$

откуда можно определить динамику рыночных долей фирм:

$$s_i(t) = \frac{f_i K_i(t)}{\sum_{j=1}^N f_j K_j(t)} = \frac{g_i (K_N(t)/K_{N0})^{f_i/f_N} K_{i0} \exp f_i (c_N - c_i) t}{\sum_{j=1}^N g_j (K_N(t)/K_{N0})^{f_j/f_N} K_{j0} \exp f_j (c_N - c_j) t}, \quad (3)$$

где $K_{i0} = K_i(0)$, $i = 1,2,...,N$.

Если $\exists Q^* < \infty$, такое, что $p(Q^*) \leq c_N$, то, очевидно $K_i(t) < \infty$, $i = 1,2,...,N$. В этом случае из (1) и (3) следует, что $\lim_{t \rightarrow \infty} K_i(t) = 0$, $i = 1,2,...,N-1$ и, следовательно, $s_i(t) \rightarrow 0$, $i = 1,2,...,N-1$ и

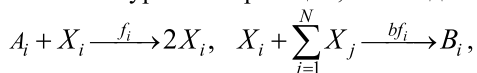
$s_N(t) \rightarrow 1$ при $t \rightarrow \infty$. Таким образом, в конечном счете, на рынке остается только лидер по удельным операционным затратам.

В случае равенства капиталотдачи всех участников рынка, т.е. при $f_i = f_j$, $i = 1, 2, \dots, N$, из (3) можно получить замкнутые выражения для расчета величин рыночных долей s_i :

$$s_i(t) = \frac{s_{i0} \exp\{f_i(c_N - c_i)t\}}{\sum_{j=1}^N s_{j0} \exp\{f_j(c_N - c_j)t\}}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

(s_{i0} — начальные значения рыночных долей фирм) практически совпадающие с выражениями, описывающими динамику концентрации концентрирующих компонентов в ряде физико-химических процессов, в частности в процессе производства и разрушения неорганических веществ, рассмотренном в [2, с.205–209].

Если, например, обратная функция спроса линейна, т.е. $p(Q) = a - b \sum_{i=1}^N Q_i$, то модель (1) идентична модели, описывающей неорганические конкурентные реакции, или модели автокатализа [1,2] типа:



кинетика которых описывается уравнением:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(a - c_i)x_i - bf_i x_i \sum_{j=1}^N x_j, \quad i=1, 2, \dots, N. \quad (1a)$$

Следует, однако отметить, что при переходе от непрерывных моделей к дискретным во времени вариантам, может нарушиться плавность изменения показателей, что снижает их практическую и теоретическую ценность (это иллюстрирует рис. 1 применительно к рассмотренной выше модели для триополии ($N=3$) со значениями параметров, равными $c_1 = 60, c_2 = 80, c_3 = 75$; $f_1 = 0.01; f_2 = 0.03; f_3 = 0.025$ условных единиц). Для более адекватного отражения реальных экономических процессов, и обеспечения возможности практического использования результатов моделирования, например, при прогнозировании, необходимо изначально (начиная со стадии идентификации) разрабатывать и

использовать дискретные во времени варианты моделей физико-химических и биологических систем.

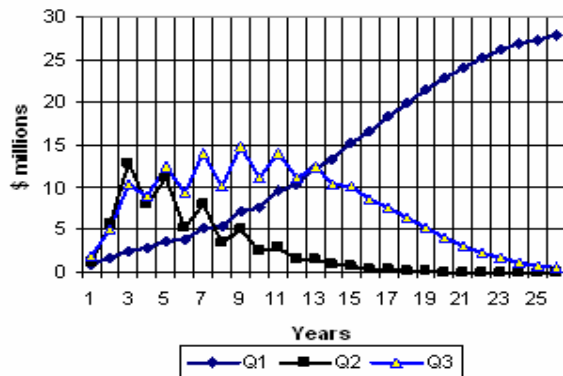


Рис. 1. Динамика объемов производства $Q_i(t)$ в модели (1) условной триполии.

2. Использование уравнения кинетики ядерного реактора. Рассматриваемая ниже упрощенная одnogрупповая модель кинетики ядерного реактора [4] описывает динамику числа мгновенных нейтронов P_t и продуктов деления S_t , являющихся источником запаздывающих нейтронов. Дискретный вариант данной модели в одnogрупповом приближении имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} P_{t+1} &= (1 + u_t - \beta)P_t + \lambda S_t; \\ S_{t+1} &= \beta P_t + (1 - \lambda)S_t, \end{aligned} \quad (5)$$

где u_t — управление (реактивность), λ , β — коэффициенты модели, $0 < \lambda$, $\beta \leq 1$; $t = 1, 2, \dots, T$ (далее T — период прогнозирования). При $u_t > 0$ система (5) является неустойчивой. Это нетрудно показать, используя метод фазовой плоскости, а в случае постоянства $u_t = u > 0$ — критерий устойчивости дискретных систем, предложенный Джури [5].

Так, характеристический двучлен $f(z)$ системы (5) имеет следующий вид

$$f(z) = z^2 - \text{tr}(A)z + \det(A),$$

где $\text{tr}(A) = 2 + u - \beta - \lambda$ и $\det(A) = (1 + u - \beta)(1 - \lambda) - \beta\lambda = 1 - \beta - \lambda + u(1 - \lambda)$ — соответственно след и определитель матрицы $A = \begin{pmatrix} 1 + u_t - \beta; & \lambda \\ \beta; & 1 - \lambda \end{pmatrix}$ системы (5). Очевидно $f(1) = 1 - 2 + \beta + \lambda - u + 1 - \beta - \lambda + u(1 - \lambda) = -u\lambda < 0$, так, что одно из условий критерия устойчивости Джури для рассматриваемой системы не выполняется.

Варианты данной модели могут быть использованы при исследовании динамики взаимосвязи между показателями распространения новых технологий, рациональной динамики структуры затрат на исследования и разработки, при остро стоящей в настоящее время проблеме оценки влияния различных природоохранных мероприятий на динамику отходов производств, при моделировании динамики социологических процессов, а также при решении ряда других социально-экономических проблем.

В отличие от логистической модели или модели Басса, модель типа (5) позволяет анализировать и формировать прогнозные сценарии распространения и развития сразу нескольких (в случае однотехнологической модели двух) взаимосвязанных или конкурирующих технологий и процессов. В частности, на ее основе можно решать задачу вывода значений показателя P_t на целевую траекторию P_t^* с критерием:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T [(P_t - P_t^*)^2 + \rho u_t^2] \rightarrow \min_{u_t} \quad (6)$$

где $\rho > 0$, при ограничении (5).

2.1. Исследование динамики взаимосвязи объемов затрат на программное обеспечение (Enterprise Software) и на кибербезопасность (Cybersecurity-CS). При анализе и прогнозировании неуклонно возрастающих расходов на программное обеспечение и кибербезопасность представляет интерес прямая и обратная связь между этими показателями. Так, с одной стороны, разработка нового программного обеспечения вызывает необходимость создания новых средств кибербезопасности. С другой стороны, работы по кибербезопасности стимулируют разработку нового программного обеспечения. Такая взаимосвязь показателей может быть отражена моделью (5), в которой в качестве P_t выступают расходы на программное обеспечение, а в качестве S_t — расходы на кибербезопасность. Тогда коэффициенты модели можно интер-

претировать следующим образом: u_t — темп прироста планируемых расходов на программное обеспечение, не связанных с работами по кибербезопасности предыдущего года; β — доля расходов на завершённые в текущем году работы по программному обеспечению, которые влияют на создание новых средств кибербезопасности; λ — доля законченных в текущем году работ по кибербезопасности, требующих проведения дополнительных работ по программному обеспечению.

В настоящей работе на основе регулярно публикуемых данных компании Gartner о глобальных затратах на информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) (см. <http://www.gartner.com/>), с использованием нелинейного метода наименьших квадратов получены численные оценки параметров модели (5) (табл. 1).

Таблица 1. Оценки параметров модели анализа взаимосвязи затрат на программное обеспечение и на кибербезопасность

$\beta_0 = 1 + \bar{u} - \beta^*)$	β	λ
0.978	0.104	0.322

**)* здесь и далее \bar{u} — средний темп прироста показателя P_t за период оценивания.

Данные табл. 1 показывают, что работы по программному обеспечению оказывают определенное влияние на работы по кибербезопасности ($\beta = 0.104$). В то же время, работы по кибербезопасности стимулируют создание новых программных продуктов ($\lambda = 0.322$). При этом, за последнее десятилетие оценка среднегодового темпа прироста затрат на программное обеспечение $\bar{u} = \beta_0 + \beta - 1$ составляла 0.082, что хорошо согласуется с фактическими данными.

На основе полученных оценок модели (5) могут быть сформированы прогнозные сценарии динамики затрат на кибербезопасность при тех или иных вариантах изменения мировых затрат на программное обеспечение. Один из таких сформированных нами сценариев на перспективу до 2030 г., соответствующий экспоненциальному уменьшению переменной u_t , представлен на фазовом портрете (рис.2).

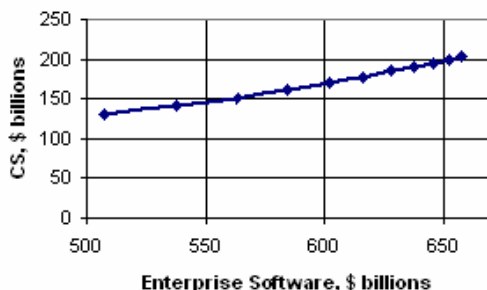


Рис. 2. Прогнозная зависимость между объемами затрат на кибербезопасность (CS, млрд долл.) и на программное обеспечение (Enterprise Software) при варианте роста последних до 660 млрд долл. в 2030 г.

2.2. Анализ динамики распространения систем беспроводной мобильной связи 4G и 5G. Модель (5) может быть использована при анализе и прогнозировании распространения систем беспроводной мобильной связи 4G и 5G.

4G. В рассматриваемом случае в качестве P_t выступают число подключений (connections) к 4G, а в качестве S_t — число подключений к более ранним системам (2G–3G). Тогда коэффициенты модели можно интерпретировать следующим образом: u_t — средний темп прироста числа новых подключений к системе мобильной связи 4G; β — доля неудачных подключений к системе мобильной связи 4G; λ — доля потребителей старых систем предыдущего года, переключившихся на систему 4G. Оценки параметров модели (5), применительно к распространению систем беспроводной мобильной связи 4G в США, найденные на основе данных [6,7] с использованием нелинейного метода наименьших квадратов, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценки параметров модели динамики распространения систем беспроводной мобильной связи 4G в США

$\beta_0 = 1 + \bar{u} - \beta$	β	λ
1.075	0.025	0.166

5G. Модель (5) использовалась нами при прогнозировании структуры подключений к системам мобильной связи в США на среднесрочную перспективу для разных целевых траекторий числа подключений к системе мобильной связи 5G P_t^* (рис. 3). С этой целью, решалась задача минимизации суммы квадратов отклонений числа подключений к системе мобильной связи 5G P_t от целевой траектории P_t^* (5)–(6), в которой S_t — число подключений к более ранним системам. Результаты расчетов приведены на рис. 3–4. Расчеты показывают, что при задаваемой целевой динамике числа подключений в системе 5G, доля последней в общем числе подключений в 2025 г. будет составлять примерно 60% (рис. 4).

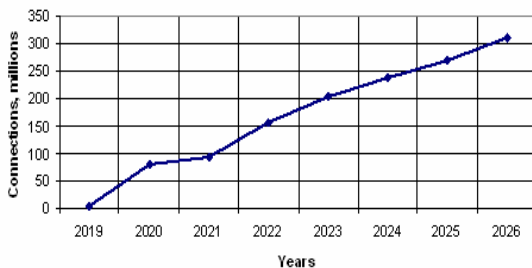


Рис. 3. Целевая динамика числа подключений (connections) P_t к системе мобильной связи 5G в США (млн.)

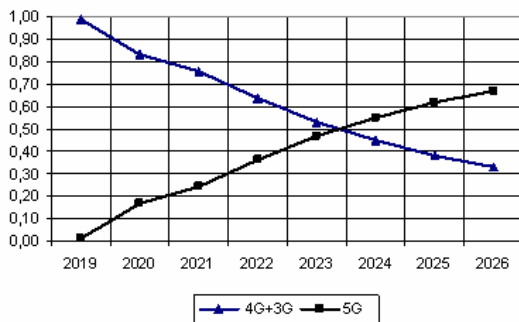


Рис. 4. Динамика структуры числа подключений к различным системам мобильной связи в США в США (прогноз).

2.3. Анализ взаимосвязи между объемами исследований и разработок и патентной активностью в США. Наряду с анализом структуры расходов на исследования и разработки, представляет интерес анализ взаимовлияния общих затрат на исследования и разработки (**R&D**) и патентной активности. Такой анализ может быть проведен по аналогии с пп. 2.1–2.2.

В рассматриваемом случае в качестве P_t выступают общие расходы на (**R&D**), а в качестве S_t — число подаваемых в США патентов (Utility Patent Applications). Тогда коэффициенты модели можно интерпретировать следующим образом: u_t — средний темп прироста планируемых (**R&D**), первоначально не связанных с поданными патентами предыдущего года; β — доля завершенных (**R&D**), влияющих на патентную активность; λ — доля поданных патентов предыдущего года, стимулирующих проведение новых (**R&D**). Оценки параметров модели (5), полученные на основе данных [7],[8] с использованием нелинейного метода наименьших квадратов, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Оценки параметров модели взаимовлияния общих затрат на исследование и разработки и патентной активности в США

$\beta_0 = 1 + \bar{u} - \beta$	β	λ
0.723	0.323	0.495

Полученные оценки позволяют сделать вывод о значительном стимулирующем влиянии патентной активности на общий объем (**R&D**) ($\lambda = 0.495$). Несколько слабее относительное влияние объемов завершенных (**R&D**) на патентную активность ($\beta = 0.323$). Последнее связано с тем, что часть подаваемых патентов создается вне научно-технического сектора.

На основе построенной модели можно проводить сценарные расчеты динамики одного из показателей (объема (**R&D**) — P_t), обеспечивающей вывод другого показателя (числа патентов) на заданную траекторию. На рис. 3, применительно к США, представлены результаты прогнозных расчетов объемов (**R&D**), необходимых для обеспечения постоянного годового 5%-ого темпа прироста числа подаваемых патентов.

Проведенные оценки свидетельствуют о достаточно надежной связи между числом подаваемых S_t и получаемых патентов SG_t , а также

между числом получаемых патентов SG_t и объемов венчурных инвестиций $VCinv_t$ в США:

$$SG_t = 0.759SG_{t-1} + 0.124S_t, \quad R^2 = 0.995; \quad (7a)$$

(0.067) (0.154)

$$VCinv_t = 0.870VCinv_{t-1} + 0.146SG_t, \quad R^2 = 0.961, \quad (7b)$$

(0.106) (0.197)

(рассчитано на основе данных о патентной деятельности за 2006–2019 гг.). Поэтому полученные результаты позволяют приближенно оценить влияние объемов (**R&D**) на объемы венчурных инвестиций (рис. 6).

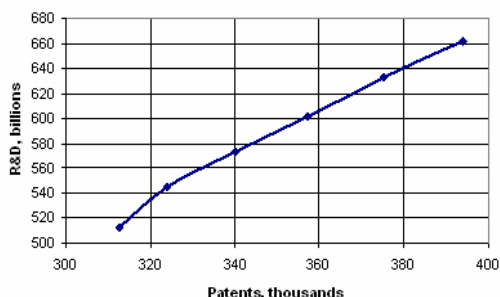


Рис. 5. Объемы (**R&D**) (млрд долл.), необходимые для обеспечения 5%-го темпа прироста числа подаваемых патентов в США (тыс.)

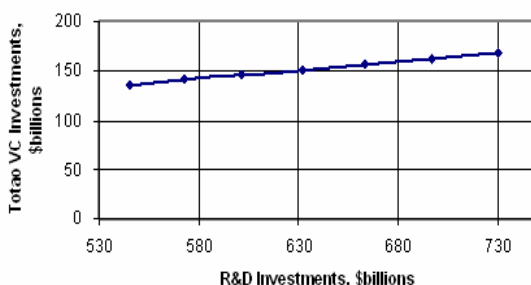


Рис. 6. Прогнозная зависимость между объемами венчурных инвестиций и объемами (**R&D**) (млрд долл.), необходимыми для обеспечения 5%-го темпа прироста числа подаваемых патентов в США в 2019–2025 гг. (млрд долл.)

2.4. Анализ и прогнозирование влияния средств массовой информации на стабильность социальных групп. В настоящее время в связи с быстрым распространением информационных технологий и социальных сетей в условиях углубляющегося неравенства, перед обществами остро стоит проблема анализа влияния современных средств массовой информации (СМИ или масс-медиа) на стабильность социальных групп. Необходимость исследования подобных проблем на основе динамических моделей была осознана еще до появления социальных сетей (см., например, [9]). Возможный подход к такому исследованию основан на использовании одного из вариантов модели (5).

Ниже рассматривается модель анализа и прогнозирования влияния и нейтрализации СМИ на стабильность структуры социальных групп. Предполагается, что во взаимодействии находятся 2 социальные группы численностью N_1 и N_2 человек, причем вторая группа находится в возбужденном состоянии. Масс-медиа, путем воздействия на первую группу, переводят часть ее участников $u_t N_{1t}$, $0 < u_t \leq 1$ в возбужденное состояние. Третья сторона пытается снять возбуждение второй группы, воздействуя на процесс ее «остывания» доступными ей средствами. Рассматриваемая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{1t+1} &= (1 - u_t - \beta)N_{1t} + \lambda N_{2t} + \mu T_t; \\ N_{2t+1} &= (u_t + \beta)N_{1t} + (1 - \lambda)N_{2t} - \mu T_t; \\ T_{t+1} &= \gamma N_{2t} + \alpha T_t + V_t, \end{aligned} \quad (8)$$

где $0 < \lambda, \alpha, \beta \leq 1$, $\gamma > 0$, T_t — переменная состояния, характеризующая снижение уровня возбуждения второй группы как за счет ее естественного «остывания», так и за счет воздействия третьей стороны V_t . В результате «остывания» второй группы происходит уменьшение ее численности на μT_t . По аналогии с термодинамическими системами можно считать, что уравнение обратной связи относительно переменной T_t в (8) характеризует динамику теплообмена между второй группой и внешней средой (включая третью сторону), в результате которого уменьшается внутренняя энергия второй группы, что далее приводит к некоторому снижению ее численности (параметр μ в этой аналогии является величиной, обратной химическому потенциалу).

Ввиду того, что из первых двух соотношений в (8) следует, что $N = N_{1t} + N_{2t} = \text{const}$, исходную систему (8) можно привести к системе из двух уравнений:

$$\begin{aligned} N_{1t+1} &= (1 - \lambda - u_t - \beta)N_{1t} + \mu T_t + \lambda N; \\ T_{t+1} &= -\gamma N_{1t} + \alpha T_t + \gamma N + V_t. \end{aligned} \quad (9)$$

Для исследования стратегий возбуждающей (масс-медиа) и третьей, «охлаждающей» стороны, можно попытаться решить минимаксную задачу с критерием:

$$J = \sum_{t=0}^T (N_{1t} - \bar{N}_1)^2 + \frac{1}{2} \rho_v V_t^2 - \frac{1}{2} \rho_u u_t^2 \rightarrow \min_{V_t} \max_{u_t}, \quad (10)$$

и ограничением (9), где \bar{N}_2, \bar{N}_2 , $(\bar{N}_1 = N - \bar{N}_1)$ — приемлемая (равновесная) для третьей стороны постоянная численность групп, с которой связаны равновесные значения других показателей (\bar{T}, \bar{V}_d) , подчиняющихся уравнениям (9), $\rho_v > 0$, $\rho_u > 0$ — весовые коэффициенты.

Однако более эффективный подход заключается в сведении исходной билинейной системы (5) к линейной с неопределенным коэффициентом $u_t = u_{\text{avg}} + dg_t$, $|g_t| \leq 1$, где d — постоянный коэффициент, характеризующий диапазон отклонения переменной u_t от предполагаемого уровня u_{avg} , а g_t — переменная, характеризующая неопределенность.

Тогда при $n_{1t} = N_{1t} - \bar{N}_1$; $\theta_t = T_t - \bar{T}$; $\sigma_t = dg_t n_{1t}$; $v_t = V_t - \bar{V}_d$ справедливо:

$$\begin{aligned} n_{1t+1} &= (1 - \lambda - u_{\text{avg}} - \beta)n_{1t} + \mu \theta_t + \sigma_t; \\ \theta_{t+1} &= -\gamma n_{1t} + \alpha \theta_t + v_t; \end{aligned} \quad (11)$$

где $\sigma_t^2 \leq d^2 n_{1t}^2$, а критерий (10) несколько изменится:

$$J = \sum_{t=0}^T n_{1t}^2 + \frac{1}{2} \rho_v v_t^2 + \frac{1}{2} \varepsilon^{-1} (n_{1t} - \sigma_t^2) \rightarrow \min_{v_t} \max_{\sigma_t}, \quad (12)$$

причем $\rho_v > 0$, $\varepsilon > 0$.

Один из подходов к оптимизации систем с неопределенными параметрами в соответствии с критерием (12) основан на решении расширенных уравнений Риккати [10,11]. В результате оптимальная стратегия для третьей стороны оказывается связанной с показателями системы следующим образом:

$$V_t = \bar{V}_d - F' \begin{pmatrix} n_{1t} \\ \theta_t \end{pmatrix} = \bar{V}_d - F' \begin{pmatrix} N_{1t} - \bar{N}_1 \\ T_t - \bar{T} \end{pmatrix},$$

где F — вектор, зависящий от положительно-определенного решения уравнения Риккати.

В качестве иллюстрации рассмотренного подхода на рис. 7 приведена динамика численности второй группы при изменении u_t по синусоидальному закону: $u_t = 0.05 * (1 - \sin(0.7t))$ как при наличии, так и при отсутствии управления с обратной связью, рассчитанной для наиболее вероятного среднего уровня $u_{avg} = 0.05$. В условном примере приняты следующие значения параметров: $\lambda = \rho_u = 0.03$; $\beta = u_{avg} = \varepsilon = 0.05$; $\mu = 0.01$; $\alpha = 0.05$; $\gamma = 0.01$, а также начальных значений численности групп и допустимой численности второй группы: $N_{10} = 25$; $N_{20} = 25$, $\bar{N}_1 = 30$; $\bar{N}_2 = 20$.

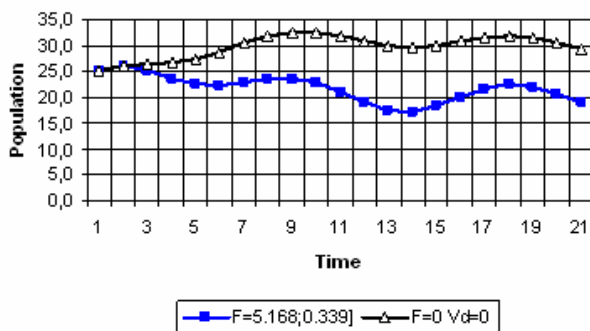


Рис.7. Динамика численности второй группы при наличии ($F=[5.168; 0.339]$) и отсутствии ($F=0$) управления с обратной связью.

Использование третьей стороной управления с обратной связью (или дополнительного «расхолаживания») приводит к достаточно близкому приближению численности второй группы к приемлемому уровню $\bar{N}_2 = 20$. В то же время, игнорирование внешнего воздействия ($V_t = 0$) привело бы к повышению доли второй группы в общей численности до 60% и более.

Некоторое ускорение приближения к приемлемому уровню $\bar{N}_2 = 20$ может быть достигнуто за счет уменьшения коэффициентов ρ_v и ε в критерии (12). Однако такое ускорение обеспечивается за счет резких импульсных изменений управления V_i в начальный период.

Выводы. Проведенное исследование иллюстрирует общность в описании явлений в физико-химических и экономических системах.

В ряде случаев процессы конкуренции фирм, ориентированных на максимально возможный рост, и процессы производства и разрушения неорганических веществ описываются близкими по виду уравнениями.

Варианты модели кинетики ядерных реакторов могут использоваться при анализе и прогнозировании широкого круга социально-экономических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Murray J.D.* Mathematical Biology. An introduction. Springer, NY, 2004.
2. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
3. *Варшавский Л.Е.* Использование методов теории управления для формирования рыночных структур // Компьютерные исследования и моделирование, 2014, Т.6, №5. с. 839–859.
4. *Климов А.Н.* Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. *Jury E.I.* Theory and Applications of the Z-Transform Method. John Wiley, 1964.
6. The 4G Decade. Quantifying the Benefits. Recon Analytics – CTIA URL: <http://reconanalytics.com/2020/07/the-4g-decade-quantifying-the-benefits/>
7. LTE adoption rate as share of mobile connections in the United States from 2012 to 2025. URL: <https://www.statista.com/statistics/792417/lte-adoption-rate-in-the-us/>
8. U.S. Patent Statistics Chart. Calendar Years 1963 - 2020 URL: https://www.uspto.gov/web/offices/ac/ido/oeip/taf/us_stat.htm.
9. *Takeuchi Y., Karmeshu.* Dynamic Model of Three Competing Social Groups // International Journal of Systems Science, 1989, v. 20, No. 11. pp. 2125–2137.
10. *Garcia G., Bernussou J., Arzeiler D.* Robust Stabilization of Discrete-Time Linear Systems with Norm-Bounded Time-Varying Uncertainty // Systems & Control Letters, 1994, №5(22). pp. 327–339.
11. *Варшавский Л.Е.* Моделирование динамики экономических систем с неопределенными параметрами // Компьютерные исследования и моделирование, 2018, Т.10, №2. с. 261–276.

**ANALYSIS AND FORECASTING INDICATORS
OF NEW TECHNOLOGIES DIFFUSION
ON THE BASIS OF PHYSICO-CHEMICAL MODELS**

Varshavsky L.E.

The article shows the similarity of models of physical and chemical systems and models of competition of firms focused on the maximum possible growth. Examples of the use of a single-group model of nuclear reactor kinetics in the analysis and prediction of the relationship between adjacent areas of innovation, in the dissemination of new mobile wireless communication technologies, as well as in the study of social stability are considered.