

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ

*Кричевский И. Е., Левин М. И., Полтерович В. М.,
Щепина И. Н.*

(Москва)

Предлагается метод описания многокомпонентного замещения технологий и продуктов. Он основан на сопоставлении различных гипотез о структуре процесса и идентификации соответствующих систем дифференциальных уравнений. В качестве примера построена модель изменения структуры мирового производства волокон за последние 45 лет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс смены продуктов и технологий наряду с изменением структуры рабочей силы составляет основное содержание экономического развития. В последние 30 лет проводятся особенно интенсивные исследования этого процесса на различных примерах. Среди большого числа работ отметим статьи Ц. Грилихеса [1], И. Фишера и Р. Прая [2], монографию Э. Мэнсфилда [3], а также обзоры [4, 5]. Подавляющее большинство авторов так или иначе используют следующий подход к распространению новшеств, заимствованный из теории распространения эпидемий. Рассматриваются два крайних состояния экономической системы: «старое» (состояние 1) и «новое» (состояние 2); задача заключается в том, чтобы описать процесс перехода из одного в другое. Промежуточные состояния задаются долей f_2 применяемого новшества, например, нового продукта. Соответственно $f_1 = 1 - f_2$ — доля старого продукта. Наиболее известная модель фактически исходит из двух предположений: 1) скорость убывания доли мощностей, производящих старый продукт, пропорциональна превышению этой доли над некоторым стационарным уровнем; 2) скорость убывания доли мощностей, производящих старый продукт, пропорциональна доле мощностей, производящих новый продукт.

Первое предположение означает, что каждая единица отклонения «старой» мощности от стационарного уровня имеет равные шансы перейти за единицу времени на производство нового продукта. Второй постулат базируется на идее имитации: чем шире распространено новшество, тем легче его заимствуют новые фирмы и индивидуальные потребители.

Отметим, что изменение доли мощностей, производящих тот или иной продукт, может быть результатом двух качественно различных процессов (двух форм «замещения»): 1) вытеснения одним или несколькими продуктами какого-либо другого и 2) относительно быстрого роста производства данного продукта по сравнению с другими («псевдозамещение»).

Обозначим через f_1^* , f_2^* соответственно стационарные доли старого и нового продуктов в общем объеме производства рассматриваемой отрасли, $f_1^* + f_2^* = 1$. Тогда, как не трудно видеть, оба предположения приводят к уравнению

$$\frac{df_1}{dt} = -af_2(f_1 - f_1^*), \quad (1)$$

где a — коэффициент пропорциональности. В силу тождества $f_1 + f_2 = 1$ из (1) следует, что

$$\frac{df_2}{dt} = af_2(f_2^* - f_2). \quad (2)$$

Уравнение (2) — стандартная модель процесса замещения, используемая в многочисленных работах. Она применяется для ситуаций, когда новшество является производимым или потребляемым продуктом либо новой технологией производства прежнего продукта. При этом под f_1 , f_2 можно понимать либо долю мощностей, либо долю фирм, применяющих это новшество. Мощности измеряют в денежных или в тех или иных натуральных единицах. «Чистую» диффузию, т. е. распространение новшества, не имеющего заменителей, также рассматривают как частный случай замещения.

Уравнение (2) интегрируемо. Его решение, так называемая логистическая кривая, имеет S-образную форму и очень удобна для статистического оценивания. Часто оценивание ее параметров позволяет достичь хорошего согласия с наблюдениями.

Описанный подход неоднократно подвергался суровой критике. Отмечалось, что он не вскрывает существа процесса замещения, не способствует пониманию его причин. На наш взгляд, это верно лишь отчасти. Несмотря на бедность экономического содержания, модель (2) все же позволяет подтвердить или отвергнуть гипотезу о влиянии имитационного поведения на процессы замещения. Кроме того, тот факт, что в очень многих примерах логистическая кривая хорошо приближает статистические данные, создает определенную основу для более глубокой разработки проблемы.

Другой аргумент против увлечения этим подходом обычно состоит в том, что наряду с логистическим многие другие законы распределения могут быть с успехом использованы для аппроксимации тех же статистических данных [6]. Однако даже если это и так, простота и естественность посылок, лежащих в основе модели (2), делают ее привлекательным инструментом описания процессов замещения.

Более серьезные проблемы связаны со следующим обстоятельством: близкие потребности часто удовлетворяются в результате применения многих технологий или потребления многих продуктов. Соответствующие процессы замещения не имеют бинарного характера: одновременно могут внедряться несколько новшеств. Разные виды энергии и материалов, различные модели одежды, марки мыла или холодильников подчас взаимодействуют на рынке сложным образом, так что априорно не очевидно, за счет уменьшения каких компонент происходит рост других.

Первая известная нам попытка обобщить модель (2) на случай многокомпонентного замещения сделана в [7]. Автор предполагает, что скорость роста каждого продукта постоянна и не зависит от роста объемов других продуктов. Отсюда легко получается система уравнений, описывающих динамику системы в терминах относительных переменных

$$\frac{df_i}{dt} = f_i \sum_{j \neq i} a_{ij} f_j, \quad i = 1, \dots, r, \quad (3)$$

где $f_i = f_i(t)$ — доля компоненты i в момент t , а коэффициент a_{ij} равен разности скоростей роста продуктов i и j . В модели (3), таким образом, не учитывается собственно процесс замещения как вытеснение одного продукта другими: изменение пропорций f_i происходит лишь в результате различий в темпах роста продукта. Обобщения модели из [7] в [8, 9] обладают тем же недостатком. Модель, приведенная в [10], отражает эффект вытеснения лишь в потреблении продуктов; не предполагается, что оно оказывает обратное влияние на производство.

Другой подход, развитый в [11, 12], допускает, что все новшества линейно упорядочены по эффективности и переходы происходят последовательно; при этом наряду с имитацией учитывается и процесс созда-

ния новых технологий. Хотя модели из [11, 12] могут быть обобщены на случай произвольной структуры замещения, соответствующий анализ статистических данных требует весьма сложных расчетов.

В настоящей работе предлагается довольно универсальный и, в то же время, достаточно простой подход к моделированию процессов многокомпонентного замещения, позволяющий, в принципе, учесть как различие темпов роста производства продуктов, так и вытеснение одних продуктов другими. Основная модель представлена в разд. 2. В разд. 3 рассматривается техника ее идентификации с помощью ЭВМ. Разд. 4 посвящен описанию процесса замещения волокон четырех типов по данным их мирового производства за 45 лет. В заключительном разделе обсуждаются результаты машинных экспериментов, из которых следует, что предлагаемая модель позволяет не только выявить структуру многокомпонентного процесса, но и получить удовлетворительное описание его динамики.

2. МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ

Пусть в процессе замещения взаимодействуют r продуктов (или технологий). Обозначим через f_i долю мощностей рассматриваемой отрасли, производящей продукт i , $i=1, \dots, r$. Как обычно, мощности могут измеряться стоимостью используемых фондов или просто объемом выпуска соответствующего продукта (например, в стоимостном выражении).

В основу предлагаемого подхода положено представление, что часть мощностей, производящих продукт i , переключается на выпуск других продуктов. Как уже отмечалось, за этим представлением стоят три процесса: 1) подлинное переоборудование действующих производств; 2) преимущественное выбытие мощностей, производящих старые продукты; 3) преимущественный ввод мощностей, выпускающих новые продукты. Мы опираемся на две гипотезы, являющиеся прямым обобщением предположений 1 и 2 для бинарного замещения на случай многих компонент.

I. Скорость убывания доли мощностей типа i за счет их переориентации на производство продукта j пропорциональна превышению этой доли над стационарным уровнем.

II. Скорость убывания доли мощностей типа i за счет их переориентации на производство продукта j пропорциональна доле мощностей, производящих продукт j . Эти две гипотезы приводят к системе нелинейных дифференциальных уравнений

$$\frac{df_i}{dt} = f_i \sum_{j=1}^r \gamma_{ji} (f_j - f_j^*) - (f_i - f_i^*) \sum_{j=1}^r \gamma_{ij} f_j, \quad (4)$$

где $\gamma_{ij} \geq 0$, $\gamma_{ii} = 0$. Первый член содержит составляющие $\gamma_{ji} f_i (f_j - f_j^*)$, отражающие переориентацию мощностей типа j на производство продукта i . Второе слагаемое представляет собой модель обратного процесса. Следует иметь в виду, что начальное значение $f_i(0)$ может быть как больше, так и меньше f_i^* , так что знаки слагаемых априорно не определены.

Пусть $\sum_{i=1}^r f_i(0) = 1$, $\sum_{i=1}^r f_i^* = 1$, $f_i(0) \geq 0$, $f_i^* \geq 0$, $i=1, \dots, r$. Очевидно,

$\sum_{i=1}^r f_i(t) = 1$ при любом $t \geq 0$. Если $f_i = 0$, $f_j \geq 0$, $j \neq i$, то $df_i/dt \geq 0$. Используя этот факт, нетрудно показать, что при положительных начальных условиях $f_i(0) > 0$ для всех i , $f_i(t) > 0$ при всех t . Естественно считать $\gamma_{ij} \gamma_{ji} = 0$, т. е. лишь одно из чисел γ_{ij} , γ_{ji} может быть отлично от нуля. Рассмотрим ориентированный граф с матрицей $\tilde{\gamma}_{ij} = 1$ при $\gamma_{ij} > 0$. Этот граф определяет структуру процесса замещения, выявление которой является важной проблемой. Ясно, что при $r=2$ система (4) совпадает с (1), (2).

Система уравнений (4) является следствием довольно естественной модели роста

$$dM_i/dt = \rho_i M_i + f_i \sum_j \gamma_{ji} (M_j - f_j^* M) - (M_i - f_i^* M) \sum_j \gamma_{ij} f_j, \quad i=1, \dots, r, \quad (5)$$

где M_i — объем мощностей, производящих продукт i , а $M = \sum_{i=1}^r M_i$ — общий объем мощностей всей рассматриваемой производственной системы; можно также считать, что M_i — объем выпуска продукта i , а M — суммарный выпуск (в некоторых денежных единицах). Предполагается, что если общий выпуск M достаточно велик, то существует «рациональная» структура (в терминах долей) производства каждого продукта: $(f_1^*, \dots, f_r^*)$.

В основе модели (5) лежат следующие предпосылки.

Наращивание производственных мощностей (объемов) для каждого продукта i происходит за счет двух источников. Во-первых, это часть s_i прибыли $\lambda_i M_i$ от производства продукта i (она равна $\rho_i M_i$, $\rho_i = s_i \lambda_i$). Во-вторых, часть «сверхрациональной прибыли» $\lambda_j (M_j - f_j^* M)$ от других продуктов j , причем выделяемая часть пропорциональна доли продукта i в общем объеме; т. е. от мощности j к мощности i поступают отчисления в размере $f_i \theta_{ji} \lambda_j (M_j - f_j^* M)$ или $f_i \gamma_{ji} (M_j - f_j^* M)$.

Таким образом, мы предполагаем, что текущая прибыль делится на три потока: первый идет на расширение производства данного продукта, второй — поступает вне системы, третий идет на расширение мощностей других видов. При этом последний пропорционален превышению текущей мощности над «рациональной». Если это превышение отрицательно, то данный вид мощности, наоборот, получает дополнительную прибыль на свое развитие по тому же правилу.

Разделив обе части каждого из уравнений (5) на M , имеем

$$\frac{1}{M} \frac{dM_i}{dt} = \rho_i f_i + f_i \sum_j \gamma_{ji} (f_j - f_j^*) - (f_i - f_i^*) \sum_j \gamma_{ij} f_j, \quad i=1, \dots, r. \quad (6)$$

Из равенств (6) и тождеств

$$\begin{aligned} \frac{1}{M} \frac{dM_i}{dt} &\equiv \frac{df_i}{dt} + f_i \frac{1}{M} \frac{dM}{dt}, \quad i=1, \dots, r, \\ \sum_i \left(f_i \sum_j \gamma_{ji} (f_j - f_j^*) - (f_i - f_i^*) \sum_j \gamma_{ij} f_j \right) &\equiv 0 \end{aligned}$$

следует

$$\frac{df_i}{dt} = \left(\rho_i - \sum_j \rho_j f_j \right) f_i + f_i \sum_j \gamma_{ji} (f_j - f_j^*) - (f_i - f_i^*) \sum_j \gamma_{ij} f_j, \quad i=1, \dots, r. \quad (7)$$

Эта «обобщенная» модель многокомпонентного замещения (в терминах долей) учитывает как рациональную структуру производства, так и эффекты имитации при замещении и пропорционального роста. При $\gamma_{ij}=0$ для всех i, j система уравнений (7) совпадает с моделью из [7]. Вместе с тем, применение модели (7) для аппроксимации экспериментальных данных осложняется большим количеством параметров, подлежащих идентификации. Поэтому положим $\rho_i = \rho$ для всех i , что сразу же приводит к модели (4). Именно она используется в дальнейшем.

Задача аппроксимации статистических данных с помощью модели (4) состоит в отыскании подходящих коэффициентов γ_{ij} . Этих коэффициентов, вообще говоря, довольно много. Поэтому при расчетах целесообразно располагать правдоподобными гипотезами о структуре графа γ_{ij} . Именно так мы и действовали при апробации предлагаемого подхода на примере процесса замещения волокон. Прежде чем переходить к описанию статистических данных и частных результатов, остановимся на самой процедуре идентификации системы уравнений (4).

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Модель многокомпонентного замещения (4) представляет собой задачу Коши, т. е. систему из n обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, представимую в виде (4) при заданных начальных условиях

$$t = t_0, f_i(t_0) = f_i^0, i = 1, \dots, r. \quad (7)$$

Численное решение системы (4), (7) (нахождение интегральных кривых $f_i(t)$, $i=1, \dots, r$, проходящих через точки (t_0, f_i^0)), осуществляется методом Рунге — Кутты четвертого порядка при постоянном шаге. Это решение зависит от коэффициентов замещения γ_{ij} , стационарных уровней f_i^* и начальных условий f_i^0 , $i, j=1, \dots, r$.

Для аппроксимации «экспериментальных» данных эти параметры (для данного типа замещения) и подлежат определению. В настоящей работе считаются наиболее «подходящими» параметры, при которых решение системы (4) и (7) доставляет минимум традиционному функционалу — сумме квадратов отклонений эмпирических показателей от точек кривых — решений задачи Коши в соответствующие моменты времени, т. е.

$$S = \sum_{i=1}^r \sum_{j=t_0}^T (f_i(t_j) - y_i(t_j))^2 \rightarrow \min,$$

где $[t_0, T]$ — период исследования; $f_i(t_j)$ — доля мощностей, производящих продукт i в момент времени t_j при решении задачи Коши; $y_i(t_j)$ — эмпирическое значение доли мощностей, производящих продукт i в момент t_j . Величина функционала зависит от параметров системы, т. е. γ_{ij} , f_i^* , f_i^0 .

Минимизация функционала S производится методом Хука — Дживса прямого поиска минимума функции многих переменных [13], который является модификацией метода покоординатного спуска.

Программа, реализующая описанный подход, позволяет исследовать различные механизмы многокомпонентного замещения, причем число типов замещения и количество продуктов ограничены только возможностями ЭВМ и наличием статистической информации.

Программа написана на языке BASIC-2 и реализована на мини-ЭВМ WANG 2200 MVP.

4. ПРОЦЕССЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО СЫРЬЯ В МИРОВОЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Модель (4) может быть использована для исследования процессов замещения как продуктов, так и технологий в различных отраслях народного хозяйства. Типичным примером многокомпонентного замещения является процесс развития и производства волокнистого сырья в мировой текстильной промышленности.

Известно, что наиболее массовым видом текстильного сырья 200 лет назад повсеместно был лен, из которого изготавливалась не только одежда, но и почти все виды текстильных изделий. Затем началось постепенное вытеснение его сырьем из овечьей шерсти, которое заняло доминирующее положение в мире, хотя лен все еще оставался массовым волокном. Господство шерсти было сравнительно недолгим. К началу XX в. главенствующее положение в текстильном производстве занял хлопок, далеко оттеснив не только лен, но и шерсть.

Для всех этих волокон характерен рост абсолютного объема производства, однако масштабы и темпы его различны: наибольшими характеризовался хлопок, наименьшими — лен. Шерсть занимала промежуточное положение и использовалась только для бытовых нужд, хлопок — преимущественно для бытовых, а лен — как для бытовых, так и для технических.

Кроме этих многотоннажных волокон развивалось производство так называемых грубых волокон (джут, пенька, кенаф), применяемых для технических целей.

К концу XIX в. два вида натурального волокна (хлопок — 3,2 млн. т, шерсть — 0,7 млн. т) определяли мировой текстильный баланс как по физическому объему, так и в стоимостном выражении.

В начале XX в. началось производство принципиально нового вида волокон — искусственных, достигшее ко времени второй мировой войны существенных масштабов, дойдя до уровня выпуска шерсти (подготовка к войне в значительной мере стимулировала их производство). Оно продолжало расширяться до 60-х годов, после чего наступила стабилизация.

Данный класс волокон выступал и выступает, в первую очередь, как заменитель хлопка для бытовых и технических изделий.

В послевоенный период разработано новое волокно — синтетическое, объем выпуска которого уже к концу 60-х годов превзошел не только шерсть, но и искусственные волокна, достигнув к настоящему времени уровня производства хлопка. В экономически развитых странах синтетические волокна в текстильном балансе доминируют (в США — 70%, в Западной Европе — 50—60%). Они вытесняют хлопок, шерсть, искусственные волокна во всех сферах их потребления, особенно в технике. В 70-е годы началось быстрое развитие нового, особого класса синтетических волокон — полиолефиновых (в основном полипропиленовых, получаемых разрезанием и скручиванием пленки). Они главным образом вытесняют грубые волокна из ряда областей техники и быта.

Для описываемого процесса замещения характерным является то, что каждое новое массовое волокно достигает существенной доли в общем объеме производства примерно вдвое быстрее, чем предыдущее. В первую очередь это объясняется следующим: каждое «новое» волокно имеет такое сочетание физико-механических и потребительских свойств и удельных затрат ресурсов, которое позволяет заметно снизить затраты на конечный результат. Общий рост производства текстильного сырья вызван двумя факторами: увеличением численности населения и повышением его благосостояния (уровня экономического развития страны).

Для изучения процесса развития и прогнозирования производства основных типов волокон представляется важным найти механизмы замещения, согласующиеся с фактическими данными структуры мирового производства. Это помогло бы более глубокому пониманию происходящих процессов и дало возможность прогнозировать соотношения важнейших видов волокон.

Методом экономико-статистического анализа ретроспективных динамических рядов численности населения, уровня экономического развития производства и потребления основных текстильных волокон (натуральных, искусственных, синтетических) за 1951—1975 гг. определялись коэффициенты замещения этих групп [14]. Как показал анализ, на уровень потребления натуральных волокон оказывает влияние потребление химических (искусственные плюс синтетические), на уровень искусственных — потребление синтетических.

В настоящей работе для анализа закономерностей многокомпонентного замещения были использованы данные о динамике мирового производства четырех групп волокон: натуральных, искусственных, синтетических и полиолефиновых с 1920 по 1985 г. [15].

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЛОКОН

Разработка моделей для исследования многокомпонентного замещения на примере основных текстильных волокон проводилась в два этапа. На первом изучалось трехкомпонентное замещение (натуральные, искусственные и синтетические волокна вместе с полиолефиновыми). На втором — четырехкомпонентное (полиолефиновые волокна рассматривались уже как самостоятельный тип). Для построения моделей взяты данные за 1956—1985 гг., так как в течение этого периода известны объемы

Результаты расчетов по модели (4) на примере мирового производства волокон

№ п.п.	Тип механизма замещения	Число варьируемых параметров	Период исследования, количество лет	Сумма квадратов отклонений S	№ п.п.	Тип механизма замещения	Число варьируемых параметров	Период исследования, количество лет	Сумма квадратов отклонений S
1	I	6	29	0,0432	7	VI	6	29	0,0246
2	II	6	29	0,1295	8	VI	9	45	0,3825
3	III	6	29	0,0215	9	VII	6	29	0,0236
4	IV	7	29	0,0226	10	VII	6	45	0,0648
5	IV	7	45	0,0399	11	VIII	7	29	0,0246
6	V	6	29	0,0320	12	VIII	7	45	0,0720

производства волокон за каждый год. Однако в ряде экспериментов учитывалась информация еще за два года — 1940 и 1950 — и анализировалась динамика процесса с 1940 по 1985 г.

Модели различались типом механизма замещения, т. е. тем, какие из коэффициентов γ_{ij} априорно предполагаются равными нулю. В большинстве экспериментов начальные данные f_i^0 варьировались вблизи фактических значений. Рассматриваемые типы механизмов замещения и результаты расчетов по соответствующим модификациям модели (4) приведены в табл. 1 и на рис. 1. Опишем кратко схему проведенного нами исследования процессов замещения.

Первым исследовался механизм последовательного замещения: натуральные волокна замещаются искусственными, а они в свою очередь синтетическими (табл. 1, № 1). Построенная согласно этой модели кривая f_2 , соответствующая производству искусственных волокон, плохо аппроксимирует истинную кривую на участке 1956—1974 гг. (рис. 2).

Другая гипотеза состояла в том, что синтетические волокна вытесняют и натуральные, и искусственные. Расчеты по этому типу механизма замещения (табл. 1, № 3) позволили резко улучшить качество аппроксимации (минимальная сумма квадратов отклонений для механизма I — 0,0432, а для механизма III — 0,0215). Кроме того, кривые достаточно хорошо соответствуют и качественному характеру статистической информации (рис. 3). Однако непосредственный анализ пополненных статистических данных (с 1940 по 1985 г.) показывает, что механизм этого типа не может учесть реально происходившего замещения волокон вида 1 волокнами вида 2 за 1940—1956 гг. Для учета такого эффекта введен механизм замещения типа IV (табл. 1, № 4 и 5), результаты моделирования по которому за 1956—1985 гг. (№ 4) близки по значению функционала S к результатам исследования схемы III. Но в отличие от механизма III новая структура замещения позволила удовлетворительно описать процесс развития и производства волокон и за 1940—1985 гг. (табл. 1, № 5; рис. 4). Для дополнительной проверки адекватности модели был опробован заведомо неверный процесс замещения II (табл. 1, № 2); результаты расчетов подтвердили его неадекватность — величина S возрастает по сравнению с моделью № 3 в 6 раз. Переходя к четырехкомпонентному замещению, отметим, что четвертый тип волокон (полиолефиновые) фактически начал развиваться примерно с 1964 г., а в настоящее время доля этих волокон в общей структуре мирового производства еще очень мала. Исследование механизма типа V показывает, что наименьшая сумма квадратов отклонений получается в случае, когда коэффициент γ_{ij} , характеризующий связь между синтетическими и полиолефиновыми волокнами, близок к нулю (табл. 1, № 6). Однако, очевидно, что механизму типа V присущи недостатки структурной схемы III и потому он не может объяснить процесс замещения на участке 1940—1956 гг. В связи с этим изучались три другие модели механизмов замещения (VI, VII, VIII), обеспечившие примерно одинаковое качество аппроксимации (табл. 1, № 7, 9, 11). Но расширение периода с 1940 г.

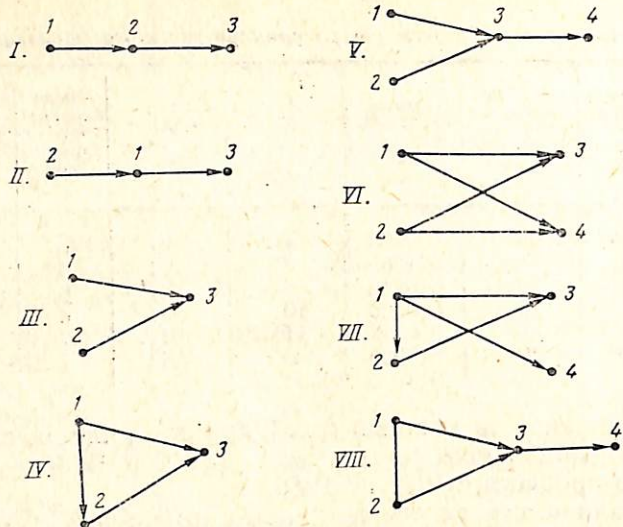


Рис. 1. Типы механизмов замещения

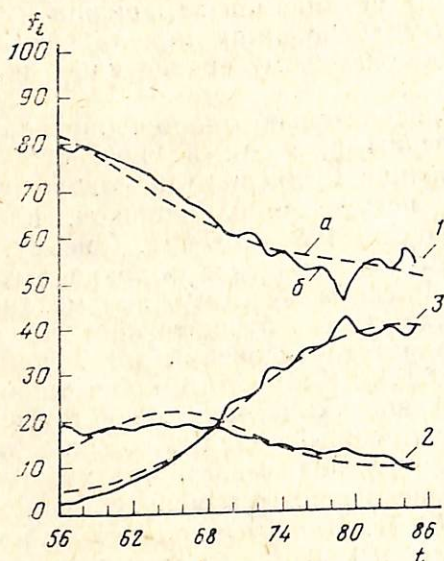


Рис. 2

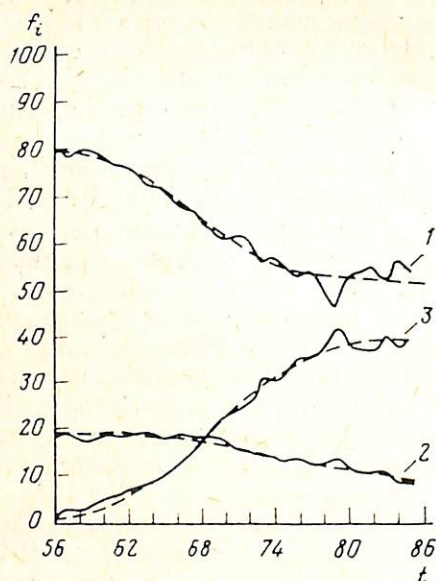


Рис. 3

Рис. 2. Тип механизма замещения I. Период исследования — 1956—1985 гг. 1 — натуральные волокна; 2 — искусственные; 3 — синтетические. f_i — доля производства, %; t — время, год; а — эмпирические данные; б — данные, полученные при расчетах по модели (4)

Рис. 3. Тип механизма замещения III. Период исследования — 1956—1985 гг.

(табл. 1, № 8, 10, 12) позволяет выбрать лучший из них — тип VII, который, по-видимому, и отражает истинный процесс замещения (см. также рис. 5). Тип VII является развитием типа IV: рост доли производства полиолефиновых волокон происходит за счет уменьшения в общей структуре мирового производства доли натуральных волокон.

В настоящей работе модель вида (4) кроме выяснения типа механизма замещения использовалась и для прогноза. Для этого весь период времени разбивался на два промежутка: по первому проводилась идентификация модели (ее «настройка»), на втором осуществлялся прогноз. Мы рассмотрели период с 1956 по 1985 г. и схему замещения III. Коэффициенты замещения, значения стационарных уровней и начальные данные рассчитывались по промежуткам 1956—1972, 1956—1976, 1956—1980 и 1956—1982 гг. Для каждого из этих четырех случаев идентифицирова-

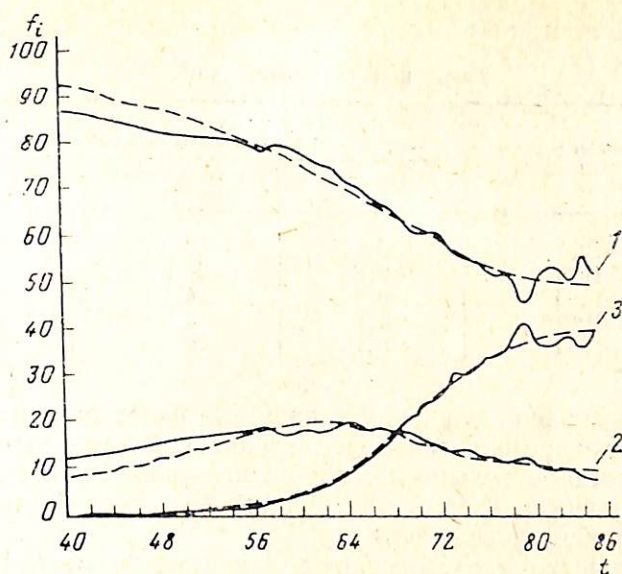


Рис. 4. Тип механизма замещения IV. Период исследования — 1940—1985 гг.

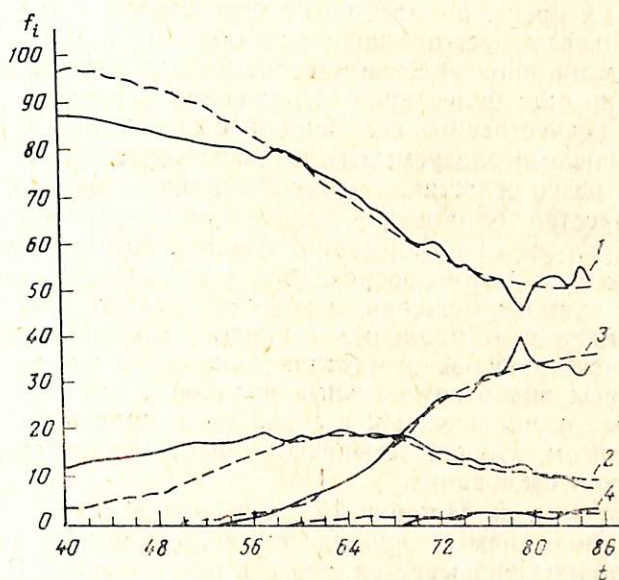


Рис. 5. Тип механизма замещения VII. Период исследования — 1940—1985 гг. 4 — полиолефиновые волокна

лась модель типа III и проводился прогноз на интервал времени, оставшийся до 1985 г. Отклонения величин, полученных при прогнозе, от реальных данных за 1985 г. приведены в табл. 2 и, по нашему мнению, являются достаточно удовлетворительными.

Подведем некоторые итоги. Сравнивая результаты модельного исследования с действительным процессом развития и производства волокон, отметим следующее. Для трех видов волокон наилучшими можно признать типы механизмов III и IV, в которых происходит замещение натуральных и искусственных волокон синтетическими. Эти механизмы лучше всего описывают поведение искусственных волокон, хотя и несколько завышают их долю в начальный и конечный периоды. Модельная динамика выпуска натуральных и синтетических волокон достаточно хорошо аппроксимирует фактическую в промежутке с 1956 по 1978 г. и значительно хуже в 1978—1985 гг. Сильные колебания в реальных процессах в последний период связаны прежде всего с нестабильностью цен на нефть.

Результаты прогнозирования

Период настройки параметров, годы	Отклонение данных, полученных при прогнозе, от эмпирических за 1985 г., %		
	натуральные волокна	искусственные волокна	синтетические волокна
1956—1972	6,1	40	5,1
1956—1976	7,8	28,5	4,1
1956—1980	6,8	14,2	6,3
1956—1982	4,7	13,5	3,5
1956—1985	3,1	10	2,1

Несмотря на близкие значения показателя качества S для схем III и IV, последняя представляется более адекватной реальным процессам, так как учитывает не только замещение натуральных и искусственных волокон синтетическими, но и натуральных — искусственными, как это и происходило в действительности.

Для натуральных и синтетических волокон имеют место обе упомянутые ранее, формы замещения. После появления синтетических волокон, они сначала частично вытеснили натуральные в области техники, причем эта сфера их преимущественного применения интенсивно расширялась. Аналогичный процесс наблюдался в области предметов домашнего обихода, а затем и в производстве материалов для изготовления одежды. Подобная же, но еще более ярко выраженная тенденция имела место при замещении искусственных волокон синтетическими.

Введение в число исследуемых волокон четвертого вида (полиолефиновое волокно) резко осложнило идентификацию модели. В связи с увеличением количества параметров, подлежащих определению, модель требует большего объема информации, чем тот, которым мы располагаем. По этой причине не рассмотрена более сложная и, видимо, более реалистическая схема замещения, в которой полиолефиновые волокна частично вытесняют и натуральные, и синтетические. Следует отметить, что в наших расчетах из-за отсутствия данных не учитывалось производство некоторых видов натуральных волокон (джут, кенаф, сизаль, пенька), которые в значительной степени вытеснялись полиолефиновыми. Таким образом, случай четырехкомпонентного замещения требует дополнительного исследования.

Отметим, что модель Петерки [7] дает значительно меньшую точность аппроксимации, нежели предлагаемая здесь модель (4) (величина S по нашей методике оказывается в шесть раз меньше). Расчеты показывают и качественное отличие замещения искусственных волокон от реального процесса: к концу исследуемого периода их доля близка к нулю, тогда как в действительности она составляет около 9%.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный способ моделирования процессов многокомпонентного замещения является универсальным и в то же время достаточно простым. Несложна и идентификация предлагаемой модели с помощью ЭВМ. Проведенные эксперименты на примере структуры мирового производства волокон показали, что эта модель хорошо выявляет типы механизмов замещения, адекватные как логике процессов замещения, так и эмпирическим данным. Вполне удовлетворительные результаты получены и при прогнозировании.

Разумеется, качество долгосрочного прогноза по предлагаемой модели существенно зависит от выбора стационарных уровней f_i^* . Ясно, что для технологий, находящихся в начальной стадии развития, точность определения f_i^* из метода наименьших квадратов может оказаться низкой.

Отметим, что если из вершины i в структурной схеме замещения не выходит ни одного (направленного) ребра, т. е. если технология i является «наиболее передовой», то правая часть системы (4) не зависит от f_i^* . При наличии нескольких «наиболее передовых» технологий (см., например, схемы VI, VII), как правило, существует бесконечно много возможных стационарных состояний, и асимптотическое поведение системы, видимо, зависит от начальных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Griliches Z.* Hybrid Corn: an Exploration in the Economics of Technological Change// *Econometrica*. 1957. V. 25. № 3.
2. *Fisher J. C., Pry R. H.* A Simple Substitution Model of Technological Change// *Technological Forecasting and Social Change*. 1971. V. 3.
3. *Mansfield E.* Industrial Research and Technological Innovation. N. Y., 1968.
4. *Сахал Д.* Технический прогресс: концепции, модели, оценки. М.: Финансы и статистика, 1985.
5. *Гельман Л. М., Левин М. И.* Модели инновационных процессов (обзор зарубежной литературы)// *Экономика и мат. методы*. 1989. Т. XXV. Вып. 6.
6. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1964.
7. *Peterka V.* Macrodynamics of Technological Change: Market Penetration by New Technologies. IIASA. Paper RR—77—82. Laxenburg, 1977.
8. *Spinrad B. I.* Effect of Accounting Rules on Utility Choices of Energy Technologies in the United States. IIASA Paper RR—80—27. Laxenburg, 1980.
9. *Spinrad B. I.* Market Substitution Model and Economic Parameters. IIASA Paper RR—80—28. Laxenburg, 1980.
10. *Norton J. A., Bass F. M.* A Diffusion Theory Model of Adoption and Substitution for Successive Generations of High-Technology Products// *Management Science*, 1987. V. 33. № 9.
11. *Полтерович В. М., Хенкин Г. М.* Диффузия технологий и экономический рост. М.: ЦЭМИ АН СССР, 1988.
12. *Полтерович В. М., Хенкин Г. М.* Эволюционная модель экономического роста// *Экономика и мат. методы*. 1989. Т. XXV. Вып. 3.
13. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.
14. *Кричевский И. Е.* Перспективы развития промышленности химических волокон. М.: Химия, 1982.
15. *Information on Man-Made Fibries.* International Rayon and Synthetic Commetee. P., 1982.

Поступила в редакцию
13 VII 1989