

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Эконофизическая модель распространения инноваций

© 2024 г. О.В. Жданеев, И.Р. Овсянников

О.В. Жданеев,

РАНХиГС при Президенте Российской Федерации, Москва; e-mail: Zhdaneev@rosenergo.gov.ru

И.Р. Овсянников,

АО «Центр эксплуатационных услуг», ФГАОУ ВО МФТИ, Москва; e-mail: ovsyannikov.ir@phystech.edu

Поступила в редакцию 27.02.2024

Аннотация. Анализ и оценка эффективности инноваций требует развития инструментов моделирования процесса их распространения в отрасли. В данной работе представлена модель распространения инноваций, основанная на физических подходах и описывающая стадии ускоряющегося и замедляющегося роста. Для описания экспоненциального роста используется диффузионная модель, а для логарифмического — электротехническая модель. В работе представлено соответствие физических параметров их экономическим аналогам: размер компании, характеристика скорости обмена информацией между фирмами, готовность компании к внедрению инновации, межфирменное влияние и прорывной уровень инновации. Полученная теоретическая модель протестирована на исторических данных внедрения инноваций в топливно-энергетическом комплексе с последующей корректировкой коэффициентов, зависящих от региона внедрения инновации. Разработанная модель применима для описания процесса распространения инноваций в любой отрасли страны, а также при инвестиционном и бизнес-планировании в компаниях и принятии решений об инвестировании в инновационные проекты. При применении данного инструмента в отраслях с низким уровнем инновационной активности прогнозируется повышение уровня высокотехнологического производства и доли организаций, осуществляющих технологичные инновации. На примере топливно-энергетической отрасли России прогнозируется повышение технологичности предприятий и снижение уровня импортозависимости.

Ключевые слова: технологическое развитие; инновации; управление инновациями.

Классификация JEL: O33.

УДК: 51-77.

Для цитирования: Жданеев О.В., Овсянников И.Р. (2024). Эконофизическая модель распространения инноваций // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 4. С. 102–112. DOI: 10.31857/S0424738824040092

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос инновационного развития является объектом внимания как отдельных фирм, так и государств. Главной задачей внедрения инновации является анализ и оценка эффективности ее реализации, а также технико-экономическое обоснование для принятия решения об инвестировании.

Именно технико-экономическое обоснование (ТЭО) является основной точкой принятия решения об инвестировании в инновационные проекты. Так как инновационная деятельность является созданием новых или модификацией имеющихся товаров/услуг, главной проблемой планирования является качество и объем информации о предполагаемых изменениях, этапах и реализации инновационного проекта. Потому актуальна задача повышения качества анализа и планирования жизненного пути инновации.

В международной практике известны различные методы оценки технологий, различающиеся основной целью. Так, например, государственные регуляторы осуществляют анализ инноваций с целью выявления трендов и обеспечения эффективного развития страны, крупные фирмы же определяют наиболее перспективные проекты для инвестирования. Существующие методы не масштабируются по числу параметров, а также не учитывают ряд ключевых влияющих факторов, в том числе: межфирменного влияния, скорости обмена информацией в отрасли и т.д.

Потому задача разработки инструмента анализа жизненного пути инновации является актуальной как для отдельных компаний, так и для государственных регуляторов. Целью работы является создание теоретической методологии анализа скорости распространения инноваций между фирмами с корректировкой на исторических данных.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Процесс передачи новаторских идей, предметов и технологий в социальных науках, известный как *диффузия инноваций*, осуществляется через коммуникационные каналы внутри социальной системы. Существует несколько методов описания и анализа инноваций и технологий (Rogers, 2009, p. 4554).

Один из этих методов — комбинированный подход, включающий институциональный анализ, элементы Форсайт и технологический анализ (Future-Oriented Technology Analysis, FTA). Его цель состоит в определении возможных направлений развития отрасли с учетом глобальных тенденций для определения условий реализации проекта. Однако этот подход ограничивает внимание только на революционных технологиях, игнорируя другие виды инноваций (Fuenfschilling, Truffer, 2014, p. 772).

Использование метода развертывания функций качества (quality function deployment, QFD) для принятия решений выявляет возможные варианты развития технологического продукта с учетом общения с клиентами (Adiano, Roth, 1994, p. 25). Главным недостатком этого метода является его зависимость от экспертных оценок, что может привести к несостоятельным данным. Аналогичные недостатки характерны и для метода многокритериальной оценки (Multi Criteria Decision Aid) и метода TOPSIS (Mardani et al., 2015, p. 13947).

Существует множество исследований, посвященных изучению процесса диффузии инноваций и анализу моделей логистических кривых (Pelegrin, Fernandez, Perez, 2014, p. 1; Tsvetkova, Tукkel, Ablyazov, 2017; Цветкова, Туккель 2017; Цветкова, 2018; Benhabib, Perla, Tonetti, 2016, p. 1057; Moskalev, Tsygankov, 2021; Abrahamson, Rosenkopf, 1997, p. 289; Young, 2009, p. 1899; Lypez-Pintado, 2008, p. 73; Delre, Jager, Janssen, 2007, p. 185; Meade, Islam, 2006, p. 514; Mahajan, Peterson, 1985).

Басс в своей работе рассматривает плотности вероятности появления нового потребителя во времени (Bass, 1969, p. 215): $f(t) = dF(t) / dt = [p + Fq \times F(t)][F - F(t)]$.

Коэффициенты p и q в действительности отражают пропорции между инноваторами и имитаторами в обществе. Коэффициент p указывает на начальную долю инноваторов, которая постепенно снижается, в то время как доля имитаторов (число которых зависит от числа потенциальных потребителей) увеличивается. Если $p > 0$ и $q = 0$, график представляет собой экспоненциальную функцию; при $p = 0$ и $q > 0$ он соответствует классической логистической кривой, имеющей форму буквы «S» и характеризующейся точкой перегиба, отображающей переход от ускоренного роста к равномерному (рис. 1). Данная особенность позволяет определить различные критические и оптимальные точки статистическими методами. Таким образом, исследование процесса распространения инноваций включает описание трех ключевых стадий: экспоненциальный рост, точку насыщения и логарифмический рост. Каждая стадия описывается с использованием аналогий с физическими законами.

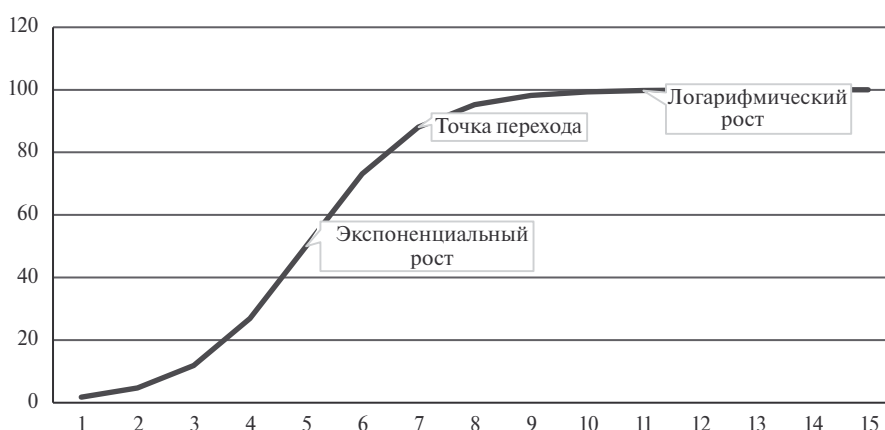


Рис. 1. Графики логистических функций. S-образная кривая

3. ДИФфуЗИОННАЯ МОДЕЛЬ — ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ РОСТ

3.1. Описание модели

Модель распространения инноваций описывается как процесс обмена информацией между фирмами. Эффектами, которые влияют на скорость и качество распространения информации, являются размер (масштаб) влияния, оказываемого фирмами друг на друга, и характеристика скорости обмена информацией. Так, например, при высокой скорости обмена информацией между фирмами и высокой степени влияния фирм друг на друга скорость распространения инноваций (как информации) между ними выше, чем в противном случае. Скорость распространения инновации в самой компании пропорциональна ее размеру — чем больше сотрудников в компании, тем дольше внедряются новые разработки. Кроме того, каждая фирма, взаимодействуя с новым продуктом, может самостоятельно вносить в него инновации, улучшая исходную, и тогда скорость распространения инновации повышается. Характеристиками инновации выступают ее прорывные показатели, а также уровень готовности фирмы ее внедрять.

3.2. Проведение аналогии с физикой

Физическим аналогом, описывающим данную экономическую модель, является *процесс диффузии* (рис. 2). В рамках предложенной модели фирмами выступают шары разных объемов. Размер шара характеризует размер фирмы и, соответственно, скорость распространения диффузанта (инновации) внутри шара (фирмы). В шар поступает какое-то количество исходного импульса диффузанта с некоторым коэффициентом диффузии. Аналогом этих параметров являются характеристики инновации из экономической модели, здесь количество вещества есть исходный прорывной уровень технологии, коэффициент диффузии — готовность фирмы внедрять инновацию. Чем выше исходный уровень диффузанта, тем выше скорость распространения диффузанта внутри шара.

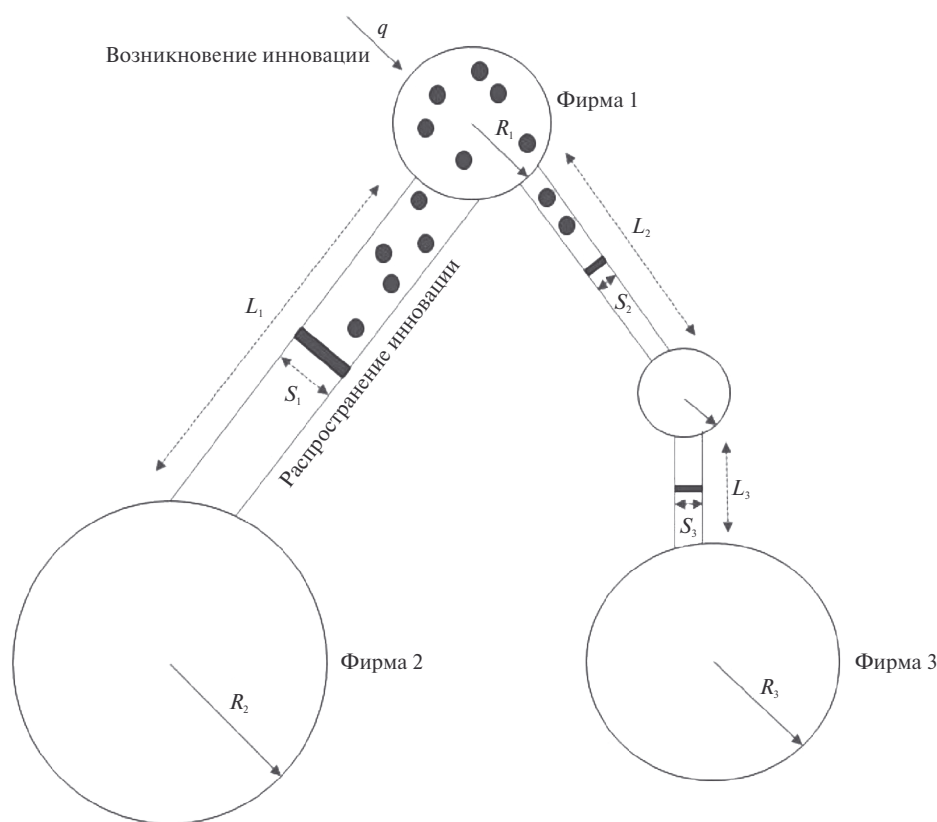


Рис. 2. Модель диффузии. Экспоненциальный рост

Средством, описывающим эффекты, влияющие на процесс обмена между фирмами, служат трубки с мембранами разной длины и разных радиусов. Длина трубки характеризует скорость обмена информацией между фирмами, а радиус — обратную величину межфирменного взаимодействия. Так, например, при сильном влиянии фирм друг на друга радиус трубки будет намного меньше, а значит, и давление, оказываемое на мембрану, — выше. Мембрана характеризует момент начала внедрения инновации со стороны фирмы. Как только мембрана в трубке испытывает критическое давление, она открывается и начинается процесс диффузии между двумя шарами, соединенными этой трубкой.

В соответствии с экономической моделью фирма, внедрившая инновацию, постоянно влияет на соседей, несмотря на то что сама еще не внедрила инновацию полностью, что в физической модели характеризуется диффузией между исходным шаром и трубкой, соединяющей соседей. Критическое значение давления на мембране, расположенной в трубке, свидетельствует о том, что фирма-последователь приняла достаточное количество информации от фирмы-оригинала. Мембрана или пропускает весь диффузат, или не пропускает его совсем. Для каждого шара существует свой множитель диффузии, который характеризует факт улучшения инновации новой фирмой. Так, например, если фирма внедрила технологию (концентрация достигла критического значения), то концентрация в этой фирме растет в δ_i раз, а следовательно, растет и скорость распространения диффузанта (инновации) между шарами (фирмами).

В рамках данной модели удобно исследовать скорость распространения инноваций как в масштабе одной фирмы, так и в масштабе многих фирм. Для этого необходимо продифференцировать концентрацию и получить скорость распространения диффузанта в модели.

Радиус шара (R) — размер компании. Отражает размер компании, которая разрабатывает и внедряет инновацию. Размер компании определяется численностью сотрудников. Финансовые или производственные показатели, характеризующие компанию, могут сильно отличаться в зависимости от отрасли и сферы деятельности компании. Данный показатель рассчитывается как численность сотрудников в компании, деленная на 10^7 ; таким образом, $R \in [0; 1]$.

Радиус трубки (S) — величина межфирменного влияния. Радиус трубки отражает размер межфирменного влияния. Величина межфирменного влияния характеризует то, как компании влияют друг на друга. В рамках данной модели этот параметр можно разделить на две составляющие:

1) сведения о совете директоров. Часто встречающаяся практика, что генеральный директор одной компании может быть членом совета директоров другой компании, следовательно, межфирменное влияние, оказываемое этими двумя фирмами друг на друга, велико, поскольку лицо, принимающее решение, участвует в обеих структурах;

2) статус компании. Частные и государственные компании по-разному взаимодействуют друг с другом и по-разному выстраивают рабочие процессы. Таким образом, сила межфирменного влияния (S) на шаге i определяется как сумма соответствующих значений из двух множеств и лежит в диапазоне $[0,1; 0,4]$.

$$\text{Пересечение в совете директоров} = \begin{cases} 0,1, & \text{если пересечение есть;} \\ 0, & \text{если пересечения нет;} \end{cases}$$

$$\text{Тип компании} = \begin{cases} 0,3, & \text{если компании одного типа, государственные;} \\ 0,2, & \text{если компании одного типа, частные;} \\ 0,1, & \text{если компании разных типов.} \end{cases}$$

Длина трубки (L) — характеристика скорости обмена информацией между фирмами. Длина трубки отражает скорость обмена информацией между фирмами. Чем короче трубка, тем быстрее информация о новой инновации может распространиться между компаниями — по аналогии со скоростью течения диффузанта в трубке. Этот параметр вычисляется как обратная величина суммы цитирований научных публикаций и патентов компании, процитированных в патентах другой компании за исследуемый промежуток времени, со знаком «минус», чтобы обеспечить положительный рост функции с увеличением числа цитирований.

Коэффициент диффузии (D) — готовность к внедрению. Коэффициент диффузии отражает готовность компаний внедрять инновации. Он определяется на основе международного стандарта ISO 30401. Данный параметр вычисляется как сумма соответствующих значений и находится в диапазоне $[1; 11]$, если в компании:

- реализована передача и преобразование знаний, то +1;
- реализованы механизмы управления знаниями, то +1;
- существует культура управления знаниями, то +1;
- организованы действия, связанные с обработкой рисков и выявлением возможностей, то +1;
- осуществляется постановка целей в области управления знаниями и планирование их достижения, то +1;
- обеспечены необходимые ресурсы, то +1;
- обеспечена необходимая компетентность кадров, то +1;
- обеспечена необходимая осведомленность кадров и их коммуникация, то +2;
- осуществляется управление документированной информацией, то +1;
- осуществляется оценка результатов деятельности управления знаниями (мониторинг, измерение, анализ, оценка, аудит), то +1;

Количество диффузанта в шаре i , q — прорывной уровень инновации. Определяется как суммарный NPV от внедрения инновации в компании на 10 лет, деленный на 10^{10} . Таким образом, $q \in [0, 1]$. Ставка дисконтирования определяется как сумма базовой ставки по эмитенту, премии за страновой риск, премии за отраслевой риск, премии риска нелеквидности акций эмитента (если применимо).

Множитель концентрации (δ_i) — коэффициент улучшения инновации фирмой.

3.3. Математическое описание процесса

Диффузия в системе, состоящей из двух компонентов, a и b , описывается законом Фика: плотности потока компонентов $j_{a,b}$ пропорциональны градиентам их концентраций

$$\nabla n_{a,b} : j_a = -D \frac{\partial n_a}{\partial x}, \quad j_b = -D \frac{\partial n_b}{\partial x}.$$

Рассмотрим случай без мембраны для двух шаров разных объемов (фирм с разными уровнями готовности внедрить инновации):

$$d(\Delta n) = -D \Delta n (S / V_0 L) dt, \quad \frac{d(\Delta n)}{\Delta n} = -D [S / V_0 L] dt,$$

где $V_0 = V_1 V_2 / (V_1 + V_2)$. Тогда после интегрирования имеем $\ln \Delta n = -D (S / V_0 L) t + \ln A$. Откуда $\Delta n = \Delta n_0 \exp \{-D S t / V_0 L\}$.

Введем в рассмотрение мембрану. Тогда сила давления, оказываемого на мембрану, будет пропорциональна концентрации:

$$n'_1 = n_1 \left(1 + \exp \left\{ t \left[-\frac{4\pi R_1^2 L S}{D(16\pi R_1^2 + 3LS)} \right]^{-1} \right\} \right).$$

Как только эта концентрация достигнет критического уровня, мембрана начнет пропускать диффузанта, и концентрация во втором шаре станет равна:

$$n_2 = \delta_2 (n_{2const} - n_1) \left(1 + \exp \left(t_1 \left[\frac{-V_o L S}{D(V_o + L S)} \right]^{-1} \right) \right) \left(1 + \exp \left(t \left[\frac{-L}{2D} \times \frac{V_o L S}{(V_o + L S)} \right]^{-1} \right) \right);$$

$$\delta_2 (n_2, n_{2кр}) = \begin{cases} 1, n_2 < n_{2кр}; \\ \delta_2, n_2 \geq n_{2кр}, \end{cases}$$

где t_1 — время, за которое достигается величина критического давления на мембрану; $\delta_i (n_i, n_{икр})$ — поточно заданная функция усиления концентрации (инновации) фирмой i . При достижении критического значения концентрации в шаре i она увеличивается в δ_i раз.

3.4. Анализ

Данная модель позволяет в явном виде получить формулу скорости распространения инновации (диффузанта) в системе. Для этого необходимо продифференцировать формулу концентрации. Модель хорошо учитывает межфирменное влияние благодаря параметрам скорости распространения информации между фирмами и степени их влияния друг на друга. Отличительная особенность модели — характеристика самой инновации: прорывной уровень инновации и компетенции людей в рамках этой инновации. Также важная особенность — моделирование процесса улучшения инновации каждой фирмой. Кроме того, модель описывает процесс передачи информации через критическое значение давления на мембране. Это описание хорошо соотносится с реальной жизнью — фирмы всегда получают информацию от конкурентов, но не всегда сразу набирается ее необходимое количество для реализации своих разработок.

3.5. Ограничения

В модели присутствует предположение о постоянстве коэффициента диффузии D в течение всего процесса диффузии, что ограничивает применение модели в условиях меняющейся готовности компаний ее внедрять.

В соответствии с законом Эйнштейна—Смолуховского применение в данной модели квазистационарного приближения требует, чтобы время процесса диффузии было много больше характерного времени диффузии отдельной частицы вдоль трубки, т.е. объем трубки должен быть много меньше объема двух шаров, которых она соединяет.

4. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ — ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ РОСТ

4.1. Описание модели

Предпосылки этой модели совпадают с диффузионной. Исследуется процесс распространения инновации между фирмами. Существуют ограничения в виде характеристик и параметров каждой отдельной фирмы и ограничения в передаче информации.

4.2. Проведение аналогии с физикой

В рамках данной модели рассматривается цепь, состоящая из конденсаторов и резисторов, называемая RC-контуром. Принципиальная отличительная особенность данной модели — появление дополнительной энергии в системе, что соответствует увеличению заряда и улучшению инновации.

Схема представляет собой биномиальное дерево, в нулевой вершине которого находится фирма, в которой впервые появилась инновация (источник электродвижущей силы, ЭДС). Внедрение инновации можно сравнить с зарядкой конденсатора. Для поддержания напряжения, равного начальному, подключены компараторы, сравнивающие напряжения на инвертируемом и на неинвертируемом входах. Скоростью распространения инновации является скорость заряда соответствующего конденсатора. Момент включения компаратора соответствует зарядке конденсатора до $0,8U_{\text{ВОЗМ}}$. Таким образом, в предшествующей цепи напряжение продолжает возрастать до $U_{\text{ВОЗМ}}$, в то время как в последующих цепях (в следующих фирмах) расти с коэффициентом роста τ — постоянной цепи.

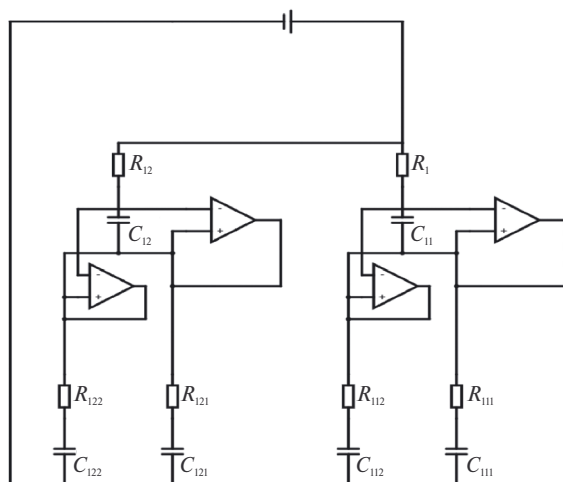


Рис. 3. Электротехническая модель. Логарифмический рост

Для поддержания напряжения, равного начальному, подключены компараторы, сравнивающие напряжения на инвертируемом и на неинвертируемом входах. Скоростью распространения инновации является скорость заряда соответствующего конденсатора. Момент включения компаратора соответствует зарядке конденсатора до $0,8U_{\text{ВОЗМ}}$. Таким образом, в предшествующей цепи напряжение продолжает возрастать до $U_{\text{ВОЗМ}}$, в то время как в последующих цепях (в следующих фирмах) расти с коэффициентом роста τ — постоянной цепи.

На рис. 3 представлена принципиальная схема для случая шести фирм-последователей. При этом число последователей на каждом уровне равно 2; размеры есть емкости конденсаторов (пример расчета): 100, 200, 300, 400, 500, 600 мкФ, показатели готовности внедрять

инновацию и степени влияния есть сопротивления резисторов в цепи: 100, 90, 93, 85, 87, 84 Ом соответственно.

Емкость конденсатора, C — размер компании. Вычисляется по аналогии с размером фирмы диффузионной модели.

Сопротивление, R — интегральный показатель готовности внедрять инновацию каждой фирмы и степени влияния данной фирмы на соседние. Вычисляется как результат произведения величин межфирменного влияния, скорости распространения информации между фирмами и готовности внедрять из диффузионной модели.

Заряд, q — прорывной уровень инновации. Вычисляется по аналогии с диффузионной моделью.

4.3. Математическое описание процесса

Опишем итерационный процесс заряда конденсаторов в цепи. Нулевой итерацией все компараторы не подключают нового источника энергии. Для нее запишем

$$q_1^0 = (U - U_c^{sum}) / R_1 = (U - \sum_i (q_i^0 / C_i)) / R_1,$$

где $U_c^{sum} = \sum (q_i^0 / C_i)$ — суммарное напряжение на всех конденсаторах каждой ветки дерева; q_1^0 — заряд от первоначального источника (от компании, в которой впервые появилась инновация); U — напряжение на первоначальном источнике; R_1 — сопротивление всей цепи; C_i — емкость конденсатора i .

Запишем правило Кирхгофа:

$$\sum_j \dot{q}_{ij}^0 = \dot{q}_i^0, \dot{q}_{ij}^0 R_{ij} = \text{const}, q_{ij}^0 = q_i^0 R_i / R_{ij},$$

где q_{ij}^0 — все заряды после q_i^0 , R_{ij} — эффективное сопротивление следующего за соответствующим конденсатором участка цепи.

При достижении заданных пороговых значений напряжений конденсаторов в цепи включается 1 уровень компараторов (на примере рис. 3 — при C_{11} и C_{12}), соответственно, увеличиваются напряжения на соответствующих конденсаторах до заданного. Рассмотрим на примере C_{11} :

$$q_{11}^1 = (U_{11} - U_{11c}^{sum}) / R_{11} = (U_{11} - \sum_i \frac{q_{11i}^0}{C_{11i}}) / R_{11},$$

$$\sum_j \dot{q}_{ij}^1 = \dot{q}_i^1, \dot{q}_{ij}^1 R_{ij} = \text{const}, q_{ij}^1 = q_i^1 R_i / R_{ij}, i = 11, 12, \dots$$

Тогда искомая скорость заряда конденсатора (и скорость внедрения инновации в рассматриваемую фирму) есть: $v_{11} = \dot{q}_{11}^1 / C_{11}$. Сумма всех графиков функций скоростей внедрения инновации в каждую фирму есть интегральная характеристика скорости распространения инновации в отрасли.

Каждый конденсатор заряжается параллельно; просуммировав функции заряда каждого, получим функцию эквивалентного оседания. Данная физическая характеристика есть интегральная функция распространения инновации в отрасли.

Для приведенных размерностей в качестве примера для расчета итоговая функция изображена на рис. 4

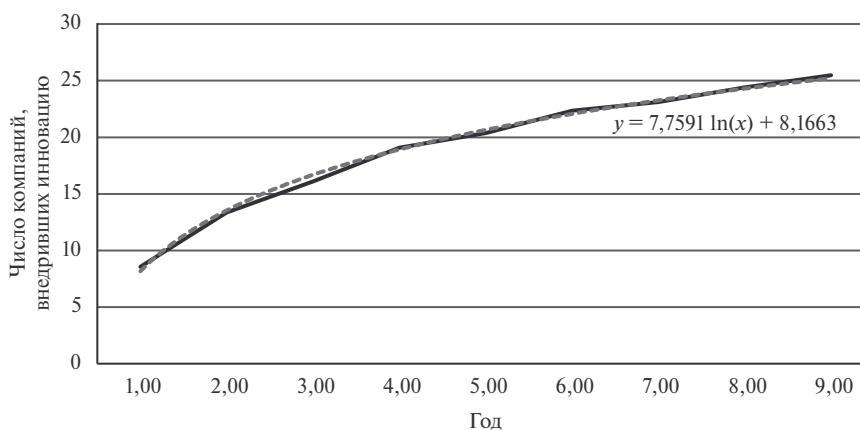


Рис. 4. Итоговая функция распространения инновации в отрасли

4.4. Анализ

Уравнение скорости распространения заряда учитывает включение и влияние компаратора через изменение сопротивления в цепи при достижении порогового напряжения на компараторе. Таким образом, RC-модель позволяет исследовать процесс распространения инноваций как процесс передачи энергии в RC-контуре, также учитывается факт улучшения инновации каждой фирмой благодаря включению компаратора в сеть.

5. АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ НА ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На основе полученного функционального описания процессов были скорректированы коэффициенты, используя реальные исторические данные о внедрении инноваций в ТЭК. Для построения модели использовались данные о динамике внедрения инноваций компанией Haldor Topsoe. На рис. 5–6 приведены примеры расчетов для двух технологий.

По результатам корректировки моделей на исторических данных был получен следующий диапазон коэффициентов.

Множитель для коэффициента межфирменного влияния (S) для сектора нефтехимии: регион Азия — $[0,2; 0,5]$; регион Европа и Америка — $[0,1; 0,2]$.

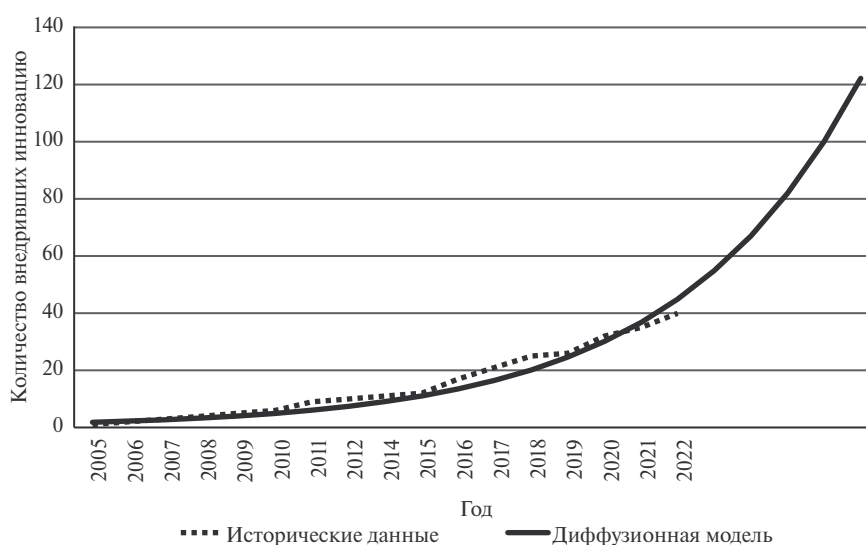


Рис. 5. Криогенная установка GOX

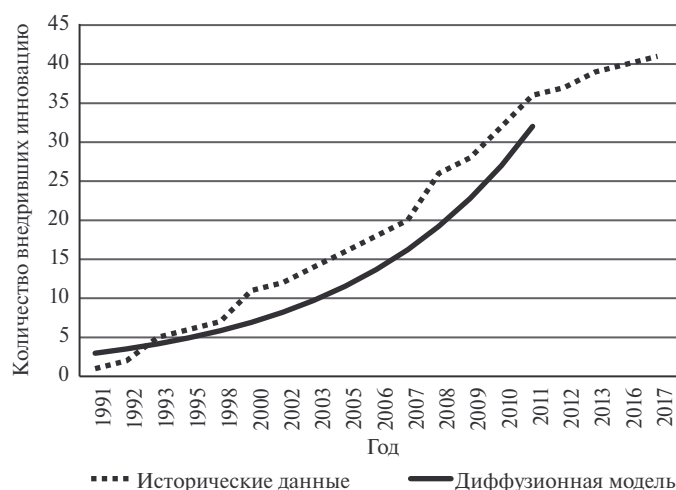


Рис. 6. Катализаторы SATOX

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы и получены экономические модели, описывающие распространения инноваций между компаниями с учетом силы межфирменного влияния, барьеров внедрению и т.д. Протестированная на реальных исторических данных модель была актуализирована коэффициентами, зависящими от региона внедрения инновации.

С целью обеспечения инновационного развития России и всех производственных секторов экономики рекомендуется использовать описанные в работе инструменты и подход к исследованию и анализу скорости распространения инноваций (Zhdaneev, Frolov, 2024, p. 1418).

Разработанная модель применима для описания процесса распространения инноваций любой отрасли страны — при инвестиционном и бизнес-планировании в компаниях, при принятии решений об инвестировании в инновационные проекты. Модель применима также на государственном уровне при планировании федеральных программ поддержки инноваций, экономического прогнозирования развития регионов и страны.

При использовании данного инструмента в России в отраслях с низким уровнем инновационной активности ключевых производственных секторов экономики прогнозируется повышение уровня высокотехнологического производства на несколько процентных пунктов, повышение экспорта высокотехнологичных товаров, повышение уровня инновационной активности на 20%, рост доли организаций, осуществляющих технологичные инновации, на 30% (Galitskaya, Zhdaneev, 2022; Ovsyannikov, Zhdaneev, 2024). На примере топливно-энергетической отрасли России прогнозируются возможность поддержания добычи нефти с газовым конденсатом на уровне 525 млн т (за счет ввода в эксплуатацию новых месторождений с использованием передовых отечественных технологий), повышение технологического уровня предприятий (индекс Нельсона) (за счет внедрения новых разработок и управления портфелем патентов), а также снижение уровня зависимости от импорта (Голышева и др., 2020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Голышева Е.А., Жданев О.В., Корнев В.В., Лядов А.С., Рубцов А.С. (2020). Нефтехимическая отрасль России: анализ текущего состояния и перспектив развития // *Журнал прикладной химии*. Т. 93. № 10. С. 1499–1507. DOI: 10.31857/S0044461820100126 [Golysheva E.A., Zhdaneev O.V., Korenev V.V., Lyadov A.S., Rubtsov A.S. (2020). The petrochemical industry of Russia: Analysis of the current state and development prospects. *Journal of Applied Chemistry*, 93, 10, 1499–1507. DOI: 10.31857/S0044461820100126 (in Russian).]
- Цветкова Н.А., Туккель И.Л. (2017). Модели распространения инноваций: от описания к управлению инновационными процессами // *Инновации*. № 11 (229). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-rasprostraneniya-innovatsiy-ot-opisaniya-k-upravleniyu-innovatsionnymi-protsessami> [Tsvetkova N.A., Tukkell I.L. (2017). Models of innovation diffusion: From description to management of innovation processes. *Innovations*, 11 (229). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-rasprostraneniya-innovatsiy-ot-opisaniya-k-upravleniyu-innovatsionnymi-protsessami> (in Russian).]
- Цветкова Н.А. (2018). О взаимном влиянии инноваций // *Инновации*. № 3 (233). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vzaimnom-vliyaniy-innovatsiy> [Tsvetkova N.A. (2018). On the mutual influence of innovations. *Innovations*, 3 (233). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vzaimnom-vliyaniy-innovatsiy> (in Russian).]
- Abrahamson E., Rosenkopf L. (1997). Social network effects on the extent of innovation diffusion: A computer simulation. *Organizational Science*, 8, 3, 289–309.
- Adiano C., Roth A.V. (1994). Beyond the house of quality: Dynamic QFD. *Benchmarking for Quality Management & Technology*, 1, 1, 25–37.
- Bass F.M. (1969). A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 15, 5, 215–227.
- Benhabib J., Perla J., Tonetti C. (2016). The growth dynamics of innovation, diffusion, and the technology frontier. [Report]. N.Y.: New York University. 1057 p.
- Delre S.A., Jager W., Janssen M.A. (2007). Diffusion dynamics in small-world networks with heterogeneous consumers. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 13, 2, 185–202.
- Fuenfschilling L., Truffer B. (2014). The structuration of socio-technical regimes: Conceptual foundations from institutional theory. *Research Policy*, 43, 772–791. DOI: 10.1016/j.respol.2013.10.010

- Galitskaya E., Zhdanev O.** (2022). Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. *Environmental Technology and Innovation*, 27, 102517 (in English). DOI: 10.1016/j.eti.2022.102517
- Lopez-Pintado D.** (2008). Diffusion in complex social networks. *Games and Economic Behavior*, 62, 2, 573–590.
- Mahajan V., Peterson R.** (1985). Models for innovation diffusion. *Quantitative Applications in the Social Sciences. Sage University Paper*. Newbury Park: SAGE Publications, Inc.
- Mardani A., Jusoh A., Zavadskas E.K., Cavallaro E.K., Khalifah Z.** (2015). Sustainable and renewable energy: An overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. *Sustainability*, 7, 10, 13947–13984.
- Meade N., Islam T.** (2006). Modelling and forecasting the diffusion of innovation — a 25-year review. *International Journal of Forecast*, 22, 514–545.
- Moskalev A., Tsygankov N.** (2021). Diffusion model of various modifications of an innovative product. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 320, 03004 (in English).
- Ovsyannikov I.R., Zhdanev O.V.** (2024). Forecast of innovative activity in key areas of energy transition technologies based on analysis of patent activity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 87, 1261–1276. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.375 (in English).
- Pelegrin B., Fernandez P., Perez M.D.G.** (2014). Profit maximization and reduction of the cannibalization effect in chain expansion. *Annals of Operations Research*, 1–19.
- Rogers E.M.** (2009). Innovation diffusion: Social network models. In: *Encyclopedia of complexity science and technology*, 4554–4562.
- Tsvetkova N.A., Tukul I.L., Ablyazov V.I.** (2017). Simulation modeling the spread of innovations. *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. St. Petersburg, Russia, 675–677 (in English). DOI: 10.1109/SCM.2017.7970686 Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7970686>
- Young H.P.** (2009). Innovation diffusion in heterogeneous populations: Contagion, social influence, and social learning. *American Economic Review*, 99, 5, 1899–1924.
- Zhdanev O.V., Frolov K.N.** (2024). Technological and institutional priorities of the oil and gas complex of the Russian Federation in the term of the world energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 58, 1418–1428 (in English). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.285

The econophysical model of innovation diffusion

© 2024 O.V. Zhdaneev, I.R. Ovsyannikov

O.V. Zhdaneev,

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Moscow, Russia; e-mail: Zhdaneev@rosenergo.gov.ru

I.R. Ovsyannikov,

Center of Operational Services; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)", Moscow, Russia; e-mail: ovsyannikov.ir@phystech.edu

Received 27.02.2024

Abstract. Analysis and evaluation of innovation efficiency require the development of tools to model their dissemination process within the industry. This paper presents a model of innovation diffusion based on physical approaches, describing stages of accelerating and decelerating growth. An exponential growth is described using a diffusion model, while a logarithmic one employs an electrical engineering model. The paper presents the correspondence of physical parameters with their economic counterpart: size of a company; characteristic of speed of information exchange between firms; company's willingness to innovate; inter-firm influence and the breakthrough level of innovation. The theoretical model obtained was tested on historical data of innovation implementation in the fuel and energy complex, followed by adjustments of coefficients depending on the branch of innovation implementation. The developed model is applicable for describing the process of innovation dissemination in any industry in the country, as well as for investment and business planning in companies and decision-making on investments in innovation projects. When applied in industries with low levels of innovation activity, an increase in the level of high-tech production and the share of organizations implementing technological innovations is predicted. Using the example of Russia's fuel and energy sector, rising in the technological level of enterprises and a decrease in import dependence are forecasted.

Keywords: technological development; innovations; innovation management.

JEL Classification: O33.

UDC: 51-77.

For reference: **Zhdaneev O.V., Ovsyannikov I.R.** (2024). The econophysical model of innovation diffusion. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 4, 102–112. DOI: 10.31857/S0424738824040092 (in Russian).