

КРИВЫЕ ОБУЧЕНИЯ В ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: МЕЖСТРАНОВЫЙ АНАЛИЗ*

Светлана Валерьевна РАТНЕР

доктор экономических наук, ведущий сотрудник лаборатории экономической динамики и управления инновациями,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация
lanaratner@gmail.com

История статьи:

Принята 31.03.2016
Принята в доработанном виде
21.04.2016
Одобрена 18.05.2016

УДК

338.2:338.31:338.45:339.13:620.9

JEL: O33, Q42, Q47, Q48**Аннотация**

Предмет. Понимание закономерностей изменения во времени стоимости энергии, произведенной по различным технологиям, является важным аспектом в принятии решений относительно будущего развития энергетических систем и разработке государственной политики стимулирования возобновляемой энергетики. В последние годы в России, благодаря действию мер государственной поддержки, активизировались процессы строительства и ввода в эксплуатацию объектов возобновляемой энергетики мощностью от 5 мВт. Реализация нескольких успешных крупных солнечных проектов привела к появлению в России новых высокотехнологичных производств солнечных модулей и батарей. В то же время ни одного успешного проекта в ветровой энергетике пока не реализовано. Потенциальными сдерживающими факторами могут быть слишком высокие требования по локализации производства и низкие темпы роста внутреннего рынка, заложенные в государственных стимулирующих программах.

Методология. Для проверки гипотезы о сдерживающих факторах развития ветровой энергетики в данной работе использована методология кривых обучения.

Результаты. Проведен мета-анализ данных о темпах обучения в ветровой энергетике, полученных на основе построения однофакторных и двухфакторных моделей кривых обучения, детализированных по странам и периодам развития технологии. Проведен анализ межстрановых различий. Для интерпретации выявленных различий использован метод множественного кейс-стади.

Выводы. Выявлено, что максимальные темпы обучения в ветровой энергетике обеспечиваются при усиленной государственной поддержке исследований и разработок (ИиР) на ранних этапах развития технологии и при привлечении крупных компаний – производителей ветрогенерационного оборудования на территорию страны на более поздних этапах. С учетом того что технологии производства ветрогенерационного оборудования на сегодняшний день хорошо развиты, а мировой рынок ветровых турбин высококонкурентен, тактика «технологии в обмен на доступ к внутреннему рынку» может оказаться успешной даже при относительно небольшой емкости внутреннего рынка. Поэтому снижение требований по индексу локализации ветровых проектов на ближайшие 3–5 лет представляется целесообразным.

Ключевые слова: ветровая энергетика, кривые обучения, энергетическое машиностроение, экономический анализ

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2016

Введение

Понимание закономерностей изменения во времени стоимости энергии, произведенной по различным технологиям, является важным аспектом в принятии решений относительно будущего развития энергетических систем и разработке государственной политики стимулирования возобновляемой энергетики. В последние десятилетия в научной литературе по экономике энергетики большую популярность приобрела теория кривых обучения (learning curves), с помощью которой изучаются и прогнозируются экономические параметры различных энергетических технологий, и традиционных, и новых. Данный подход предполагает эндогенность технологического развития и зависимость его

темпов от таких факторов, как объем инвестиций в исследования и разработки (ИиР), интенсивность стимулирующих мер и т.д. [1]. В качестве способа технологического развития в исследованиях по энергетическим технологиям чаще всего рассматривают стоимость единицы мощности.

Простейшая математическая модель, отражающая основные положения теории обучения в приложении к энергетическим технологиям имеет следующий вид [2]:

$$SC = a \cdot CC^{-b},$$

$$\log(SC) = \log(a) + (-b) \cdot \log(CC),$$

$$TC = \int_0^{CC} a \cdot CC^{-b} dCC = \frac{a}{1-b} CC^{1-b}, \quad (1)$$

$$PR = 1 - LR = 2^{-b},$$

* Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект №15-06-06360_a).

где SC – удельная стоимость (стоимость на единицу мощности);

CC – кумулятивная мощность;

TC – кумулятивная стоимость;

PR – темп технологического прогресса;

LR – темп обучения, единичная удельная стоимость (удельная стоимость, когда мощность достигает объема, делимого на единицу мощности);

коэффициент a – единичная удельная стоимость (удельная стоимость, когда объем мощности достигает делимой единицы);

коэффициент b – эластичность обучения.

В модели (1) удельная стоимость является функцией только одного аргумента – кумулятивной мощности, которая в данном случае отражает весь накопленный в процессе развития технологии опыт. В некоторых исследованиях (например, [3]) в модели (1) в качестве экзогенной переменной рассматривают кумулятивный объем произведенной энергии.

Также широкое распространение в исследованиях динамики стоимости энергетических технологий получила двухфакторная модель кривой обучения, в которой удельная стоимость зависит, помимо кумулятивной мощности, от вложений в ИиР [2]:

$$SC = a \cdot (CC^{-b}) \cdot (KS^{-c}),$$

$$PR(LBD) = 1 - LR(LBD) = 2^{-b}, \quad (2)$$

$$PR(LBC) = 1 - LR(LBC) = 2^{-c},$$

$$KS_t = KS_{t-1}(1 - \delta) + R \wedge D_{t-lag},$$

где KS – объем накопленных знаний;

коэффициент c – эластичность обучения в ИиР;

$PR(LBD)$ – темп прогресса обучения в производстве (LBD – *learning-by-doing*);

$PR(LBS)$ – темп прогресса обучения в ИиР (LBS – *learning-by-searching*);

δ – темп устаревания знаний;

lag – временной лаг между началом ИиР и началом коммерческого использования знаний.

Заметим, что в данной форме предполагается, что кумулятивная мощность и кумулятивные знания достигают объема, кратного единичному, одновременно. На практике такое совпадение

случается достаточно редко [4]. В качестве прокси-переменной для KS чаще всего используют данные об инвестициях в исследования и разработки названной технологии, причем учитываются как государственные, так и частные инвестиции.

В большом количестве исследований, направленных на идентификацию модели (2) на основе эмпирических данных (например, [5–7]) выявлено, что инвестиции в ИиР играют значимую роль в сокращении стоимости генерирующих мощностей на всех стадиях развития технологии. Зачастую их влияние оценивается значительно выше, чем влияние обучения в производстве, кроме того, доказано, что данные факторы не являются взаимозаменяемыми [7]. В некоторых исследованиях [3] теоретически обосновывается, что инвестиции в ИиР критически важны для повышения производительности технологии в инновационной фазе. С течением времени и прогрессом в промышленном освоении новой технологии вклад инвестиций в ИиР в производительность технологии снижается, тогда как вклад обучения в процессе производства (*learning-by-doing*) увеличивается. Графическое представление этого процесса изображено на рис. 1.

При изучении и прогнозировании прогресса в освоении технологий, для которых еще нет достаточного количества эмпирических данных, в литературе применяют так называемую покомпонентную модель кривой обучения [8], которая может быть представлена следующим образом:

$$SC = \sum_{i=1}^n a_i \cdot (CC_i - b_i),$$

где индекс i указывает на номер каждой из n компонент новой технологии, остальные обозначения имеют то же значение, что и в модели (1).

Использование моделей кривых обучения с тремя или более экзогенными переменными (факторами) встречается в литературе достаточно редко, что может быть объяснено трудностями, связанными с идентифицируемостью модели по ограниченным статистическим данным. В то же время именно эти неучтенные факторы представляют особый интерес для анализа межстрановых различий в темпах обучения при освоении одних и тех же технологий и могут дать ответы на вопросы об эффективности национальных моделей организации новых высокотехнологичных производств. Поэтому целью данной работы является построение моделей кривых обучения,

детализированных по странам и подотраслям «новой энергетики» (исследуется технология наземной ветровой генерации) на основе мета-анализа статистических данных. Информационной базой исследования послужили аналитические материалы Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA), тематические отчеты Мирового Ветроэнергетического Совета (Global Wind Energy Council, GWEC), а также данные корпоративных отчетов компаний-производителей ветроэнергетического оборудования.

Мета-анализ данных по темпам обучения в наземной (onshore) ветровой энергетике

Наибольшее количество исследований, посвященных оценке темпов обучения в ветровой энергетике, выполнено по данным стран-пионеров в развитии данного сектора – Дании (табл. 1) и Германии (табл. 2), причем все исследования покрывают ранние этапы развития технологии (с 1981–1987 по 2000 г.), тогда как за более поздние периоды данные в литературе отсутствуют. Ограничения, связанные с отсутствием информации более поздних периодов, с одной стороны, не позволяют проследить весь путь технологии ветровой энергетики от экспериментальной разработки до коммерчески зрелой отрасли в масштабах одной страны. С другой стороны, оценки темпов обучения на ранних периодах освобождены от влияния эффектов технологического спилловера, стандартизации и глобализации [9], что позволяет более точно идентифицировать модель кривой обучения в рамках предположения об экзогенности введенных в нее объясняющих переменных.

За исследуемый период кумулятивная инсталлированная мощность наземных ветровых турбин в Дании возросла с 2 мВт до 2,4 гВт (более чем в 1 000 раз), причем благодаря развитию собственного производства ветроэнергетического оборудования и комплектующих. Датский производитель ветровых турбин Vestas, запустивший их серийное производство в 1980 г. и ориентировавшийся сначала преимущественно на американский рынок (Калифорния), в 1986 г. из-за резкого падения экспорта оказался на грани банкротства, однако был спасен экспоненциальным ростом внутреннего рынка. Стимулирующая государственная политика в данный период была представлена такими мерами, как налоговые льготы для общественных кооперативов по строительству и эксплуатации ветровых турбин [10], субсидирование затрат на строительство

ветровых парков от 30% в начале 1980-х годов и до 10% в середине, введение бонусных тарифов на покупку ветровой энергии (1993 г.), возврат части инвестиций в строительство ветровых парков через механизмы углеродного рынка (1990-е гг.) [11].

Оценки темпов обучения, приведенные в табл. 1, имеют достаточно большой разброс и получены для разных экзогенных и эндогенных переменных. Тем не менее, их анализ позволяет выделить некоторые закономерности развития технологии:

- 1) высокая отдача от инвестиций в ИиР на ранних этапах развития (что подтверждает предположение, выдвинутое в работе [3]);
- 2) большая эластичность себестоимости производства ветрового генерационного оборудования по объему кумулятивной инсталлированной мощности, нежели эластичность цены, на которую влияют также рыночные факторы;
- 3) более высокий темп обучения в развитии технологии в целом (включая производство оборудования, строительство и эксплуатацию ветровых парков), нежели отдельных ее частей (только производство генерационного оборудования).

Стремительное промышленное освоение технологий ветровой энергетики в Германии началось несколькими годами позже, чем в Дании. Первые ветровые парки, объединяющие несколько турбин и достигающие суммарной мощности до 400 кВт стали появляться в стране лишь начиная с 1986 г. В то же время активные исследования в области ветровой энергетики начали проводиться государственными и частными исследовательскими центрами при правительственной поддержке еще в конце 1970-х гг. В период с 1977 по 1989 г. более 40 промышленных компаний и академических организаций получили государственные гранты для разработки тестирования как малых (до 10 кВт), так и средних (от 200 до 400 кВт) ветровых генераторов [12]. Начиная с 1986 г., демонстрационные проекты ветровых парков стали частью государственной программы в области науки и технологий. С 1983 по 1991 г. 14 промышленных компаний получили государственное финансирование для производства 124 ветровых турбин.

Важным стимулом для развития внутреннего рынка ветровых генераторов малой мощности послужила государственная программа поддержки индивидуальных предпринимателей и кооперативов, являющихся собственниками ветровых турбин в сельской местности. Еще с

начала 1980-х гг. немецкие фермеры получили возможность входить в состав инвесторов ветровых проектов посредством предоставления земли под их строительство. Продажа электроэнергии в сеть стала доступным источником дохода для населения в менее развитых сельских регионах, что способствовало развитию положительного имиджа ветровой энергетики как отрасли экономики с высокими социальными эффектами [12]. К 1989 г. кумулятивный объем установленных ветровых мощностей достиг в стране 20 мВт [13].

Дальнейшее развитие ветровой энергетики в стране обеспечивалось в основном за счет установления бонусных тарифов на ветровую энергию. К концу 2000 г. кумулятивный объем установленных ветровых мощностей достиг в Германии отметки более 8,7 гВт.

Что касается развития ветрового энергетического машиностроения, то первый немецкий производитель – компания Enercon – был создан и запустил серийное производство ветровых турбин мощностью 55 кВт в 1984 г. К 1988 г. компания освоила выпуск турбин мощностью 80 и 100 кВт, а в 1993 г. – мощностью 500 кВт. Двумя годами позднее Enercon выпустил первую турбину мощностью 1,5 мВт, которая показала высокую эффективность в процессе тестовых испытаний. С 1996 г. начинается экспансия компании за рубеж – осуществлено приобретение производственных мощностей в Бразилии и Индии¹.

В конце 1990-х гг. интерес к ветровой энергетике начинает проявлять немецкий машиностроительный гигант – Siemens, – который приобретает датскую компанию – производителя ветровых турбин Bonus Energy A/S, получая таким образом доступ к уже достаточно развитым производственным технологиям.

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике Германии, полученные в различных исследованиях и представленные в табл. 2, в целом довольно схожи с оценками темпов обучения в Дании.

Единственным легко обнаруживаемым существенным отличием являются более высокие темпы обучения в ветроэнергетическом машиностроении (производство ветровых турбин), нежели оценки темпов обучения по отрасли в целом (строительство готовых генерирующих объектов). По нашему мнению, выявленное отличие может объясняться как эффектом

диффузии технологий производства ветровых турбин (из Дании в Германию), так и тем, что на ранних этапах развития технологии в Германии была оказана более существенная государственная поддержка исследований в данной области. Производственные технологии в Германии имели более длительный «инкубационный период» и были внедрены уже в более зрелом состоянии. Кроме того, внутренний рынок Германии отличается от датского в исследуемый период более высокой емкостью.

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике Испании схожи с выявленными темпами обучения для Дании и Германии (табл. 3). Однако развитие отрасли в этой стране происходило по несколько другому сценарию. Программы государственной поддержки развития возобновляемой энергетики 1980-х гг. (PER'86, PER'89) были направлены в основном на создание благоприятного инвестиционного климата в отрасли, в том числе посредством привлечения прямых иностранных инвестиций в ветровые проекты. Требования по индексу локализации ветровых проектов, установленные правительством, позволили привлечь иностранных производителей ветрогенерационного оборудования и разработанные ими технологии в страну. Тактика «технологии в обмен на доступ к внутреннему рынку» оказалась весьма успешной, и в 1994 г. датский Vestas основал совместное предприятие с испанской машиностроительной корпорацией Gamesa. В дальнейшем Gamesa постепенно развила данное направление производства, сделав его основным [14]. Требуемая емкость внутреннего рынка в стране обеспечивалась в исследуемый период постоянными пересмотрами стратегических целей в области энергетики. В 1991 г. правительство Испании одобрило новый Национальный энергетический план (PAEE 1991–2000), который включал цели увеличения доли возобновляемой энергии в энергобалансе страны с 4,5 до 10% к 2000 г. В 1997 г. в Испании был принят Закон об электроэнергии, который ввел в действие систему бонусных тарифов на возобновляемую энергетику [12].

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике по другим странам (табл. 3) имеют гораздо больший разброс и подтверждаются меньшим количеством исследований, выполненных по данным различных временных интервалов, что затрудняет их сопоставимость. Тем не менее дополнительный анализ литературы по истории развития технологии и мерах государственной поддержки ветровой энергетики в различных странах позволяет убедиться в их реалистичности.

¹ Официальный сайт компании Enercon.
URL: <http://www.enercon.de/unternehmen/historie>

Кейс-стади развития ветровой энергетики в Великобритании

В исследовании [15] показана нелогичность и нестабильность системы государственной поддержки возобновляемой энергетики в Великобритании в период 1980–2000 гг. Еще в 1980 г. Центральное правление производства электричества (Central Electricity Generation Board, CEGB) начало разработку нескольких демонстрационных проектов по всей Великобритании для продвижения технологии ветровой генерации. Однако первая реальная возможность внедрения возобновляемой энергии появилась только в 1990 г. с принятием нового Закона об электричестве (Electricity Act). Этот закон презентовал так называемые обязательства по использованию неископаемого топлива (NFFO) и предоставил финансовую поддержку производителям ядерной и возобновляемой энергии за счет существенного роста налога на ископаемое топливо. Региональные энергокомпании теперь были обязаны покупать энергию возобновляемую и ядерную по высоким ценам. Средства, собранные с налога на ископаемое топливо, используются для элиминирования разницы между этой завышенной ценой и средней ценой покупок энергии в их регионах. Благодаря этой модели первая британская коммерческая ветровая установка была построена в Корнуолле в 1991 г.

Закон об электричестве действовал с 1990 по 1998 г. (что объясняет высокие значения темпов обучения, когда в качестве зависимой переменной выступает цена генерируемой энергии²). Процесс конкурсного отбора проектов ветровой генерации фокусировался на получении самой низкой конечной цены и не предусматривал штрафов для компаний, которые выигрывали локацию, но так и не начали строительство. Контракты выдавались в ранней части процесса разработки, даже до получения разрешения на строительство. Многие проекты не получили разрешения, а некоторые из тех, кто его получил, оказались в экономически невыгодном положении из-за заявленной в процессе конкурсного отбора заниженной цены. В связи с этим значительная часть локаций, благоприятных для развития ветровой энергетики, осталась неиспользуемой.

Действие программы NFFO в 1990-х гг. имело не только положительные, но и отрицательные результаты для развития ветровой энергетики в

² Здесь и далее имеется в виду цена электроэнергии, произведенной с помощью той технологии генерации (ветровой или солнечной), параметры которой оцениваются.

Великобритании. Изначальная спешка при отборе и строительстве ветровых парков привела к негативному отношению местного населения к ветровой энергии, что продолжалось в течение всего десятилетия. В итоге в 2000 г. в стране было введено в действие только около 400 мВт ветровых мощностей, что в разы меньше, чем в Дании, Германии и Испании. Такая емкость внутреннего рынка оказалась недостаточной для развития в стране собственного ветроэнергетического производства, которое до сих пор представлено одной компанией VWT Power Ltd., занимающейся производством малых ветряков с вертикальной осью и мощностью до 10 кВт.

Кейс-стади развития ветровой энергетики в США

Высокие оценки темпов обучения в производстве по данным США в период до 1994 г. (табл. 3) объясняются действием Закона о государственном регулировании коммунальных услуг (Public Utility Regulatory Policies Act, PURPA) и федеральной программы исследований в области возобновляемой энергетики, которая включала в 1970-е гг. финансирование фундаментальных и прикладных НИР, а также демонстрационные проекты в партнерстве с частным сектором. Финансирование исследований и разработок по возобновляемой энергетике возросло с 1 млн долл. США в год в 1970 г. (что составляет 2,73 млн долл. США в ценах 2011 г.) до 1,4 млрд долл. США в год в 1980 г. (что составляет 3,8 млрд долл. США в ценах 2011 г.).

С введением PURPA в период 1978–1981 гг. были созданы рыночные стимулы для коммерциализации разработанных технологий. На сетевые компании были возложены обязательства по покупке возобновляемой энергии по цене, компенсирующей затраты производителей. Предложенный механизм ценообразования был достаточно сложен, а его применение на практике существенно различалось от штата к штату. Наиболее привлекательные условия для развития возобновляемой энергетики в 1980-х гг. сформировались в штате Калифорния, что привело к бурному росту объемов инсталляций объектов ВИЭ [16]. К 1985 г. в Калифорнии действовало около 13 000 ветровых турбин общей мощностью около 1 гВт. Кроме того, в 1980-е гг. в США были введены меры государственной поддержки на федеральном уровне – так называемый инвестиционный налоговый кредит (ИТС), предоставляющий налоговые льготы в объеме, пропорциональном инвестициям в ветровые проекты.

В 1990-е годы государственные и частные инвестиции в разработку технологий возобновляемой энергетики сократились до 148 млн долл. США в год. Однако в целом в период 1973–2003 гг. на НИОКР в области возобновляемой энергии федеральным правительством США было затрачено около 14,6 млрд долл. США. После эры PURPA настал период стагнации (1990–1997): из-за снижения мировых цен на нефть и свертывания государственных программ поддержки привлекательность инвестиций в возобновляемую энергетику упала. Однако временной период, для которого получены оценки темпов обучения в США в работе [11], почти не пересекается с периодом стагнации и соответствует периоду наиболее бурного развития ВИЭ в США.

История ветроэнергетического машиностроения США также начинается в 1980-х гг. Первый американский девелопер ветровых парков Zond Corp. была образована в 1980 г., и первоначально занималась импортом ветровых турбин из Европы, строительством и эксплуатацией ветрогенерационных объектов. Постепенно развивая собственное производство, к середине 1990-х гг. Zond Corporation освоила выпуск трех новых поколений ветровых турбин и завоевала около 10% мирового рынка [17]. Однако из-за нестабильности государственной поддержки ветровой энергетики в США в 1990-х гг. финансовое положение компании стало настолько неустойчивым, что в 1997 г. она была поглощена американским энергетическим концерном Enron, который в свою очередь в 2002 г. был поглощен General Electric.

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике по другим странам

Значения оценок темпов обучения в Швеции несколько ниже, чем в Дании, Германии и Испании, что может объясняться незначительной емкостью и низкими темпами роста внутреннего рынка до середины 2000-х гг. Оценки темпов обучения в Тайване и Китае получены в период резкого роста цен на сырье и материалы, используемые в ветроэнергетическом машиностроении, что привело к пропорциональному росту стоимости ветровых турбин и капитальных затрат ветровых проектов во всем мире [9]. Тем не менее, как видно из табл. 3, в один и тот же временной период темпы обучения в Тайване оказались отрицательными, тогда как в Китае остались в зоне положительных значений и даже вполне сопоставимы с оценками темпов обучения европейских стран, полученных за более благополучный период развития отрасли.

Данную разницу можно объяснить гигантской емкостью внутреннего рынка Китая и беспрецедентными темпами его роста.

В начале 2000-х гг. ветровая энергетика в названном государстве только зарождалась, к 2011 г. общая мощность установленных ветрогенераторов составила 62,36 гВт, а доля ветроэнергетики в постоянно растущем энергобалансе страны достигла показателя 1,5%, что вывело Китай на позиции мирового лидера. В первой половине 2000-х гг. на рынке ветроэнергетического оборудования этой страны преобладали крупные транснациональные компании, такие как Vestas и Gamesa, но к концу десятилетия национальные производители (Goldwind, Sinovel, United Power, Mingyang и др.) достигли таких масштабов выпуска, которые позволили им навязать стратегию ценовой конкуренции и потеснить международных гигантов за счет предложения на тендерах гораздо более дешевых контрактов. Однако отсутствие полноценных научно-исследовательских программ перед переходом к серийному производству привело к нескольким опасным инцидентам (взрывам работающих турбин, разрушениям лопастей и т.д.), частично подорвавшим доверие к индустрии ветровой энергетики в стране [18].

Выводы

Если подводить итоги исследования, можно сделать вывод о том, что максимальные темпы обучения в ветровой энергетике обеспечиваются при усиленной государственной поддержке исследований и разработок (ИиР) на ранних этапах развития технологии и привлечении крупных компаний-производителей ветрогенерационного оборудования на территорию страны на более поздних этапах. Вложения в ИиР обеспечивают восприимчивость национальной экономики к инновационной адаптации технологии, без которой переход от сборочного производства к более высоким уровням технологической цепочки, создающим высокую добавленную стоимость, практически невозможен. Привлечение компаний – лидеров отрасли на территорию страны (а не создание собственного производства с нуля) в текущей ситуации на мировом рынке ветрогенерационного оборудования, которая характеризуется высокой конкуренцией за новые рынки сбыта, представляется целесообразным.

Полученные результаты могут быть использованы для коррекции темпов развития ветровой

энергетики в России, заложенных в Постановлении Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» и Распоряжении Правительства РФ от 28.05.2013 № 861-р. Данные документы определяют объем ввода ветроэнергетических объектов до 2020 г. в размере 3,6 гВт, а индекс локализации

производства от 35% в 2014 г. до 65% в 2016 г. и последующем периоде. С учетом недостаточного представительства ветровых проектов в конкурсных отборах 2013–2015 гг. и отсутствия в стране компаний, владеющих технологиями производства ветровых турбин мощностью более 500 кВт, снижение требований по индексу локализации ветровых проектов на ближайшие 3–5 лет представляется целесообразным.

Таблица 1

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике Дании

Table 1

Estimation of rate of learning in wind energy Denmark

Временной период	Независимая переменная	Зависимая переменная	Темп обучения	Источник
1981–2000	Кумулятивная мощность произведенных ветровых турбин (мВт)	Цена ветровой турбины, произведенной в Дании (долл. США/кВт)	8	[19]
1981–2000	Кумулятивная мощность произведенных ветровых турбин (мВт)	Себестоимость производства (в Дании) ветровой турбины (долл. США/кВт)	14	
1981–2000	Кумулятивная установленная мощность (мВт)	Цена ветровой турбины, установленной в Дании (долл. США/кВт)	9	
1984–1999	Инвестиции в ИиР (долл. США)	Цена электроэнергии (долл. США/кВтч)	7,8	[20]
1984–1988	Инвестиции в ИиР (долл. США)	Цена электроэнергии (долл. США/кВтч)	11,7	
1982–1997	Кумулятивный объем продаж турбин датских производителей (мВт)	Цена ветровой турбины (долл. США/кВт)	4	[21]
1982–1997	Кумулятивная установленная мощность (мВт)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	8	[22]

Источник: составлено автором

Source: Authoring

Таблица 2

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике Германии

Table 2

Estimation of rate of learning in wind energy Germany

Временной период	Независимая переменная	Зависимая переменная	Темп обучения	Источник
1987–2000	Кумулятивный объем произведенных турбин (мВт)	Цена ветровой турбины, произведенной в Германии (долл. США/кВт)	6	[19]
1987–2000	Кумулятивный объем произведенных турбин (мВт)	Себестоимость производства ветровой турбины (долл. США/кВт)	12	
1987–2000	Кумулятивная установленная мощность (мВт)	Цена ветровой турбины в Германии (долл. США/кВт)	6	
1990–1998	Кумулятивный объем проданных в Германии ветровых турбин (мВт)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	8	[21]
1990–1998	Кумулятивная установленная мощность (мВт)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	8	[22]
1990–1999	Кумулятивный объем установленных мощностей (мВт)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	3,1	[6]
1990–1999	Кумулятивный объем инвестиций в ИиР (долл. США)	Требуемый объем инвестиций (долл. США /кВт)	13,2	[6]

Источник: составлено автором

Source: Authoring

Таблица 3

Оценки темпов обучения в ветровой энергетике других стран

Table 3

Estimation of rate of learning in wind power in other countries

Страна	Временной период	Независимая переменная	Зависимая переменная	Темп обучения	Источник
Великобритания	1986–2000	Кумулятивный объем инсталлированных мощностей (мВт)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	5,4	[12]
	1986–2000	Кумулятивный объем инвестиций в ИиР (долл. США)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	12,6	
	1991–1999	Инвестиции в ИиР (долл. США)	Цена электроэнергии (долл. США/кВтч)	25,1	[23]
Испания	1986–2000	Кумулятивный объем инсталлированных мощностей (мВт)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	5,4	[12]
	1986–2000	Кумулятивный объем инвестиций в ИиР (долл. США)	Требуемый объем инвестиций (долл. США/кВт)	12,6	
	1984–2000	Кумулятивный объем инсталлированных мощностей (мВт)	Стоимость инсталлированного объема мощности (долл. США/кВт)	9	[22]
США	1985–1994	Кумулятивный объем генерации (кВтч)	Цена электроэнергии (долл. США/кВтч)	32	[24]
Швеция	1994–2000	Кумулятивный объем инсталлированных мощностей (мВт)	Стоимость инсталлированного объема мощности (долл. США/кВт)	4	[22]
Тайвань	2001–2010	Кумулятивный объем инсталлированных мощностей (мВт)	Стоимость инсталлированного объема мощности (долл. США/кВт)	-5,6	[13]
Китай	2003–2007	Кумулятивный объем инсталлированных мощностей (мВт)	Цена электроэнергии (долл. США/кВтч)	4	[14]

Источник: составлено автором

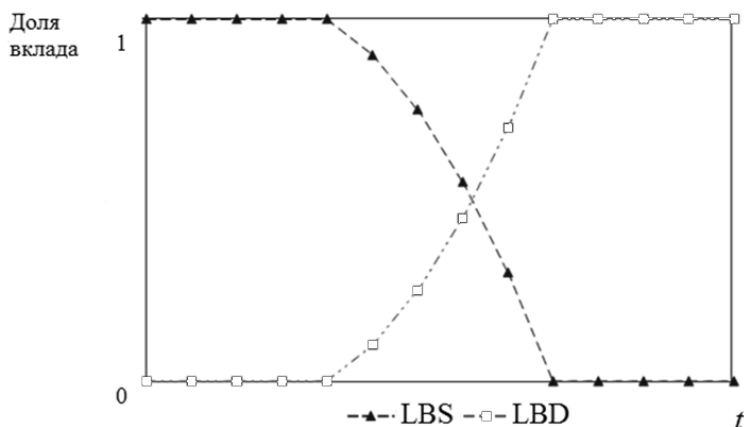
Source: Authoring

Рисунок 1

Вклад процессов обучения в ИиР и обучения в производстве в развитие технологии

Figure 1

The contribution of learning processes in R&D and training in production technology development



Источник: [3]

Source: [3]

Список литературы

1. *Romer P.M.* Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 1986, vol. 94, no. 5, pp. 1002–1037.
2. *Rout U.K., Blesl M., Fahl U., Emme U., Voß A.* Uncertainty in the learning rates of energy technologies: An experiment in a global multi-regional energy system model. *Energy Policy*, 2009, vol. 37, iss. 12, pp. 4927–4942.
3. *Rubin E.S., Azevedo I.M.L., Jaramillo P., Yeh S.* A review of learning rates for electricity supply technologies. *Energy Policy*, 2015, no.86, pp. 198–218.
4. *Miketa A., Schrattenholzer L.* Experiments with a methodology to model the role of R&D expenditures in energy technology learning processes: First results. *Energy Policy*, 2004, no. 32(15), pp. 1679–1692.
5. *Söderholm P., Sundqvist T.* Empirical challenges in the use of learning curves for assessing the economic prospects of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 2007, no. 32, pp. 2559–2578. doi: 10.1016/j.renene.2006.12.007
6. *Söderholm P., Klaassen G.* Wind Power in Europe: A Simultaneous Innovation–Diffusion Model. *Environmental and Resource Economics*, 2007, no. 36, pp. 163–190. doi: 10.1007/s10640-006-9025-z
7. *Jamasb T.* Technical change theory and learning curves: Patterns of progress in electricity generation technologies. *Energy Journal*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 51–72.
8. *Yeh S., Rubin E.S.* A review of uncertainties in technology experience curves. *Energy Economics*, 2012, no. 34(3), pp. 762–771. doi: 10.1016/j.eneco.2011.11.006
9. *Ратнер С.В., Панченко Ю.М.* Диффузия новых технологий в энергетике: международная стандартизация как инструмент снижения барьеров нетехнического характера // Инновации. 2014. № 1. С. 70–76.
10. *Krohn S.* Wind Energy Policy in Denmark: 25 Years of Success – What Now? Copenhagen, Danish Wind Industry Association, 2002.
11. *Bolinger M.* Community Wind Power Ownership Schemes in Europe and their Relevance to the United States. Available at: <http://urlid.ru/akuo>.
12. *Klaassen G., Miketa A., Larsen K., Sundqvist T.* The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom. *Ecological Economics*, 2005, no. 54(2), pp. 227–240.
13. *Trappey A.J.C., Trappey C.V., Liu P.H.Y., Lin L.-C., Ou J.J.R.* A hierarchical cost learning model for developing wind energy infrastructures. *International Journal of Production Economics*, 2013, no. 146, pp. 386–391.
14. *Qiu Y., Anadon L.D.* The price of wind power in China during its expansion: Technology adoption, learning-by-doing, economies of scale, and manufacturing localization. *Energy Economics*, 2012, no. 34(3), pp.772–785.
15. *Jacobsson S., Lauber V.* The Politics and Policy of Energy System Transformation – Explaining the German Diffusion of Renewable Energy Technology. *Energy Policy*, 2006, vol. 34, no. 3, pp. 256–276.
16. *Ратнер С.В., Иосифов В.В.* Использование принципов бережливого производства в энергетическом машиностроении // Материалы международной научно-практической конференции «Управление инновациями – 2014». Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 2014. С. 214–218.
17. *Mitchell C., Connor P.* Renewable energy policy in the UK 1990–2003. *Energy Policy*, 2004, vol. 32, no.17, pp. 1935–1947. doi:10.1016/j.enpol.2004.03.016
18. *Graves F., Hanser P., Basheda G.* PURPA: Making the Sequel Better than the Original. Available at: <http://www.eei.org/issuesandpolicy/stateregulation/Documents/purpa.pdf>.

19. *Parsons B.* Grid-Connected Wind Energy Technology: Progress and Prospects. Presented at the North American Conference of the International Association of Energy Economists. Albuquerque, NM, 1998. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25692.pdf>.
20. *Li Junfeng et al.* China Wind Energy Outlook, 2012. Available at: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/China-Outlook-2012-EN.pdf>.
21. *Neij L., Andersen P.D., Durstewitz M., Helby P., Hoppe-Kilpper M., Morthorst P.* Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment. Available at: <http://urlid.ru/akur>.
22. *Ibenholt K.* Explaining learning curves for wind power. *Energy Policy*, 2002, vol. 30, iss. 13, pp. 1181–1189.
23. Experience Curves for Energy Technology Policy. OECD, International Energy Agency. France, Paris, 2000. Available at: <http://www.wenergy.se/pdf/curve2000.pdf>.
24. *McDonald A., Schrattenholzer L.* Learning rates for energy technologies. *Energy Policy*, 2001, no. 29(4), pp. 255–261.

LEARNING CURVES IN WIND ENERGY: A CROSS-COUNTRY ANALYSIS

Svetlana V. RATNER

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
lanaratner@gmail.com**Article history:**

Received 31 March 2016

Received in revised form

21 April 2016

Accepted 18 May 2016

JEL classification: O33, Q42,
Q47, Q48**Keywords:** wind energy, learning curve, power engineering, economic analysis**Abstract****Importance** Understanding the logic of changes in the cost of energy that is generated using various technologies is a vital aspect in making decisions on the future development of energy systems and working-out the State policy to bolster renewable energy. In recent years, thanks to the State support, several successful solar energy projects have been implemented, however, there are none in the wind energy.**Objectives** The aim of the paper is to review constraining factors in the wind energy development.**Methods** To test the hypothesis on constraining factors in the wind energy, I employ the methodology of learning curves.**Results** I performed a meta-analysis of data on learning rates in the wind energy obtained by building the single- and dual-factor learning curve models with specification by countries and technology development periods. I also performed the analysis of cross-country differences. Multiple case studies were used to interpret the results.**Conclusions** The study reveals that maximal learning rates in the wind energy are achieved via enhanced State support to R&D at early stages of technological development, and via involvement of large manufacturers of wind generation equipment at later stages. Given the well-developed technologies of wind generating equipment manufacturing and highly competitive global market of wind turbines, the tactic of obtaining technologies in exchange for access to the domestic market may prove successful even with small domestic market capacity. Therefore, reducing the requirements for wind projects localization index for the coming 3–5 years seems appropriate.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2016

Acknowledgments

The article was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 15-06-06360_a.

References

1. Romer P.M. Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 1986, vol. 94, no. 5, pp. 1002–1037.
2. Rout U.K., Blesl M., Fahl U., Emme U., Voß A. Uncertainty in the learning rates of energy technologies: An experiment in a global multi-regional energy system model. *Energy Policy*, 2009, vol. 37, iss. 12, pp. 4927–4942.
3. Rubin E.S., Azevedo I.M.L., Jaramillo P., Yeh S. A review of learning rates for electricity supply technologies. *Energy Policy*, 2015, no. 86, pp. 198–218.
4. Miketa A., Schratzenholzer L. Experiments with a methodology to model the role of R&D expenditures in energy technology learning processes: First results. *Energy Policy*, 2004, no. 32(15), pp. 1679–1692.
5. Söderholm P., Sundqvist T. Empirical challenges in the use of learning curves for assessing the economic prospects of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 2007, no. 32, pp. 2559–2578. doi: 10.1016/j.renene.2006.12.007
6. Söderholm P., Klaassen G. Wind Power in Europe: A Simultaneous Innovation–Diffusion Model. *Environmental and Resource Economics*, 2007, no. 36, pp. 163–190. doi: 10.1007/s10640-006-9025-z
7. Jamasb T. Technical change theory and learning curves: Patterns of progress in electricity generation technologies. *Energy Journal*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 51–72.
8. Yeh S., Rubin E.S. A review of uncertainties in technology experience curves. *Energy Economics*, 2012, no. 34(3), pp. 762–771. doi: 10.1016/j.eneco.2011.11.006

9. Ratner S.V., Panchenko Yu.M. [Diffusion of new technologies in the energy sector: International standardization as an instrument to minimize non-technical barriers]. *Innovatsii = Innovation*, 2014, no. 1, pp. 70–76. (In Russ.)
10. Krohn S. Wind Energy Policy in Denmark: 25 Years of Success – What Now? Copenhagen, Danish Wind Industry Association, 2002.
11. Bolinger M. Community Wind Power Ownership Schemes in Europe and their Relevance to the United States. Available at: <http://urlid.ru/akuo>.
12. Klaassen G., Miketa A., Larsen K., Sundqvist T. The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom. *Ecological Economics*, 2005, no. 54(2), pp. 227–240.
13. Trappey A.J.C., Trappey C.V., Liu P.H.Y., Lin L.-C., Ou J.J.R. A hierarchical cost learning model for developing wind energy infrastructures. *International Journal of Production Economics*, 2013, no. 146, pp. 386–391.
14. Qiu Y., Anadon L.D. The price of wind power in China during its expansion: Technology adoption, learning-by-doing, economies of scale, and manufacturing localization. *Energy Economics*, 2012, no. 34(3), pp. 772–785.
15. Jacobsson S., Lauber V. The Politics and Policy of Energy System Transformation – Explaining the German Diffusion of Renewable Energy Technology. *Energy Policy*, 2006, vol. 34, no. 3, pp. 256–276.
16. Ratner S.V., Iosifov V.V. [Lean production in power engineering]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Upravlenie innovatsiyami – 2014* [Proc. Int. Sci. Conf. Management of Innovation – 2014]. Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2014, pp. 214–218.
17. Mitchell C., Connor P. Renewable energy policy in the UK 1990–2003. *Energy Policy*, 2004, vol. 32, no. 17, pp. 1935–1947. doi: 10.1016/j.enpol.2004.03.016
18. Graves F., Hanser P., Basheda G. PURPA: Making the Sequel Better than the Original. Available at: <http://www.eei.org/issuesandpolicy/stateregulation/Documents/purpa.pdf>.
19. Parsons B. Grid-Connected Wind Energy Technology: Progress and Prospects. Presented at the North American Conference of the International Association of Energy Economists. Albuquerque, NM, 1998. Available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25692.pdf>.
20. Li Junfeng et al. China Wind Energy Outlook, 2012. Available at: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/China-Outlook-2012-EN.pdf>.
21. Neij L., Andersen P.D., Durstewitz M., Helby P., Hoppe-Kilpper M., Morthorst P. Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment. Available at: <http://urlid.ru/akur>.
22. Ibenholt K. Explaining learning curves for wind power. *Energy Policy*, 2002, vol. 30, iss. 13, pp. 1181–1189.
23. Experience Curves for Energy Technology Policy. OECD, International Energy Agency. France, Paris, 2000. Available at: <http://www.wenergy.se/pdf/curve2000.pdf>.
24. McDonald A., Schrattenholzer L. Learning rates for energy technologies. *Energy Policy*, 2001, no. 29(4), pp. 255–261.