

ЭВОЛЮЦИЯ УДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И БЫТОВОМ СЕКТОРЕ РАЗНЫХ СТРАН

КОЛПАКОВ Андрей Юрьевич, к.э.н., ankolp@gmail.com, заведующий лабораторией Института народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

Scopus Author ID: 55039903300; ORCID: 0000-0003-4812-4582

ТЮРИН Артем Андреевич, tyurin.aa@phystech.edu, лаборант Института народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-0362-8904

В статье обоснована эволюция удельного энергопотребления в разных странах как чередование стадий преобладания факторов насыщения спроса и энергоэффективности. Для всех стран мира рассчитано удельное потребление «полезной» энергии в промышленности и бытовом секторе с учетом разной эффективности конечного использования ископаемых топлив и преобразованных энергоносителей (электроэнергии и тепла). Выделены группы стран, различающиеся разной (растущей, стабильной, снижающейся) динамикой энергоемкостей за последние 30 лет. Определены страны, для которых удельное полезное потребление энергии в промышленности и бытовом секторе не должно снижаться в последующие несколько десятилетий при сохранении эволюционной логики развития.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергия, энергоемкость, потребление, промышленность, бытовой сектор

DOI: 10.47711/2076-3182-2023-2-100-115

Введение. Энергоемкость (удельное потребление энергии) – центральный элемент во всех моделях описания энергетического сектора и выбросов парниковых газов, связанных с потреблением энергии [1–3]. Энергоемкость связывает валовые

характеристики описываемого объекта (например, численность населения, размер автомобильного парка, добавленная стоимость или выпуск некоторой отрасли) с объемом энергии, который необходим для обеспечения его (объекта) функционирования.

Энергоемкость – постоянно меняющийся во времени показатель. Например, если бы энергоемкость мирового ВВП оставалась неизменной с 2000 г., сегодня миру требовалось бы на треть больше первичной энергии.

В большинстве исследований изменение энергоемкости объясняется технологическими и структурными факторами [4–9]. Первый связан с уровнем используемых технологий в конкретном процессе – как правило, после создания конкретной технологии начинается длительный процесс ее совершенствования, что ведет в том числе к снижению удельного энергопотребления. Второй фактор объясняется либо изменением структуры объекта (когда в его составе преобладают более или менее энергоемкие элементы), либо изменением набора потребляемых энергоресурсов, которые характеризуются разной плотностью содержащейся энергии.

Последний тезис удобно проиллюстрировать на примере автотранспорта. Например, современный легковой автомобиль с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) потребляет 7 литров бензина на 100 км пути, электромобиль – 20 кВтч. В энергетическом эквиваленте это: $7 \text{ л} * 0,75 \text{ кг/л} * 44 \text{ МДж/кг} = 231 \text{ МДж}$ и $20 \text{ кВтч} * 3,6 \text{ МДж/кВтч} = 72 \text{ МДж}$, т.е. для совершения одной и той же работы бензина требуется примерно в 3 раза больше. Это объясняется тем, что в ДВС бензин проходит стадию преобразования в полезную энергию с коэффициентом полезного действия (КПД) около 30%, а электроэнергия уже является конечным носителем энергии и потребляется в системах электромобиля с КПД свыше 90%. Таким образом, любой автомобилист номинально начинает потреблять в 3 раза меньше энергии при простой замене своего авто с ДВС на электромобиль. Понятно, что на общую эффективность всей цепочки будет влиять КПД производства электроэнергии, однако при узкой трактовке энергоемкости конкретного процесса ситуация оказывается такой, как описано.

Ряд исследований отмечает обратную зависимость уровня цен на энергию и энергоёмкости экономик [10–12]. В то же время динамика цен является скорее стимулом для реализации конкретных мероприятий и запуска процессов, способствующих улучшению показателей энергоэффективности.

Сегодня все лидирующие экспертные группы и организации разрабатывают свои версии низкоэмиссионных сценариев глобального развития, сопряженного с целями смягчения климатических изменений посредством борьбы с выбросами парниковых газов, в том числе от потребления углеводородов. При построении таких сценариев повышению энергоэффективности (снижению энергоёмкости) уделяется огромное внимание как ключевому компоненту устойчивого развития [13–14], который позволяет решить проблемы энергетической безопасности и бедности при одновременном решении проблем изменения климата.

В целом, разрабатываемые сценарии предполагают постоянный рост энергоэффективности. Так, в период до 2050 г. средний темп снижения энергоёмкости ВВП в целом по миру в базовых сценариях ключевых организаций (IEA¹, DNV GL², EIA³, ОПЕС⁴, BP⁵, ExxonMobil⁶, Equinor⁷, Shell⁸, TotalEnergies⁹) составляет от 1,5% до 2,5%. Для сравнения: за 1972–1999 гг. энергоёмкость мирового ВВП снижалась в среднем на 1,2% в год, в период 2000–2010 гг. – на 1,1% в год; в период 2011–2016 гг. – на 2,3%; в период 2017–2021 гг. – на 1,1%.

¹ IEA. *World Energy Outlook 2021*. IEA, Paris. 2021. Доступно на: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.

² DNV GL. *Energy Transition Outlook 2021*.

³ EIA. *International Energy Outlook 2021*. 2022. Доступно на: <https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo21/>.

⁴ ОПЕС. *World Oil Outlook 2045*. 2022. Доступно на: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm.

⁵ BP. *Energy Outlook 2022*. 2022. Доступно на: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf>.

⁶ Exxon Mobil. *Outlook for energy: a perspective to 2040*. 2022. Доступно на: <https://corporate.exxonmobil.com/Energy-and-innovation/outlook-for-energy>.

⁷ Equinor. *Energy Perspectives 2021: Long-term macro and market outlook*. 2021. Доступно на: <https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/energy-perspectives/energy-perspectives-report-2021.pdf>.

⁸ Shell. *The energy transformation scenarios*. 2021. Доступно на: https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/the-energy-transformation-scenarios/jcr_content/root/main/section_524990089/simple/promo_copy/links/item0.stream/1652119830834/fba2959d9759c5ae806a03acfb187f1c33409a91/energy-transformation-scenarios.pdf.

⁹ Total Energies. *Energy Outlook 2022*. 2022. Доступно на: https://totalenergies.com/system/files/documents/2022-09/TotalEnergies_Energy_Outlook_2022.pdf.

Но более показательным является тот факт, что на прогнозном периоде удельное энергопотребление снижается повсеместно – во всех странах и регионах мира: в США величина снижения варьируется в диапазоне от $-1,6\%$ до $-2,3\%$; в ЕС – от $-1,9\%$ до $-2,2\%$; в Китае – от $-2,4\%$ до $-3,3\%$; в Индии – от $-0,8\%$ до $-3,2\%$. В наиболее популярном прогнозном отчете в сфере энергетике – IEA World Energy Outlook¹⁰ – даже в инерционном сценарии энергоемкость ВВП в период до 2030 г. снижается не только в развитых странах, но и в развивающихся регионах: в Центральной и Южной Америке – в среднем на 1% в год; в Африке – на $1,5\%$; на Ближнем Востоке – на $0,7\%$. Такая динамика кардинальным образом отличается от реальной жизни, где значительная часть стран Африки, Ближнего Востока, Центральной и Южной Америки отличаются не снижением (характерным для мира в целом), а ростом энергоемкости ВВП (рис. 1).

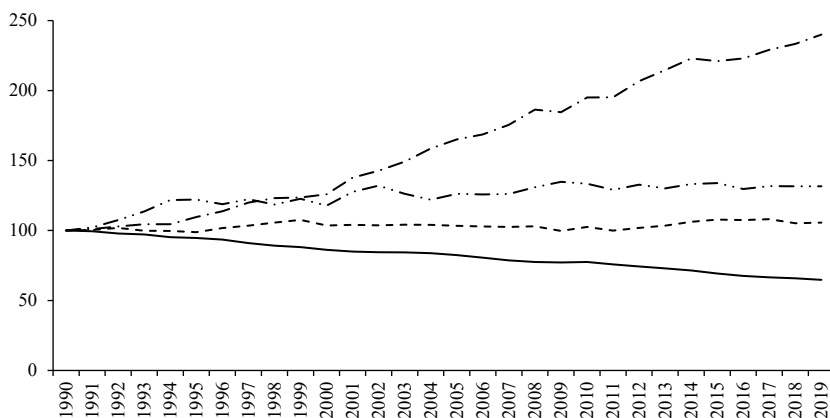


Рисунок 1. Энергоемкость ВВП ряда регионов мира, 1990 год = 100:
 — Мир; --- Африка; - · - · Ближний восток; - - - - Бразилия

Источник: Международное Энергетическое Агентство

Гипотезы о быстром переломе сложившихся тенденций в этих странах, хоть и имеют право на существование с целью сценарного анализа, в практическом русле выглядят дискуссионными [15, 16] и, что принципиально, противоестественными.

¹⁰ IEA. World Energy Outlook 2019. IEA, Paris. 2019. С. 303 Доступно на: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019.a>

На наш взгляд, эволюция изменения энергоемкостей в разных странах подчиняется определенной логике. Начальные этапы развития экономики и общества во многом сопряжены с индустриализацией: здесь преобладают факторы насыщения спроса на фоне повышения благосостояния и урбанизации населения, а также вовлечения в производство и использование более совершенных технологий и оборудования, которые более энергоемки по сравнению с доиндустриальными средствами производства и предметами быта. Постепенно указанные процессы замедляются, экономика переходит в постиндустриальную стадию, где повышается роль неэнергоемких высокотехнологичных промышленных отраслей и сферы услуг, а также внедряются наиболее современные и эффективные машины, оборудование, техника; иногда – происходит перенос энергоемких производств в другие страны. На этой стадии рост энергоэффективности доминирует над драйверами спроса, поэтому удельное энергопотребление начинает снижаться.

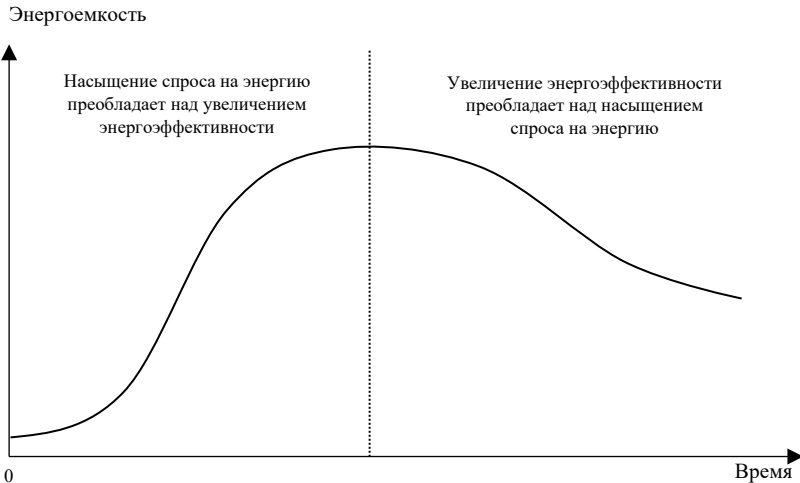


Рисунок 2. Типовая кривая эволюции энергоемкости

Источник: составлено авторами

На рис. 2 представлена типовая кривая эволюции энергоемкости, которая воспроизводится эмпирическим путем при анализе удельного потребления энергии в разных странах мира

на длинных временных периодах¹¹. В явном виде можно выделить стадии «слабого роста»; «сильного роста»; «слабого роста», переходящего в «плато» и «слабое падение»; «сильного падения», «слабого падения». Каждая из этих стадий длится по крайней мере 2 десятилетия. Очевидно, что на практике столь гладкая логика реализуется далеко не всегда – помимо эволюционных процессов в жизни важное значение имеют периодические переломные явления (например, экономические или геополитические кризисы, военные конфликты и т.д.). Однако сама логика чередования разных стадий, характеризующихся отличной динамикой энергоемкостей, выполняется.

Сегодня подавляющее большинство развитых стран находится на стадии снижения энергоемкости их экономик, однако и они проходили через стадии роста удельного энергопотребления. Например, в Испании наблюдалось увеличение энергоемкости на 10% и выбросов парниковых газов на 54% в период 1990–2006 гг. [17] из-за: (а) значительной роли продукции энергоемких отраслей и строительства в экономике; (б) крупных инвестиций в инфраструктуру, жилье и летние резиденции во время испанского жилищного бума [18]; низкой склонностью к внедрению энергоэффективных практик в жилом секторе из-за жаркого климата. Другой пример: рост энергоемкости в секторе услуг Австрии, Бельгии, Финляндии, Японии, Южной Кореи, Нидерландах, Испании, Великобритании в период 1990–2000 гг. [19].

Расчет «полезного» энергопотребления в промышленности и бытовом секторе стран. В этой статье анализируется ретроспективная динамика удельного конечного энергопотребления в промышленности и бытовом секторе с целью определения места разных стран на кривой эволюции энергоемкости. Анализ выполняется не для номинального, а для «полезного» энергопотребления, учитывающего разную эффективность конечного потребления ископаемых топлив и преобразованных энергоносителей (электроэнергии и тепла). Этот показатель демонстрирует только ту часть энергии, которая пошла на совершение полезной работы. Система используемых тождеств для каждой страны:

¹¹ *The Economist. Power slide. 2011. Доступно на: <https://www.economist.com/graphic-detail/2011/01/19/power-slide>.*

$$ПЭ^П = (\mathcal{E}_T^П + \mathcal{E}_Ж^П + \mathcal{E}_Г^П) * 35\% + (\mathcal{E}_{ЭЭ}^П + \mathcal{E}_{ТЭ}^П) * 90\% \quad (1)$$

$$уПЭ^П = ПЭ^П / ДС^П \quad (2)$$

$$ПЭ^Н = (\mathcal{E}_T^Н + \mathcal{E}_Ж^Н + \mathcal{E}_Г^Н) * 35\% + (\mathcal{E}_{ЭЭ}^Н + \mathcal{E}_{ТЭ}^Н) * 90\% \quad (3)$$

$$уПЭ^Н = ПЭ^Н / Н \quad (4)$$

где:

$ПЭ^П$, $ПЭ^Н$ – полезное потребление энергии в промышленно-сти и бытовом секторе соответственно;

$\mathcal{E}_T^П$, $\mathcal{E}_Ж^П$, $\mathcal{E}_Г^П$, $\mathcal{E}_{ЭЭ}^П$, $\mathcal{E}_{ТЭ}^П$, $\mathcal{E}_T^Н$, $\mathcal{E}_Ж^Н$, $\mathcal{E}_Г^Н$, $\mathcal{E}_{ЭЭ}^Н$, $\mathcal{E}_{ТЭ}^Н$ – номинальное конечное потребление твердых, жидких, газообразных топлив, электроэнергии, тепловой энергии в промышленности и бытовом секторе соответственно. Источник данных: энергетические балансы Международного энергетического агентства¹²;

$ДС^П$ – добавленная стоимость промышленности¹³;

$Н$ – численность населения¹⁴.

Коэффициенты 35% и 90% в уравнениях (1) и (3) представляют собой усредненные значения показателей эффективности потребления топливно-энергетических ресурсов на основе ископаемых топлив (твердых, жидких, газообразных) и преобразованных энергоносителей (электроэнергии и тепла) – гипотезы об этих значениях выбраны на основе анализа ряда публикаций. Очевидно, что коэффициенты эффективности зависят от уровня используемых технологий, структуры производства, а потому сильно различаются между странами и отраслями. Но в рамках анализа для всех стран применяются одинаковые значения коэффициентов.

Так, средняя эффективность¹⁵ типовых решений сжигания твердых топлив варьируется в диапазоне 27–42%; газообразных – 30–50% [20]; жидких топлив на транспорте – 20–40%

¹² IEA. *World Energy Balances*. 2021. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>.

¹³ World Bank Open Data. URL: <https://data.worldbank.org/>. Для анализа использован показатель: Industry (including construction), value added (constant 2015 US\$).

¹⁴ UN. *World Population Prospects 2022*. URL: <https://population.un.org/wpp/>.

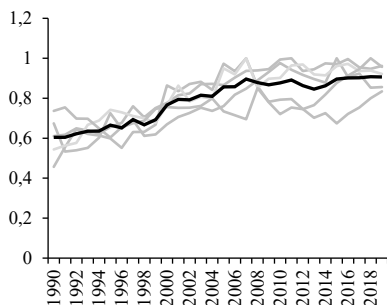
¹⁵ IEA. *Energy Technology Perspectives 2012*. Доступно на: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2012>; IEA. *Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels*. 2008. Доступно на: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/acaecb98-4430-4395-a4fa-d1a4d5ceb3d3/EnergyEfficiencyIndicatorsforPublicElectricityProductionfromFossilFuels.pdf>.

[21–23]. Электро- и теплоснабжение конечных потребителей происходит с коэффициентами эффективности 80–95% (в зависимости от централизованного или децентрализованного характера энергоснабжения, установленного оборудования, состояния коммуникаций и изоляции зданий) [24–26]. Учитывая перечисленные диапазоны, были выбраны промежуточные значения 35% и 90%.

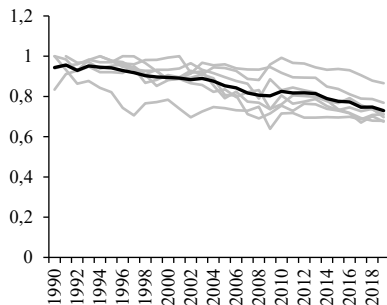
Группировка стран по характеру энергоемкости промышленности и бытового сектора. На рис. 3 и 4 представлены результаты расчетов по описанному методу. Все ряды отнормированы таким образом, что максимальное значение принимается равным 1. Визуализация дана не для всех проанализированных стран, но для наиболее типовых, которые наилучшим образом отражают различия разных стадий эволюции энергопотребления. Можно видеть, что выделяются несколько групп стран – слабо и сильно растущие, плато, слабо и сильно падающие – для каждой из которых характерна своя динамика удельного энергопотребления за прошедшие 30 лет.

В промышленном секторе группа падающей энергоемкости состоит целиком из стран ОЭСР, а также Китая и Турции. Для них характерна постиндустриальная логика развития, поэтому в перспективе можно ожидать сохранение понижательной тенденции. Достаточно большая номенклатура стран демонстрирует растущую энергоемкость. Группа сильно растущей энергоемкости состоит преимущественно из стран Ближнего Востока и Африки – в перспективе ближайших десятилетий в них, вероятно, замедлится рост энергоемкости промышленности, а затем он перейдет в стадию плато. Группа слабо растущей энергоемкости состоит преимущественно из стран Центральной и Южной Америки, а также Южной Азии, Африки, Ближнего Востока – для подавляющей части этих стран в будущем настанет стадия плато, хотя переход к сильному росту энергоемкости возможен для отдельных представителей. Группа относительно постоянной энергоемкости (плато) состоит из отдельных развитых и развивающихся стран, которые насыщают свой промышленный потенциал и постепенно будут переходить в стадию доминирования фактора энергоэффективности, в результате чего их энергоемкость будет снижаться.

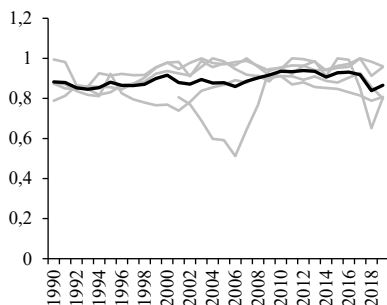
Слабо растущие: Гватемала, Бангладеш, Бруней, Ботсвана, Чили, Сальвадор, Нигерия, Парагвай, Сирия, Уругвай



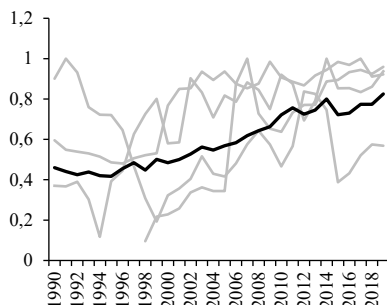
Слабо падающие: Австрия, Бельгия, Финляндия, Франция, Германия, Япония и Норвегия



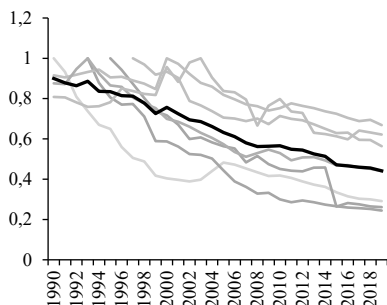
Плато: Бразилия, Мексика, ОАЭ, Италия, Коста-Рика



Сильно растущие: Йемен, Саудовская Аравия, Иран, Оман, Нигер, Грузия, Ливия



Сильно падающие: Китай, США, Турция, Ирландия, Чехия, Южная Корея, Швеция



СНГ: Россия, Азербайджан, Армения, Таджикистан, Узбекистан, Украина

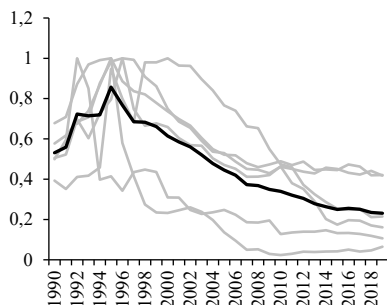
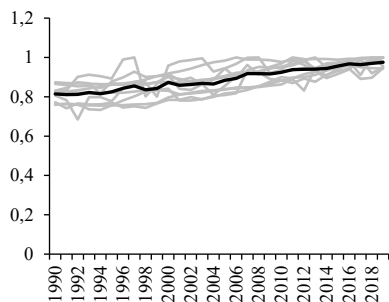
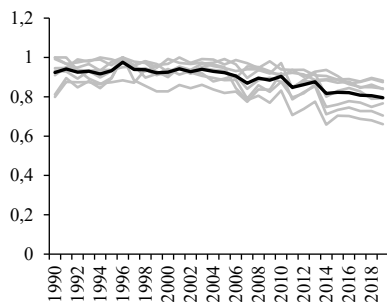


Рисунок 3. Динамика удельного «полезного» энергопотребления в промышленности для разных групп стран (нормировано на 1 по максимальному значению для каждой страны; жирная линия – среднее значение по группе стран)

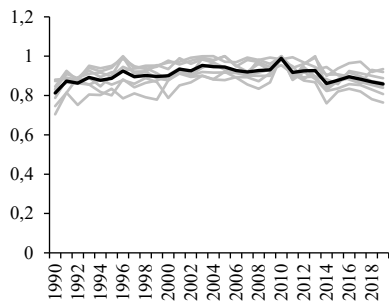
Слабо растущие: Бразилия, Гаити, Доминиканская Республика, Исландия, Индия, Непал, Пакистан, Сербия, Турция, Зимбабве



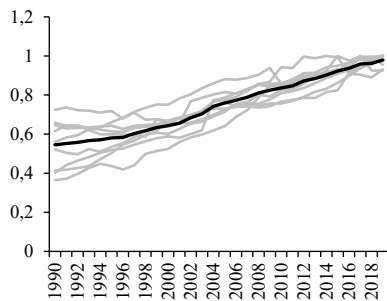
Слабо падающие: Бельгия, Канада, Германия, Мексика, Нидерланды, Новая Зеландия, Перу, Швейцария



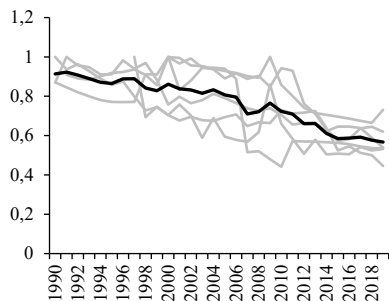
Плато: Австралия, Австрия, Дания, Финляндия, Франция, Словения, Швеция, США



Сильно растущие: Бангладеш, Китай, Малайзия, Мавритания, Марокко, Оман, Таиланд, Гватемала, Тунис



Сильно падающие: Ливан, Люксембург, Мозамбик, Намибия, Украина, Узбекистан



СНГ-минус: Беларусь, Армения, Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркменистан, Россия, Азербайджан

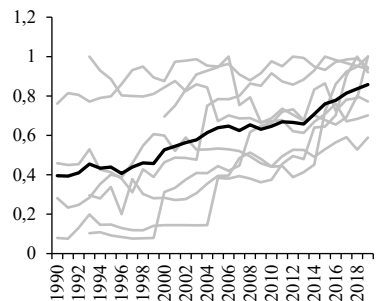


Рисунок 4. Динамика удельного «полезного» энергопотребления в бытовом секторе для разных групп стран (нормировано на 1 по максимальному значению для каждой страны; жирная линия – среднее значение по группе стран)

Своеобразной динамикой в 1990-е годы характеризуются страны СНГ. На фоне масштабного кризиса и остановки промышленных предприятий резко сократился выпуск продукции и увеличилась роль условно-постоянного энергопотребления, в результате чего энергоемкость промышленности существенно выросла [27]. Одновременно происходило снижение роли наиболее энергоемких и неэффективных производств [28], и в 2000-е годы настала стадия активного экономического роста на «облегченной» базе, характеризующаяся ростом промышленного производства и модернизацией производств, в результате чего энергоемкость динамично снижалась. Экономическая стагнация последнего десятилетия способствовала замедлению падения удельного энергопотребления. В инерционном сценарии развития стран СНГ стадия слабого падения энергоемкости, вероятно, сохранится. Однако если будет реализовываться активная экономическая политика структурно-технологической модернизации, это потребует некоторого «утяжеления» структуры производства и, соответственно, может вести к росту энергоемкости промышленности в течение среднесрочного периода.

Если в промышленности рост энергоемкости наблюдается в 20% всех стран, то в бытовом секторе это доминирующий процесс – среднедушевое энергопотребление увеличивается в 50% стран. Практически весь развивающийся мир до сих пор находится на стадии насыщения спроса на энергию. Это же верно и практически для всех стран СНГ. Исключением здесь являются Украина и Узбекистан, которые по своей динамике попадают в группу стран с сильно падающим удельным энергопотреблением вместе с Ливаном, Намибией, Мозамбиком, Люксембургом. Однако это сложно объяснить совершенствованием параметров энергетической эффективности – скорее речь идет о проблемах экономического характера в перечисленных странах, в результате чего население вынуждено экономить и снижать качество своей жизни. В перспективе следует ожидать продолжения роста среднедушевого потребления полезной энергии или выхода на плато в развивающихся странах; его снижение в ближайшие несколько десятилетий может происходить только при отклонении от эволюционной логики развития.

Таким образом, в группе стран с сильно падающим среднедушевым энергопотреблением остается только Люксембург. Примерно четверть всех стран попадает в группу «плато» и всего около 15% – в группу падающего энергопотребления: за редким исключением это представители ОЭСР. При этом явное уменьшение показателей удельного потребления началось в этих странах лишь после 2010 г., то есть по меркам инерционного топливно-энергетического сектора совсем недавно. Другими словами, снижение среднедушевого энергопотребления – относительно новый феномен, зародившийся в только двух десятках стран.

В таблице 1 представлен полный список стран, включая не попавшие на рисунки 3–4, для которых в ретроспективном периоде характерен рост удельного полезного потребления энергии, а поэтому в перспективе нескольких десятилетий оно не должно снижаться в отсутствие событий «революционного» характера.

Таблица 1. Страны с растущим удельным полезным потреблением энергии в промышленности и бытовом секторе в ретроспективном периоде (1990–2018 гг.)

Промышленность	Бытовой сектор
Алжир, Бангладеш, Бенин, Ботсвана, Бруней, Габон, Гаити, Гватемала, Грузия, Иран, Йемен, Камбоджа, Ливан, Непал, Нигер, Нигерия, Оман, Парагвай, Республика Конго, Сальвадор, Саудовская Аравия, Сирия, Сингапур, Уругвай, Чили, Южный Судан	Албания, Алжир, Аргентина, Армения, Бангладеш, Бахрейн, Беларусь, Боливия, Босния и Герцеговина, Бразилия, Венесуэла, Вьетнам, Гаити, Гайана, Гватемала, Гондурас, Грузия, КНДР, Доминиканская Республика, Египет, Зимбабве, Израиль, Индия, Иордания, Ирак, Иран, Исландия, Йемен, Казахстан, Камбоджа, Катар, Китай, Колумбия, Южная Корея, Косово, Куба, Кыргызстан, Лаос, Ливия, Маврикий, Малайзия, Марокко, Молдова, Монголия, Непал, Оман, Пакистан, Панама, Парагвай, Республика Конго, Россия, Сальвадор, Саудовская Аравия, Сербия, Сирия, Суринам, Таджикистан, Таиланд, Того, Тринидад и Тобаго, Тунис, Туркменистан, Турция, Уругвай, Филиппины, Черногория, Чили, Эквадор, Экваториальная Гвинея

Заключение. Полученные результаты целесообразно использовать при построении сценариев развития мировой энергетики с использованием подхода «снизу–вверх», когда сначала определяется спрос на топливно-энергетические ресурсы в секторах конечного потребления на основе гипотез о демографическом, социально-экономическом, технологическом развитии и энергоемкостях разных сфер, а затем рассчитывается общий спрос на первичную энергию с учетом сектора преобразования энергии. Промышленность и бытовой сектор представляют собой конечных потребителей, поэтому сценарии развития для них должны подбираться таким образом, чтобы удельное полезное потребление энергии не снижалось в странах из таблицы 1 в последующие минимум 20 лет. Номинальная энергоемкость может снижаться при динамичном смещении структуры потребления, например, от угля, газа, нефтепродуктов в пользу электроэнергии с двух- или трехкратным ростом эффективности использования. Однако общая энергоемкость системы (с учетом полных технологических цепочек) все равно слабо изменится, так как электроэнергия должна быть произведена на электростанциях (в секторе преобразования) с использованием процессов, характеризующихся типовыми КПД в диапазоне 30–55%.

Мы считаем, что следствием применения предлагаемого подхода станет увеличение прогнозных значений мирового потребления энергии по сравнению с теми показателями, которые фигурируют в большинстве сценариев, выполненных ведущими экспертными организациями. Такой эффект возникнет из-за неприменения дискуссионной гипотезы повсеместного снижения энергоемкостей для значительного числа развивающихся стран.

Список литературы

1. *Loulou R., Remne U., Kanudia A., Lehtila A., Goldstein G. Documentation for the TIMES Model – PART I 1–78. 2005. Доступно на: <https://iea-etsap.org/docs/TIMESDoc-Intro.pdf>.*
2. *Capros P., Van Regemorter D., Paroussos L., Karkatsoulis P., Fragkiadakis C., Tsani S., Charalampidis I., Revesz T. GEM-E3 Model Documentation. JRC Working Papers JRC83177, Joint Research Centre. 2013. DOI:10.2788/47872.*
3. *Филитов С.П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 4. С. 41-55.*

4. Rahman M.M., Khan Z., Khan S., Tariq M. How is energy intensity affected by industrialisation, trade openness and financial development? A dynamic analysis for the panel of newly industrialized countries. *Energy Strategy Reviews*, Volume 49, 2023, 101182, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101182>.
5. Chen B., Yan J., Zhu X., Liu Y. The potential role of renewable power penetration in energy intensity reduction: Evidence from the Chinese provincial electricity sector. *Energy Economics*, Volume 127, Part B, 2023, 107060, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107060>.
6. Liu F., Zhang X., Adebayo T.S., Awosusi A.A. Asymmetric and moderating role of industrialisation and technological innovation on energy intensity: Evidence from BRICS economies. *Renewable Energy*, Volume 198, 2022, Pages 1364-1372, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.099>.
7. Lee C.-C., Ho S.-J. Impacts of export diversification on energy intensity, renewable energy, and waste energy in 121 countries: Do environmental regulations matter? *Renewable Energy*, Volume 199, 2022, Pages 1510-1522, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.079>.
8. Yang X., Xu H., Su B. Factor decomposition for global and national aggregate energy intensity change during 2000–2014. *Energy*, Volume 254, Part B, 2022, 124347, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124347>.
9. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Факторный анализ эволюции российской энергоэффективности: методология и результаты // *Вопросы экономики*. 2012. № 10. С. 117-131. DOI 10.32609/0042-8736-2012-10-117-131.
10. Gorus M.S., Karagol E.T. Reactions of energy intensity, energy efficiency, and activity indexes to income and energy price changes: The panel data evidence from OECD countries. *Energy*, Volume 254, Part A, 2022, 124281, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124281>.
11. Sun X., Jia M., Xu Z., Liu Z., Liu X., Liu Q. An investigation of the determinants of energy intensity in emerging market countries. *Energy Strategy Reviews*, Volume 39, 2022, 100790, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100790>.
12. Башмаков И.А. Опыт оценки параметров ценовой эластичности спроса на энергию. Доступно на: <http://www.cenef.ru/file/Bpaper100.pdf>.
13. Feng Y., Zhang J., Geng Y., Jin S., Zhu Z., Liang Z. Explaining and modeling the reduction effect of low-carbon energy transition on energy intensity: Empirical evidence from global data. *Energy*, Volume 281, 2023, 128276, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128276>.
14. Затраты и выгоды низкоуглеродной экономики и трансформации общества в России. Перспективы до и после 2050 г. – Под редакцией И.А. Башмакова. – Москва. – 2014. – 178 с.
15. Bithas K., Kalimeris P. Re-estimating the decoupling effect: Is there an actual transition towards a less energy-intensive economy? *Energy*, Volume 51, 2013, Pages 78-84, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.033>.
16. Li T., Li X., Liao G. Business cycles and energy intensity. Evidence from emerging economies. *Borsa Istanbul Review*, Volume 22, Issue 3, 2022, Pages 560-570, <https://doi.org/10.1016/j.bir.2021.07.005>.
17. Mendiluce M., Pérez-Arriaga I., Ocaña, C. Comparison of the evolution of energy intensity in Spain and in the EU15. Why is Spain different? // *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. Issue 1. Pp. 639-645. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.069>.
18. Alcántara V., Duro J.A. Inequality of energy intensities across OECD countries: a note // *Energy Policy*. 2004. Vol. 32. Issue 11. Pp. 1257-1260. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00095-8).
19. Mulder P., De Groot H.L., Pfeiffer B. (2014). Dynamics and determinants of energy intensity in the service sector: A cross-country analysis, 1980–2005 // *Ecological Economics*. 2014. Vol. 100. Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.01.016>.
20. Болдырев К. Состояние российской тепловой электроэнергетики и существующие российские технологии генерации на пороге новой программы модернизации электроэнергетического комплекса России // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление*. 2019. № 4. С. 35-38.
21. Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines // *Transportation Engineering*. 2020. Vol. 1: 100005. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>.
22. Kargul J., Stuhldreher M., Barba D., Schenk C. et al. Benchmarking a 2018 Toyota Camry 2.5-Liter Atkinson Cycle Engine with Cooled-EGR // *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*. 2019. Vol. 1. Issue 2. Pp. 601-638. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0249>.

23. Лисин В.А., Иванов И.Д., Раскошный Д.Ю. Исследования методов повышения КПД бензиновых ДВС // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, Омск, 22–23 апреля 2021 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 190-194. – EDN SSHDSG. Доступно на: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46355541>.
24. Shah S., Adhyaru D.M. Boiler efficiency analysis using direct method // 2011 Nirma University International Conference on Engineering, Ahmedabad, India. 2011. Pp. 1-5. doi: 10.1109/NUiConE.2011.6153313.
25. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. Issue 5. Pp. 1040-1050. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009.
26. Maivel M., Kurnitski J. Low temperature radiator heating distribution and emission efficiency in residential buildings // Energy and Buildings. 2014. Vol. 69. Pp. 224–236. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.10.030.
27. Филитов С.П., Мохина Е.В., Макарова Е.М., Григорьева Н.А., Магалимов И.В. Энергоэффективность российской экономики: современное состояние и перспективы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 4.С. 56-65.
28. Потенциальные возможности роста Российской экономики: анализ и прогноз: Научный доклад ИНИП РАН / под ред. чл.-корр. РАН А. А. Широва. М.: Арктик принт, 2022. – 296 с. DOI: 10.47711/sr2-2022.

Для цитирования: Колпаков А.Ю., Тюрин А.А. Эволюция удельного энергопотребления в промышленности и бытовом секторе разных стран // Научные труды. Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. № 2. С. 100-115.
DOI: 10.47711/2076-3182-2023-2-100-115.

Summary

EVOLUTION OF ENERGY INTENSITY IN INDUSTRY AND RESIDENTIAL SECTOR IN DIFFERENT COUNTRIES

KOLPAKOV Andrey Yu., ankolp@gmail.com, PhD in Economics, Head of the Laboratory, Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Scopus Author ID: 55039903300; <https://orcid.org/0000-0003-4812-4582>

TYURIN Artem A., tyurin.aa@phystech.edu, assistant, Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences, Moscow, <https://orcid.org/0000-0003-0362-8904>

Abstract. The article substantiates the evolution of specific energy consumption in different countries as an alternation of two stages: predominance of demand saturation and energy efficiency. For all countries, the specific consumption of "useful" energy in industry and residential sector is calculated, considering the different efficiency of the final use of fossil fuels, electricity, and heat. Groups of countries are identified that differ in growing, stable, or declining dynamics of energy intensity

over the past 30 years. Countries have been identified for which the specific useful energy consumption in industry and residential sector should not decrease in the next few decades while maintaining the evolutionary logic of development.

Keywords: energy efficiency, energy, energy intensity, consumption, industry, residential sector

For citation: *Kolpakov A.Yu., Tyurin A.A.* Evolution of Energy Intensity in Industry and Residential Sector in Different Countries // Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. 2023. No. 2. Pp. 100-115.

DOI: 10.47711/2076-3182-2023-2-100-115