



Munich Personal RePEc Archive

Adequacy of a closed model for Russian economy in the problem of comparative analysis of Russia's Energy Strategy

Bazhanov, Andrei and Belyaev, Alexander

Far Eastern National University

7 May 2009

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/15109/>

MPRA Paper No. 15109, posted 09 May 2009 15:25 UTC

Адекватность закрытой модели для российской
экономики в задаче сравнительного анализа
Энергетической стратегии России

Бажанов А. В., Беляев А. А.

Дальневосточный государственный университет



Владивосток
2009

Содержание

1. Введение	2
2. Постановка задачи	4
2.1. Закрытая экономика:	
Модель Дасгупты-Хила-Солоу-Стиглица (ДХСС)	4
2.2. Результаты анализа ЭС-2020 для закрытой экономики	8
2.2.1. Начальные данные	8
2.2.2. Динамика российской экономики для ЭС-2020	9
2.2.3. Сравнительный анализ ЭС-2020 в закрытом случае	14
2.3. Открытая экономика:	
Модель Дасгупты-Иствуда-Хила (ДИХ)	17
2.3.1. Модель ДИХ	17
2.3.2. Переменная прибыль от заграничных активов	22
2.3.3. Выводы	23
3. Использование модели ДИХ для анализа ЭС-2020	24
3.1. Модифицированная модель ДИХ	24
3.1.1. Специфика открытой модели для российской экономики	24
3.1.2. Основные уравнения модифицированной модели	27
3.2. Результаты анализа ЭС-2020 для открытой экономики	28
3.2.1. Исходные данные и российский экспорт нефти	28
3.2.2. Мировой экспорт нефти	28
3.2.3. Цена нефти на мировом рынке	29
3.2.4. Процентная ставка на активы за границей	30
4. Анализ результатов	39
5. Заключение	46
6. Список литературы	47
7. Приложения	51
7.1. Вывод коэффициентов рациональной переходной кривой	51

1. Введение

В 2003 году Правительством Российской Федерации (распоряжение №1234-р от 28.08.03) была утверждена Энергетическая стратегия России (ЭС-2020, [10]), определившая развитие важнейшей составляющей экономики страны на период до 2020 года. ЭС-2020, в принципе, рассматривает все возможные источники развития российской энергетики, однако, как справедливо отмечают критики, Стратегия предполагает достичь увеличения энергетического потенциала в основном за счет экстенсивного роста традиционных отраслей. Так, например, в [2] указывается на неиспользуемые резервы по сокращению энергозатрат путем введения известных в мировой практике ресурсосберегающих технологий. В [1] критикуется увеличивающаяся зависимость российской экономики от невозобновляемых ресурсов, заложенная в ЭС-2020, в то время как ведущие экономики мира уверенно поворачивают в сторону развития экологически чистых и экономически устойчивых источников энергии. Очевидный крен российской энергетики в сторону неустойчивого долгосрочного развития объясняется критиками влиянием “углеводородного” лобби, заботящегося больше о сиюминутных корпоративных прибылях, чем об устойчивом развитии экономики в целом.

В 2007 году Институтом энергетической стратегии был опубликован проект Концепции Энергетической стратегии России на период до 2030 года (ЭС-2030, [3]), в котором признается, что в России “тормозится развитие неуглеводородной энергетики и применения энергосберегающих технологий. При сохранении подобной ситуации в будущем Россия рискует оказаться на обочине мировой энергетики и существенно снизить возможности для перспективного развития своей экономики” [3, с. 31]. Тем не менее, в проекте ЭС-2030 по-прежнему предполагается развитие, в основном, традиционных, углеводородных источников энергии и “поддержание устойчивого развития экономики страны за счет экспорта топливно-энергетических ресурсов” [3, с. 32].

В работах [11], [20] последствия ЭС-2020 анализировались с использованием агрегированной модели Дасгупты-Хила-Солоу-Стиглица (ДХСС [45], [47], [24]), которая считается уже классической в ресурсной экономике. В этих работах в качестве примера невозобновляемого ресурса рассматривалась нефть и оптимистично предполагалось, что Россия, во-первых, будет следовать правилу Хартвика, согласно которому ресурсная рента должна инвестироваться в капитал, включающий в себя технологии, позволяющие поддерживать структуру и объем выпуска при уменьшающейся добыче невозобновляемого ресурса; и, во-вторых, после 2020 года произойдет переход к экономически устойчивым, снижающимся темпам добычи нефти, обеспечивающим, по крайней мере, постоянное потребление на душу населения в долгосрочном

периоде.

Последствия этого комбинированного сценария сравнивались с гипотетическим сценарием, предполагающим устойчивые (в смысле неубывающего в долгосрочном периоде потребления) темпы добычи нефти начиная с 2008 года. Сравнение траекторий агрегированного потребления на душу населения показало для различных параметров модели, что ЭС-2020 дает лишь кратковременное превышение уровня потребления над “устойчивым” сценарием за счет более интенсивной, неэффективной с точки зрения долгосрочного развития, эксплуатации запасов невозобновляемого ресурса. После 2020 года потребление вдоль продолжения сценария ЭС-2020 падает существенно ниже “устойчивого” уровня, и эта разница в уровнях потребления сохраняется для всех будущих поколений. Таким образом, неэффективная, экстенсивная ресурсная политика, ведомая краткосрочными критериями, действительно дает временное улучшение экономических показателей, однако, даже при оптимистичных предположениях, в силу конечности ресурса, за это временное улучшение расплачиваются в недалеком будущем уже ныне живущие поколения и, кроме того, все последующие поколения.

Модель ДХСС является моделью закрытой экономики, что закономерно ставит вопрос о том, может ли экспортная политика существенно повлиять на приведенные выше результаты сравнительного анализа. Целью данной работы является исследование качественных эффектов торговли ресурсом для рассмотренных выше сценариев с использованием более общей модели, включающей в себя мировой рынок нефти, определяющий цену ресурса, и экспорт капитала с “внешней” процентной ставкой, отличной от “внутренней”. В качестве основы используется известная модель открытой экономики Дасгупты-Иствуда-Хила (ДИХ [23]), модифицированная согласно постановке задачи и особенностям положения России на мировом рынке нефти.

2. Постановка задачи

2.1. Закрытая экономика:

Модель Дасгупты-Хила-Солоу-Стиглица (ДХСС)

В работе предполагается, что ресурсодобывающая экономика должна удовлетворять минимальным требованиям устойчивого развития. Базовое определение устойчивого развития было предложено в 1987 году в докладе Мировой комиссии по окружающей среде и развитию Г. Х. Брундтланд “Наше общее будущее”: “устойчивое развитие - это развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего поколения, не подрывая способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности” [4].

Цель работы подразумевает, что мы можем рассматривать только слабую форму устойчивого развития, предполагающую, что природный ресурс, в принципе (возможно, в отдаленном будущем), может быть полностью и адекватно заменен капиталом. В данном случае предполагается, что невозобновляемый ресурс (нефть) может быть, в принципе, заменен технологиями, использующими возобновляемые ресурсы (ветер, солнце, геотермальные источники, биотопливо и т.д.). Сильная форма устойчивого развития пока в принципе не совместима с Энергетической стратегией России, существенно опирающейся на использование углеводородного топлива и атомной энергии. Подробное исследование разных форм устойчивости можно найти, например, в [39].

Программа-минимум слабой формы устойчивого развития заключается в построении такой траектории исчерпания ресурса, которая обеспечивает, по крайней мере, постоянное потребление на душу населения в долгосрочном периоде, подразумевая под долгосрочным периодом бесконечный промежуток времени. Роберт Солоу, один из авторов модели ДХСС, исследовал этот “минимальный” вариант равноправия поколений в [45].

В модели ДХСС используется производственная функция Кобба-Дугласа, которая в данном случае имеет вид

$$Q(t) = F(K(t), R(t), N) = A K^\alpha(t) R^\beta(t) N^{1-\alpha-\beta},^1$$

где $Q(t)$ – совокупный выпуск продукции, A – масштабирующий множитель общей производительности, $K(t)$ – агрегированный капитал, $R(t)$ – темп добычи нефти, N – численность

¹ Мы полагаем, что технический прогресс выражается в том, что рост общей производительности факторов полностью компенсирует обесценивание капитала, то есть

$$Q(t) = T(t)F(K, R, N) - \delta K(t) = F(K, R, N), \quad T(t) = 1 + \delta K^{1-\alpha}(t)R^{-\beta}(t)N^{\alpha+\beta-1}/A,$$

где δ – неизменный темп обесценивания капитала.

населения, равная рабочей силе, α и β – константы, такие, что $0 < \beta < \alpha < 1$, $\alpha + \beta < 1$. Разделив выражение почленно на N , получим²

$$q(t) = f(k(t), r(t)) = A k^\alpha(t) r^\beta(t), \quad (1)$$

где строчные буквы означают аналогичные величины на душу населения. Функция Кобба-Дугласа является эмпирической моделью. Она не выведена строго из содержательного агрегированного процесса производства ВВП из некоторого капитала, ресурса и труда. Однако, она достаточно проста и хорошо отражает качественные особенности производства.

Модель ДХСС была введена для изучения роли существенного³ невозобновляемого ресурса в экономическом развитии. Причины такой спецификации варьируются от правдоподобности качественного поведения: “Только о функции Кобба-Дугласа можно сказать, что она обладает всеми приемлимыми свойствами” [24, с. 14]; до теоретической привлекательности этой спецификации: “Если эластичность замещения между ресурсами и другими факторами превосходит единицу, то ресурсы неважны для производства. Если она меньше единицы, то средний выпуск за счет ресурсов ограничен. Так что остается лишь случай Кобба-Дугласа” [45, с. 34]; и до технической простоты: “В производственной функции Кобба-Дугласа нам не требуется делать различий между видами технического прогресса, которые усиливают труд, капитал и ресурс” [47, с. 131].⁴ Кроме того, данная спецификация интересна с точки зрения последующих численных исследований и обучения [24, с. 26]. Дасгупта и Хил [24, с. 26] отмечали, что такая узкая спецификация не препятствует дальнейшему обобщению результатов, однако, как сформулировал это Солоу [45, с. 34]: “Вряд ли стоит стремиться к дополнительной общности”.

Эмпирические данные показали, что эластичность замещения между природными ресурсами и капиталом в некоторых случаях превышает единицу (например, [42], [44]), в то время как другие исследования (например, [28], [38] и, отчасти, [32]) свидетельствовали, что энергия и капитал скорее комплементы, а не субституты (эластичность меньше единицы), и некоторые исследования обнаружили, что значение эластичности может быть очень близко к единице (например, [30], [44]). Подробнее этот вопрос рассматривается, например, в [40, раздел 4]. Это расхождение в эмпирических оценках поддерживает предположение о том, что использование функции Кобба-Дугласа не является неправдоподобным в исследовании некоторых вопросов ресурсной экономики.

² Это упрощение не влияет на качественные результаты, так как соотношение численности рабочей силы к населению осциллирует, обычно, вокруг константы.

³ Данный термин был предложен Дасгуптой и Хилом в [24, с.14].

⁴ Дасгупта и Хил [24, с. 17] использовали тот же аргумент: “Случай Кобба-Дугласа особенно интересен тем, что исследование можно относительно легко провести дальше”.

Однако точное количественное описание агрегированной экономики не является главным достоинством функции Кобба-Дугласа. Асайм [14, с. 316], выразил это следующим образом: “Я не утверждаю, что эта модель точно описывает... производственные возможности в реальном мире... тем не менее она хорошо подходит, чтобы проиллюстрировать, как малые изменения параметров... могут привести к совершенно разным последствиям в сочетании с критерием равноправия поколений”.

Согласно правилу Хартвика [33], постоянный во времени уровень потребления $c(t)$ достигается путем инвестирования доли валового продукта, равной эластичности невозобновляемого ресурса β , в технологии, не использующие нефть, при условии выполнения стандартного правила Хотеллинга: $\dot{f}_r/f_r = f_k$, где $f_r \equiv \partial f/\partial r = \beta k^\alpha r^{\beta-1} = \beta q/r$ и $f_k \equiv \partial f/\partial k = \alpha k^{\alpha-1} r^\beta = \alpha q/k$. Увеличение рынка таких товаров будет вытеснять “нефтяные” товары и реализовывать убывающую траекторию для темпов добычи нефти. Для производственной функции Кобба-Дугласа правило Хартвика можно записать в виде

$$\dot{k} \equiv dk/dt = \beta q. \quad (2)$$

Выпуск продукции связан с потреблением и инвестициями следующим уравнением баланса:

$$q = c + \dot{k}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что

$$c = (1 - \beta)q. \quad (4)$$

Стандартное правило Хотеллинга не согласуется с динамикой мировых данных по различным видам ресурсов (см., например, [29]). В данной модели предполагается, что в экономике присутствуют внешние эффекты, аддитивно модифицирующие правило Хотеллинга:

$$\dot{f}_r/f_r = f_k + \tau(t). \quad (5)$$

Такое обобщение позволяет использовать стандартную модель ДХСС для численных примеров основанных на данных реальной экономики.

Мы будем предполагать, что правительство способно влиять на внешние эффекты и задавать траекторию исчерпания ресурса, определяющую устойчивое развитие экономики. Рассмотрим кривую $r(t)$, вдоль которой потребление на душу населения стремится к некоторой неотрицательной константе в долгосрочном периоде. В [19]⁵ показано, что в классе рациональных переходных кривых вида

$$r(t) = r_0 \frac{1 + Bt}{(1 + Ct)^{d-1}},$$

⁵ Вывод формул приводится в 7.1.

где

$$B = C(d-1) + \frac{\dot{r}_0}{r_0},$$

$$C = \frac{1}{s_0} \left[\frac{r_0}{d-3} + \sqrt{\frac{r_0^2}{(d-3)^2} + \frac{\dot{r}_0 s_0}{(d-2)(d-3)}} \right],$$

такому условию удовлетворяет кривая с параметром $d = \alpha/\beta + 2$. Здесь s_0 и r_0 – запас ресурса и темп его добычи в момент t_0 , в который происходит переход на данный сценарий.

Таким образом, зная траекторию $r(t)$, можно определить $k(t)$, решив дифференциальное уравнение (2). Чтобы выразить начальное значение для капитала k_0 через известные начальные величины ВВП (q_0), прироста ВВП (\dot{q}_0/q_0), темпов добычи ресурса (r_0) и ускорения темпов добычи (\dot{r}_0), запишем уравнение (1) в виде

$$\frac{\dot{q}}{q} = \alpha \frac{\dot{k}}{k} + \beta \frac{\dot{r}}{r}, \quad (6)$$

подставим сюда выражение (2) и получим, что

$$k_0 = \frac{\alpha \beta q_0}{\dot{q}_0/q_0 - \beta \dot{r}_0/r_0}. \quad (7)$$

Теперь появилась возможность найти масштабный множитель общей производительности A из (1) :

$$A = q_0 k_0^{-\alpha} r_0^{-\beta}. \quad (8)$$

Строгое выполнение правила Хотеллинга является необходимым условием Парето-оптимального исчерпания ресурса в том смысле, что увеличение потребления будущего поколения невозможно в этом случае без уменьшения потребления настоящего и наоборот [25, с. 217]. Следовательно, по крайней мере, для асимптотического выполнения этого условия, модификатор $\tau(t)$ обязан стремиться к нулю. Простая формула для расчета $\tau(t)$ может быть выведена следующим образом. Подставим значения предельных производительностей $f_r = \beta q/r$ и $f_k = \alpha q/k$ в (5), и, используя (2), получим, что

$$\tau(t) = \frac{\dot{q}}{q} - \frac{\dot{r}}{r} - \alpha \frac{\dot{q}}{k} = (\beta - 1) \left(\frac{\dot{r}}{r} + \alpha \frac{\dot{q}}{k} \right) = \frac{(\beta - 1) \dot{q}}{\beta q}. \quad (9)$$

Итак, теперь однозначно определена последовательность нахождения траекторий: сначала задается аналитически $r(t)$, затем численно находится $k(t)$ из правила Хартвика (2), далее считается ВВП $q(t)$ с помощью (1), проверяем выполнение стандартного правила Хотеллинга, вычисляя траекторию $\tau(t)$ из (9) и, наконец, получаем потребление $c(t)$ из (4).

2.2. Результаты анализа ЭС-2020 для закрытой экономики

2.2.1. Начальные данные

Следуя Нордхаузу и Бойеру [41] положим $\alpha = 0.3$ и определим $\beta = 0.25$. Численность населения N равна 142 млн человек⁶, экономический рост составляет 6% в год ($\dot{q}_0/q_0 = 0.06$). За точку отсчета ($t_0 = 0$) примем 2008 год. Согласно [43], российские извлекаемые запасы нефти на начало 2008 года составляли 60 млрд баррелей или 8.219178 млрд т. Предположим оптимистично, что прирост запасов в течение бесконечного периода составит такую же величину.⁷ Тогда общий запас нефти (включая неразведанные запасы) составит 16.438356 млрд т., что можно записать в единицах на душу населения как $s_0 = 115.763$ тонн на человека, темпы добычи в начальный момент равны 486 млн т. в год или $r_0 = 3.42$ тонны на человека в год. Темпы добычи растут с ускорением примерно равным 0.02 тонны на человека в год за год. Совокупный валовой внутренний продукт в момент t_0 по данным Росстата равен 33 111.4 млрд рублей в рыночных ценах [7]. При среднем номинальном курсе доллара США к рублю в 2007 году, равном 25.57 [9], ВВП равен $y_0 = q_0 = 33\ 111.4$ [млрд руб.] / 25.57 [руб./доллар] / 142 [млн чел.] = 1294.93 [млрд долларов США] / 0.142 [млрд чел.] = 9119.23 долларов США на человека в год. В данной работе ВВП рассматривается по среднему обменному курсу, а не по паритету покупательной способности, поскольку исследуется эффект торговли ресурсом, и именно в этих единицах доходы от экспорта нефти входят в балансовое уравнение. Энергетическая стратегия России составлена до 2020 года, то есть момент окончания действия программы $t_{RES} = 12$.

⁶ Согласно прогнозам, используемым в ЭС-2020, население России будет незначительно убывать в ближайшее время, затем будет также незначительно расти. Поскольку эффект изменения населения предположительно в равной степени влияет на оба рассматриваемых сценария, мы будем предполагать население постоянным.

⁷ Согласно оценкам CERA [22] мировые запасы нефти в 3 раза больше, чем публикуемые в *Oil&Gas Journal* [43]. В данной работе мы рассматриваем “усредненный” вариант.

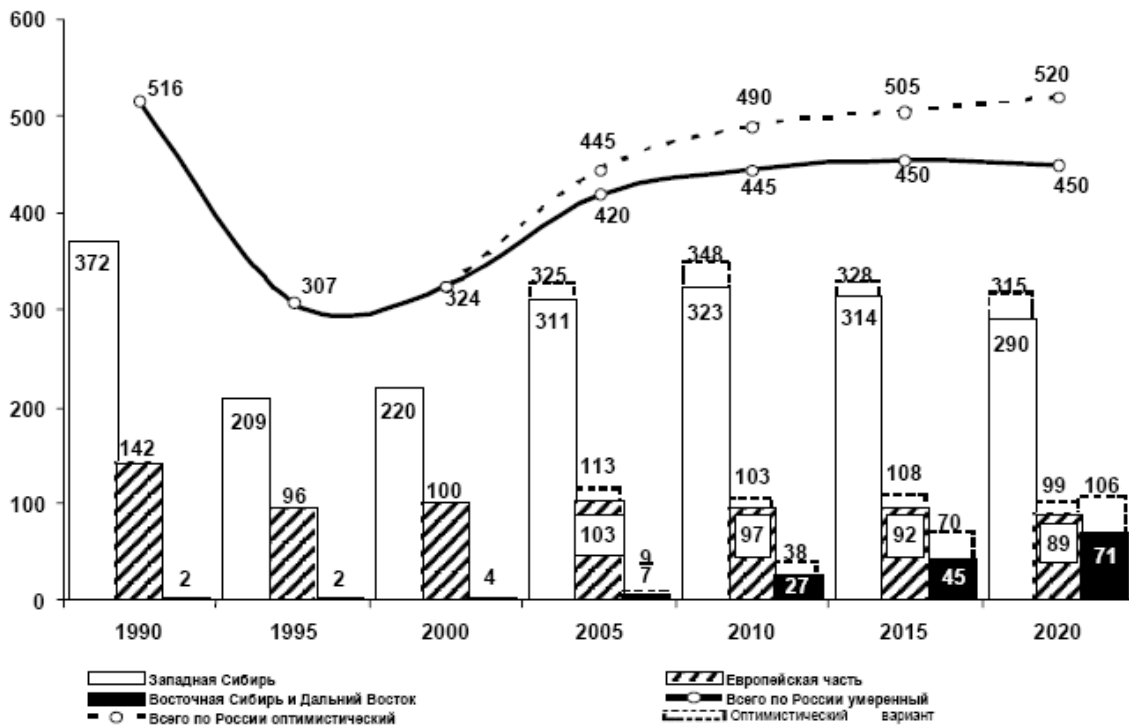


Рис. 1. ЭС-2020, план по добыче нефти, млн тонн

2.2.2. Закрытая агрегированная модель и динамика российской экономики для ЭС-2020 и предполагаемого устойчивого продолжения

Предположим, что темпы добычи нефти линейно растут при $t \in [0, t_{RES}]$, а далее идёт переход на экономически устойчивую траекторию добычи нефти. Тогда получим, что

$$r_{RES}(t) \approx \begin{cases} 3.42 + 0.02t, & t \in [0, t_{RES}], \\ \frac{3.66 + 4.06(t - t_{RES})}{(1 + 0.5(t - t_{RES}))^{2.2}}, & t \in [t_{RES}, +\infty]. \end{cases}$$

Заданные выше начальные данные однозначно определяют альтернативный сценарий, который предусматривает устойчивую добычу нефти с начального момента t_0 в виде следующей переходной кривой (Рис. 2, 3):

$$r_{SUST}(t) \approx \frac{3.42 + 2.26t}{(1 + 0.3t)^{2.2}}.$$

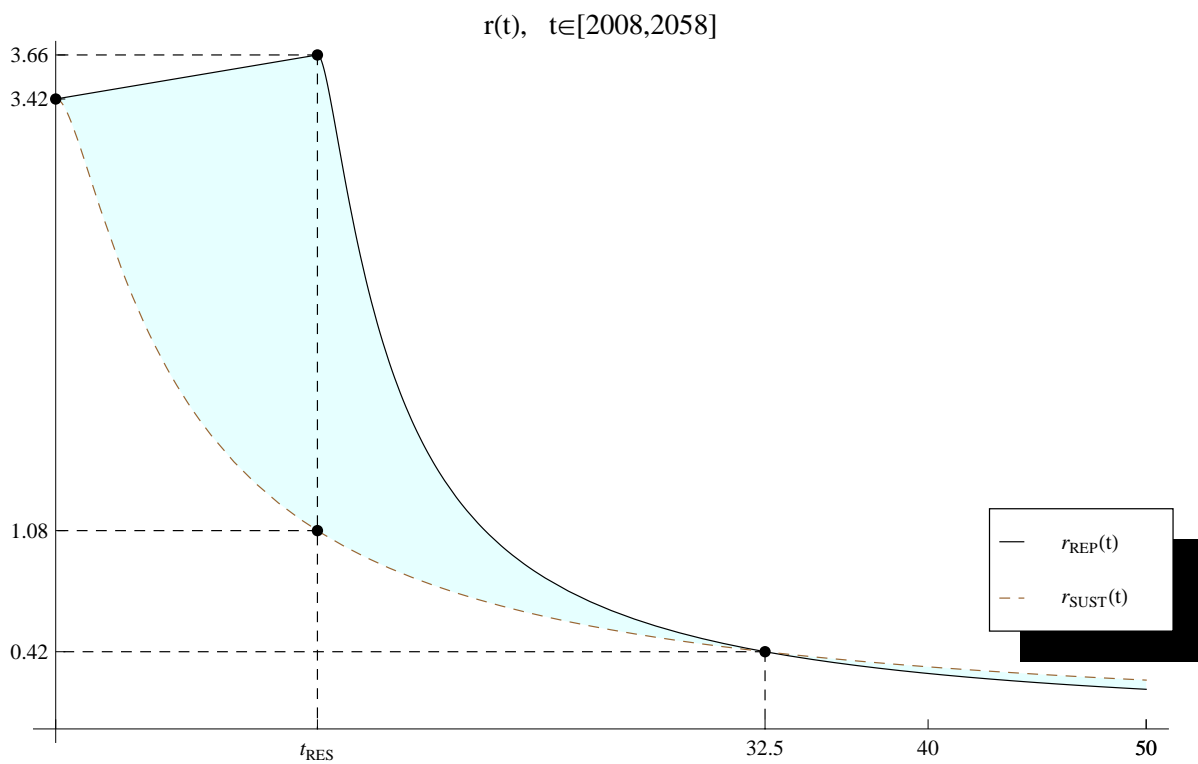


Рис. 2. Сценарии добычи нефти в краткосрочном периоде

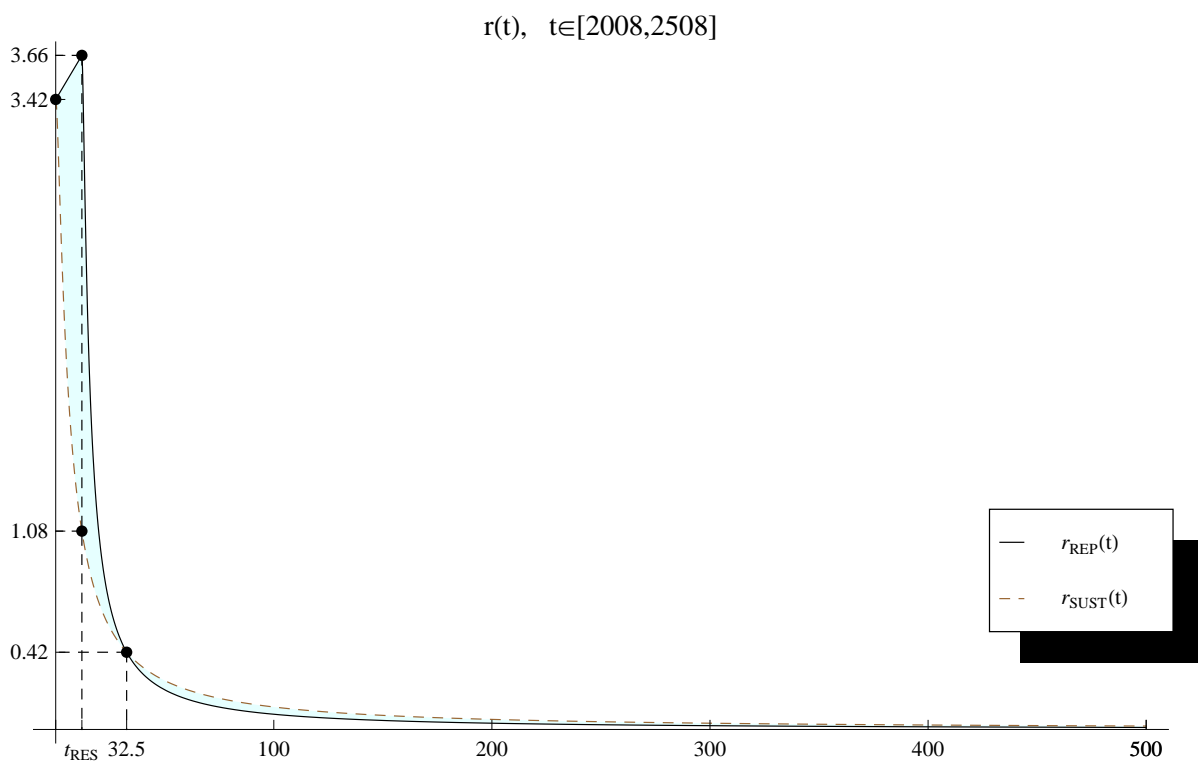


Рис. 3. Сценарии добычи нефти в долгосрочном периоде

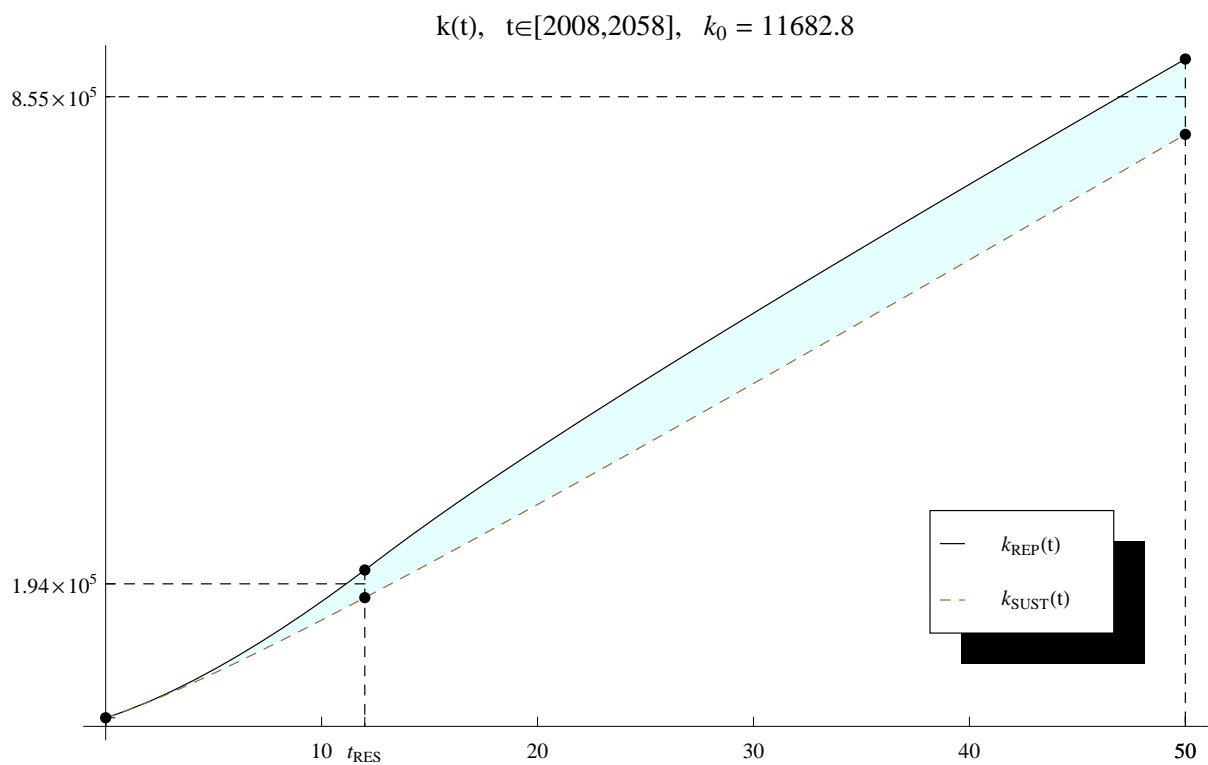


Рис. 4. Траектории совокупного капитала на душу населения в краткосрочном периоде

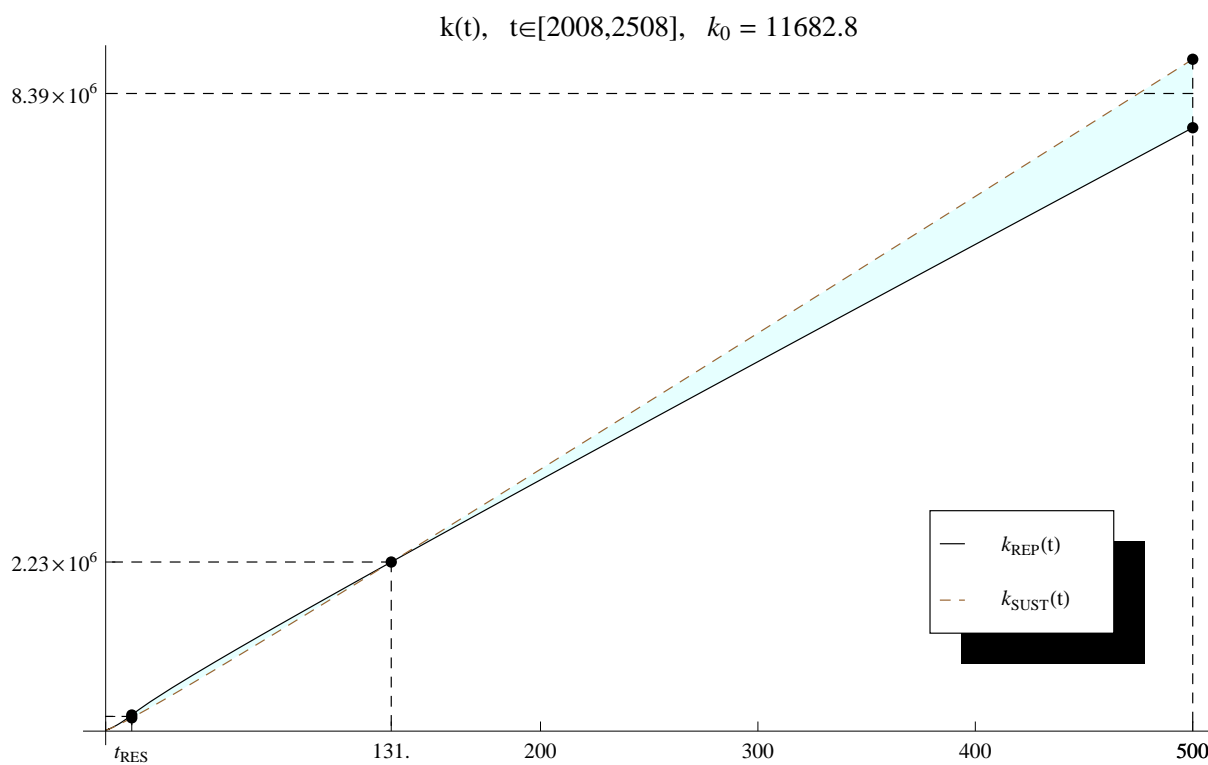


Рис. 5. Траектории совокупного капитала на душу населения в долгосрочном периоде

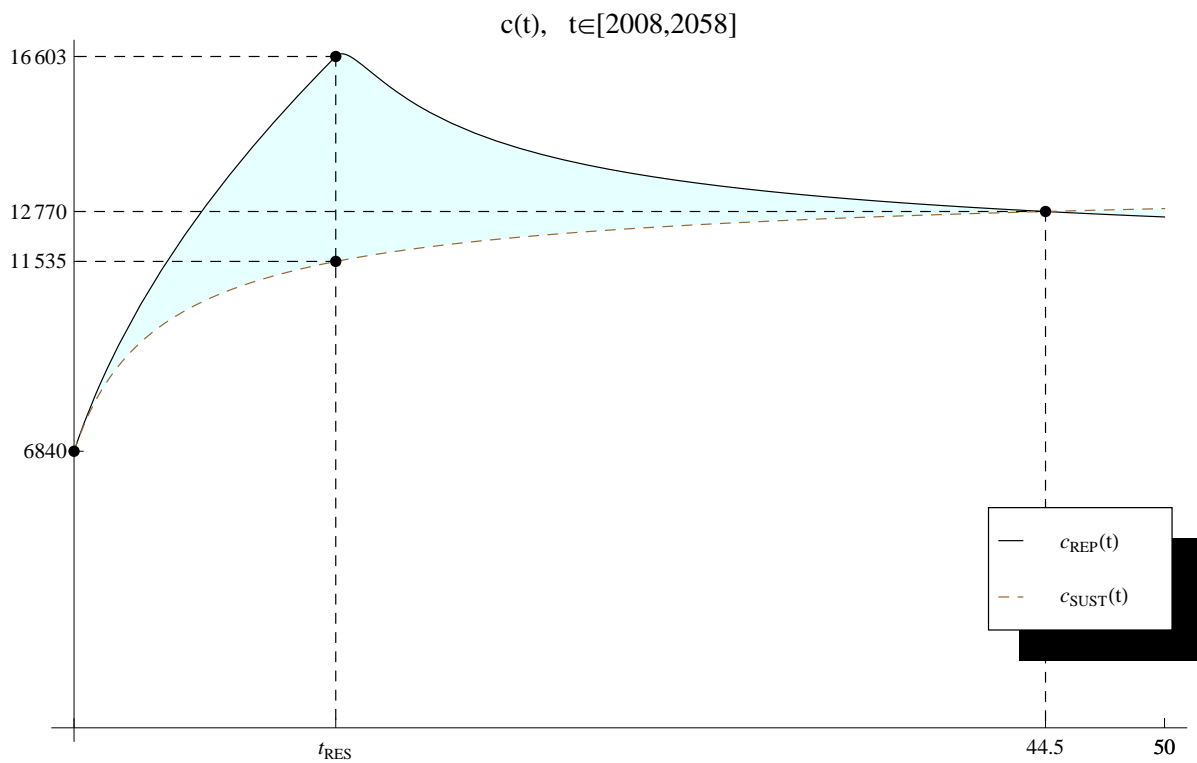


Рис. 8. Траектории потребления на душу населения в краткосрочном периоде

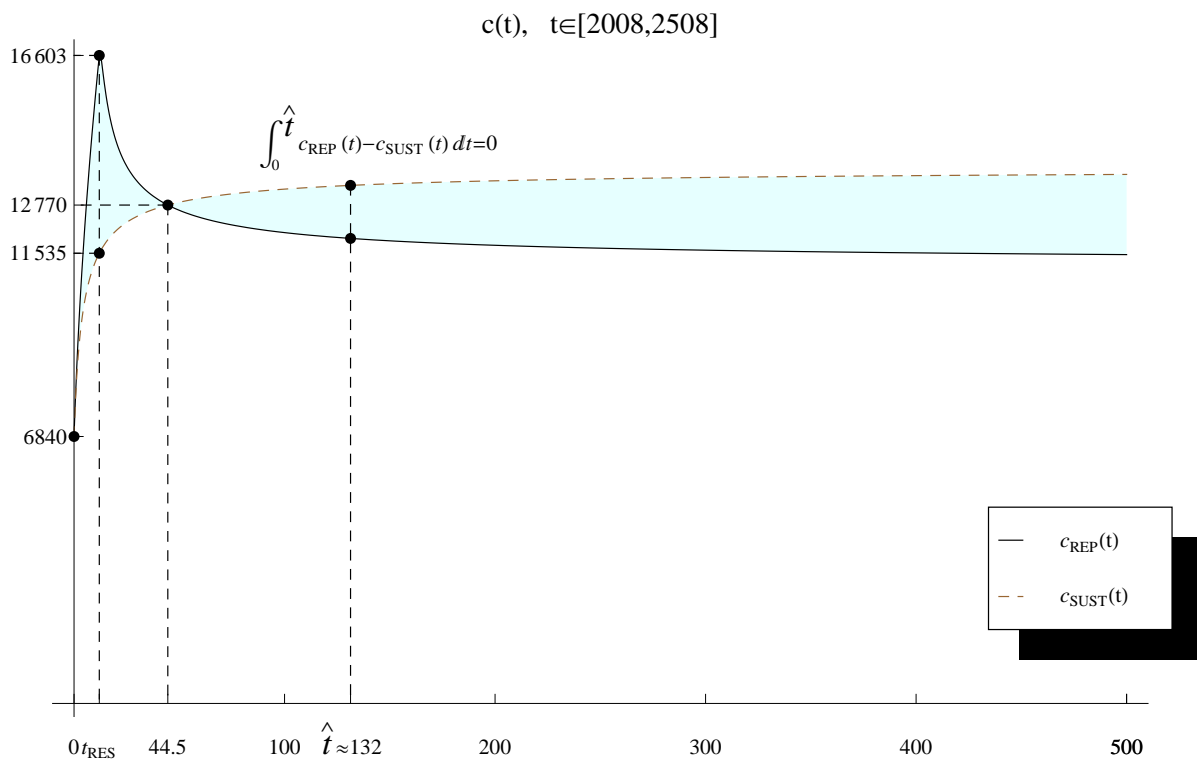


Рис. 9. Траектории потребления на душу населения в долгосрочном периоде

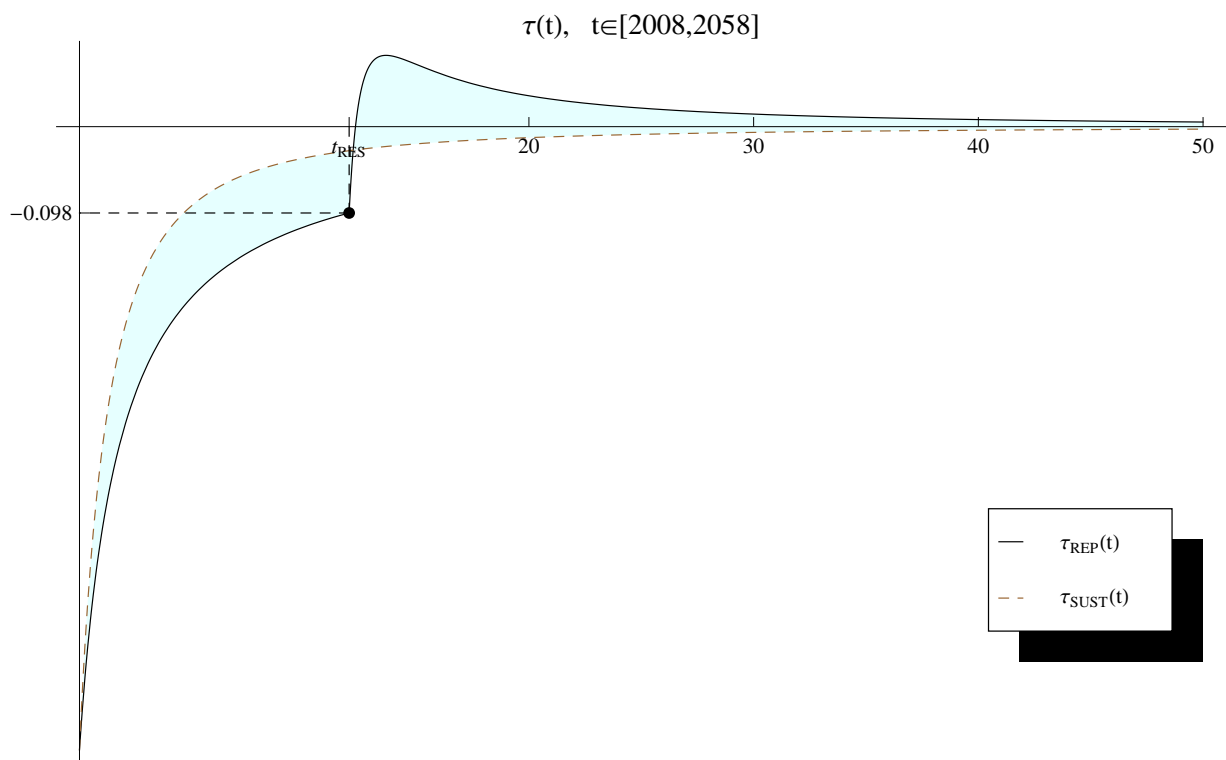


Рис. 10. Траектории “несовершенства экономики” $\tau(t)$ в краткосрочном периоде, выраженные в единицах темпов роста цены ресурса.

2.2.3. Сравнительный анализ ЭС-2020 в закрытом случае

Модель ДХСС показывает, что интенсивная эксплуатация невозобновляемого ресурса, предусмотренная Стратегией, действительно способна заметно улучшить экономические показатели в краткосрочном периоде. Так, на Рис. 8 видно, что потребление на душу населения вдоль траектории ЭС-2020 (сплошная линия) превышает аналогичный показатель для устойчивого сценария (пунктирная линия) в течение, примерно, 42 лет.

Однако, последующая динамика показывает (Рис. 9), что суммарное превышение потребления, достигнутое за счет реализации целей стратегии (площадь между графиками ЭС-2020 и устойчивого сценария в течение 44 лет), нивелируется в течение, примерно 90 последующих лет, и впоследствии уровень потребления вдоль ЭС-2020 существенно ниже, чем уровень устойчивого сценария для всех оставшихся будущих поколений. Причем, если устойчивый сценарий дает медленный, но монотонный рост потребления, то результатом стратегии является монотонно убывающее потребление в долгосрочном периоде (после 2020 года) за счет того, что темпы добычи нефти снижаются быстрее, чем в устойчивом сценарии, и технологические возможности экономики не позволяют адекватно компенсировать это снижение путем увеличения капитала (введения возобновляемых источников энергии) даже при условии выполнения правила

Хартвика.

Известно [18, с. 15], что рост ВВП ($\dot{q} > 0$) в несовершенной экономике ДХСС возможен тогда и только тогда, когда модификатор правила Хотеллинга $\tau(t)$ удовлетворяет неравенству:

$$\tau < f_k \left(\frac{\mathbf{w}}{\beta} - 1 \right),$$

где $f_k = f_k(t)$ – предельная производительность капитала и $\mathbf{w} = \mathbf{w}(t) \in (0, 1)$ – доля инвестиций в ВВП ($\dot{k} = \mathbf{w}q$). В случае, когда экономика следует правилу Хартвика ($\mathbf{w} = \beta$), рост возможен только при отрицательных τ , связанных с более высокими темпами добычи ресурса, чем при $\tau = 0$. Выполнение этого результата можно видеть при сравнении рисунков 6 и 8 (для постоянных \mathbf{w} качественное поведение ВВП и потребления совпадают).

Действительно, постепенное уменьшение темпов добычи в устойчивом сценарии связано с такой комбинацией экстерналий и государственной политики в экономике (налоги и регулирование), которая выражается в малых отрицательных значениях модификатора Хотеллинга в долгосрочном периоде (пунктирная линия на Рис. 10). Следствием этого является устойчивый рост потребления, стремящегося к константе.

В то же время, сценарий ЭС-2020 дает лишь временный, экстенсивный рост потребления за счет перерасходования ресурса в краткосрочном периоде. Растущие темпы добычи обеспечиваются соответствующими деформациями в экономике,⁸ выражающимися здесь в отрицательных значениях τ , существенно отклоняющимися от нуля (сплошная линия на Рис. 10 до $t = t_{RES}$). Последующий предполагаемый переход к устойчивым темпам добычи с меньшим начальным запасом и большими начальными темпами, чем в устойчивом сценарии, требует введения жестких политических и экономических мер, чтобы перевести экономику на стремительно снижающиеся темпы добычи. Эти меры (например, очень быстро растущий налог на добычу) выражаются в том, что динамическое условие баланса активов в экономике (правило Хотеллинга), деформируется теперь в другую сторону – агрегированный модификатор τ теперь становится положительным (сплошная линия на Рис. 10 после $t = t_{RES}$), что связано со слишком быстро убывающими темпами добычи и, как следствие, монотонным убыванием ВВП и потребления в долгосрочном периоде (сплошная линия на Рис. 8 после $t = t_{RES}$).

Заметим также, что в данной модели мы сделали еще одно предположение, дающее преимущество ЭС-2020 по сравнению с устойчивым сценарием. Дело в том, что переход к устойчивым темпам добычи нефти после реализации стратегии будет существенно сложнее реализовать технически, чем начиная с 2008 года, в силу меньшего оставшегося запаса ресурса. Правило

⁸Имеются в виду, например, необеспеченные права на владение ресурсами, стимулирующие большие объемы добычи, а также государственная поддержка “углеводородной” экономики.

Хартвика в теории предполагает, что капитал немедленно увеличивается в результате инвестиций. Однако, на практике это упрощение можно считать адекватным только для финансового капитала. Если же речь идет о внедрении новых технологий, то чем быстрее снижаются темпы добычи ресурса, тем меньше должен быть временной лаг между инвестициями и вводом в эксплуатацию альтернативных энергетических мощностей. Поэтому, в реальности, чем меньше начальный запас ресурса при переходе к устойчивому развитию, тем меньше шансов на успех этого перехода. Мы же оптимистично предположили, что эти шансы равны для обоих сценариев. Невыполнение этого предположения только усилит полученный качественный результат, неблагоприятный для ЭС-2020 с точки зрения устойчивого развития.

Агрегированная модель ДХСС предполагает, что доходы, получаемые от экспорта ресурса дают такой же прирост общему выпуску продукции, как и использование ресурса внутри страны. Вообще говоря, это утверждение неверно, что наводит на предположение о том, что при некоторых условиях торговля ресурсом может положительно повлиять на устойчивое развитие страны в долгосрочной перспективе. Следующие разделы работы посвящены исследованию этого вопроса.

2.3. Открытая экономика:

Модель Дасгупты-Иствуда-Хила (ДИХ)

Модель ДХСС не предназначена для исследования качественных эффектов открытой экономики. Эта модель используется при изучении политики добычи ресурсов для закрытой экономики, например, для экономической системы, которой является весь мир в целом. Модель ДХСС не может оказать существенную помощь при ответе на ряд важных политических вопросов. Один из таких вопросов, с которым сталкивается каждая богатая ресурсами страна, касается объемов, в которых ресурсы следует экспортировать вместо того, чтобы использовать внутри страны. Очевидно, что часто есть выбор между использованием природных ресурсов для внутреннего производства и их экспортом. В последнем случае такой обмен может быть использован либо для импорта капитала, чтобы способствовать формированию внутреннего капитала, либо для наращивания иностранных активов, с которых можно получать проценты. Рассматриваемая ниже модель дает возможность проанализировать оптимальную политическую комбинацию для экономики с таким набором свойств. Эта модель представлена в работе Дасгупты, Иствуда и Хила [23]. В работе показано, что, по крайней мере, в случае, когда будущее достоверно известно, оптимальная политика добычи ресурсов для такой экономики может быть определена факторами, существенно отличающимися от тех, что так важны в закрытой экономике.

2.3.1. Модель ДИХ

Производственные возможности в экономике определены как

$$Q(t) = F(K(t), R(t), t),$$

где $K(t)$ и $R(t)$ являются, соответственно, запасом внутреннего капитала и темпом использования невозобновляемого ресурса во внутреннем производстве в момент времени t . Предполагается, что $F()$ дает уменьшающуюся прибыль от K и R . Кроме использования ресурса в качестве фактора для внутреннего производства, его можно использовать для экспорта: если $E(t)$ это уровень экспорта в момент t , то он определяет экспортную цену⁹ FOB (Free On Board) $P(E(t))$

⁹ Цена FOB – цена, включающая собственно стоимость товара, а также транспортные и страховые расходы, понесенные продавцом вплоть до завершения погрузки товара

и количество ресурса, оставшееся на момент t , которое равно:

$$S(t) = S_0 - \int_0^t (R(\tau) + E(\tau)) d\tau$$

или

$$\dot{S}(t) = -(R(t) + E(t)). \quad (10)$$

Совокупные капитальные активы экономики $W(t)$ в момент t состоят из внутреннего капитала $K(t)$ и инвестиций за границей ($W(t) - K(t)$) с нормой прибыли r . Капитал гибкий, то есть внутренний капитал может быть незамедлительно и бесплатно переведен в иностранный капитал, и наоборот. Итак, основное балансовое уравнение счетов для этой экономики имеет вид:

$$\dot{W}(t) = F(K(t), R(t), t) + r(W(t) - K(t)) + P(E(t))E(t) - C(t), \quad (11)$$

где $C(t)$ - это уровень внутреннего потребления в момент t . В качестве критерия развития экономики рассматривается утилитарный критерий, максимизирующий суммарную дисконтированную полезность потребления всех последующих поколений на бесконечном промежутке времени:

$$\max \int_0^{\infty} u(C(t)) e^{-\delta t} dt, \quad \delta \geq 0, \quad (12)$$

при условии (10), (11) и известных S_0 и W_0 , $u'(0) = +\infty$. Максимизация понимается в *опережающем смысле*¹⁰, если интеграл полезности расходится. Согласно Принципу максимума Понтрягина [5], необходимым условием экстремума функционала полезности в данной задаче является максимум следующего гамильтониана:

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & u(C) e^{-\delta t} + \lambda e^{-\delta t} \{F(K, R, t) + \\ & + r(W - K) + P(E)E - C\} - \mu e^{-\delta t} \{R + E\} \end{aligned}$$

где λ и μ - это теневые цены совокупного благосостояния W и запаса ресурса S соответственно.

¹⁰ Траектория $C^*(t)$ является максимизирующей в *опережающем смысле* (in overtaking sense) если:

1) интеграл полезности расходится: $\lim_{B \rightarrow \infty} \int_0^B u(C^*(t)) e^{-\delta t} dt = \infty$;

2) в долгосрочном периоде, значение интеграла полезности для траектории $C^*(t)$ не меньше, чем значение этого интеграла для любой другой траектории $C(t)$: $\lim_{B \rightarrow \infty} \int_0^B [u(C^*(t)) - u(C(t))] e^{-\delta t} dt \geq 0$.

См., [21, с. 11].

Легко проверить, что необходимые условия для решения (12) выглядят следующим образом:

$$u'(C) = \lambda \quad (13)$$

$$\lambda \frac{d}{dE} \{P(E)E\} = \mu \quad (14)$$

$$F_K \leq r, = \text{если } K > 0 \quad (15)$$

$$\lambda F_R \leq \mu, = \text{если } R > 0 \quad (16)$$

$$\dot{\lambda} - \delta \lambda = -\lambda r \quad (17)$$

$$\mu(t) = \mu_0 e^{\delta t}. \quad (18)$$

Предположение о существенности капитала и ресурса в производстве:

$$F(0, R, t) = F(K, 0, t) = 0 \forall t \quad (19)$$

приводит к тому, что (15) выполняется в виде равенства тогда и только тогда, когда выполняется в виде равенства (16). В случае, когда K и R положительны вдоль оптимальной траектории, (14) и (16) подразумевают, что

$$\frac{d}{dE} \{P(E)E\} = F_R, \quad (20)$$

Кроме того, (15) и (16) предполагают, что выполняется стандартное правило Хотеллинга:

$$\frac{\dot{F}_R}{F_R} = r = F_K, \quad (21)$$

в то время как (13) и (17) приводят к равенству вида:

$$u'' \frac{\dot{C}}{u'} = \delta - r. \quad (22)$$

Уравнения (20), (21) и (22) имеют следующую интерпретацию. Уравнение (20) - это необходимое условие статической эффективности, требующее равенства предельного дохода от экспорта и предельной производительности ресурса. Уравнение (21) - это необходимое условие динамической эффективности: в модели есть три актива: внутренний и иностранный капитал и ресурс, а также нормы прибыли от этих активов, соответственно F_K , r и \dot{F}_R/F_R . Эффективность требует, чтобы они были равны. Уравнение (22) - это стандартное условие оптимальности межвременного уровня потребления, требующее, чтобы предельная полезность потребления падала с темпом, равным норме чистой прибыли, или, что эквивалентно, чтобы ставка дисконтирования потребления ($\delta - u''\dot{C}/u'$) была равна норме прибыли.

Для получения явных решений авторы [23] используют следующие, традиционные в ре-

сурсной экономике функциональные зависимости:

$$-u''(C)\frac{C}{u'(C)} = \eta, \quad \text{константа} \quad (23)$$

$$P(E) = \gamma E^{\gamma-1}, \quad 0 < \gamma < 1 \quad (24)$$

$$F(K, R, t) = e^{\beta t} K^{\alpha_1} R^{\alpha_2}, \quad \alpha_1 + \alpha_2 < 1. \quad (25)$$

Уравнения (22) и (23) предполагают, что

$$C(t) = C_0 e^{\frac{r-\delta}{\eta} t}. \quad (26)$$

Уравнения (20), (21) и (24) дают

$$E(t) = E_0 e^{\frac{r}{\gamma-1} t}. \quad (27)$$

Из (21) следует

$$F_R(t) = F_R(0) e^{rt},$$

так что

$$K(t)^{\alpha_1} R(t)^{\alpha_2-1} = K_0^{\alpha_1} R_0^{\alpha_2-1} e^{(r-\beta)t} \quad (28)$$

и

$$K(t) = \left(\left[\frac{\alpha_1}{r} \right] R(t)^{\alpha_2} e^{\beta t} \right)^{\frac{1}{1-\alpha_1}}. \quad (29)$$

Используя (29) и (28), мы увидим, что

$$R(t) = \left(\left[\frac{\alpha_1}{r} \right]^{\alpha_1} K_0^{-\alpha_1(1-\alpha_1)} R_0^{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)} e^{(\beta-\alpha_2 r)t} \right)^{\frac{1}{1-\alpha_1-\alpha_2}} \quad (30)$$

и

$$K(t) = \left[\frac{\alpha_1}{r} \right]^{\frac{1}{1-\alpha_1} + \frac{\alpha_1 \alpha_2}{(1-\alpha_2)(1-\alpha_1-\alpha_2)}} \left\{ K_0^{-\alpha_1 \alpha_2} R_0^{\alpha_2(1-\alpha_2)} e^{(\beta-\alpha_2 r)t} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha_1-\alpha_2}}. \quad (31)$$

Рассмотрим ниже правдоподобный случай, когда

$$\beta < (1-\alpha_1)r, \quad \text{что влечет за собой } \dot{R} < 0. \quad (32)$$

Как отмечают авторы [23], внутренний капитал ресурсодобывающей страны не убывает ($\dot{K} \geq 0$) если и только если

$$\beta \geq \alpha_2 r, \quad (33)$$

так что, если уровень технического прогресса достаточно низок, то есть $\beta < \alpha_2 r$, то уровень внутреннего производства асимптотически сокращается до нуля. (При этом $\alpha_2 r < (1-\alpha_1)r$.)

Возможность того, что внутреннее производство может быть постепенно ликвидировано, легко объясняется: условие динамической эффективности (21) предполагает, что

$$F_K = r.$$

В данном случае, F_K - убывающая функция от K/R : вдоль любой допустимой кривой, R стремится к нулю, так что для того, чтобы поддерживать F_K постоянным, K также должно убывать.¹¹ Но с техническим прогрессом, F_K имеет экзогенную тенденцию к повышению, которой может быть достаточно, чтобы F_K оставалось постоянным, даже когда K не убывает. Отсюда и следует неравенство (33).

Ниже, авторы [23] показывают, что временной график $K(t)$, $R(t)$ и $E(t)$ (а, следовательно, и оптимальный уровень добычи $R(t) + E(t)$) не зависят от предпочтений, т.е. не зависят от η и δ . Это может быть продемонстрировано, во-первых, если показать, что K_0 , R_0 и E_0 не зависят от η и δ . Уравнения (27), (30) и (31) прямо подтвердят это. В данном случае, для того чтобы политика была оптимальной, должно выполняться:

$$\int_0^{\infty} (R(t) + E(t)) dt = S_0. \quad (34)$$

Кроме того, уравнение (21) предполагает, что

$$r = \alpha_1 K_0^{\alpha_1 - 1} R_0^{\alpha_2}, \quad (35)$$

а уравнение (20), что

$$\alpha_2 K_0^{\alpha_1} R_0^{\alpha_2 - 1} = \gamma^2 E_0^{\gamma - 1}. \quad (36)$$

Если сейчас подставить уравнения (27) и (30) в уравнение (34), то это уравнение и уравнения (35), (36) образуют систему трех уравнений с тремя неизвестными K_0 , R_0 и E_0 . Единственное решение не зависит от предпочтений. Вдоль оптимальной траектории запас внутреннего капитала растет с темпом $(\beta - \alpha_2 r)/(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$; экспорт ресурса падает с темпом $r/(1 - \gamma)$, а использование ресурса внутри страны снижается с темпом $(r(1 - \alpha_1) - \beta)/(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$. Независимость, полученная в данном результате, напоминает стандартный результат статической теории торговли, в том смысле, что в открытой экономике точка оптимального производства не зависит от предпочтений, а полностью определяется мировыми ценами.

Авторы [23] показали, что внутреннее производство и торговля (это E) не зависят от предпочтений. Причиной является то, что экспортная политика точно определена с помощью условий эффективности (20) и (21). В этом смысле статический результат слабее, так как он показывает, что внутреннее производство, но не торговля, не зависит от предпочтений.

Далее авторы [23] исследуют эффект убывающей процентной ставки заграничных активов, заменив r на переменное $r(t)$, определенное как:

$$r(t) = r^* + \gamma e^{-ct},$$

¹¹ Эффект снижения внутреннего производства из-за растущего экспорта известен в литературе под названием "голландская болезнь" (Dutch disease).

где

$$r^*, \gamma, \epsilon \geq 0.$$

Норма прибыли из-за границы теперь экспоненциально убывает к неотрицательному нижнему пределу. Если $r^* > 0$, то единственное различие заключается в том, что из-за того, что может быть $r^* < \delta < r(0)$, график оптимального потребления может быть с одним пиком, сначала поднимающимся, потом нисходящим, в то время как иностранный доход падает ниже ставки дисконтирования. Для предотвращения непрерывно увеличивающегося импорта теперь требуется, чтобы

$$\beta < (1 - \alpha_1)r(t) \quad \text{для любых } t, \quad (37)$$

и понятно, что это условие не может быть выполнено, если $r^* = 0$ и $\beta > 0$. Таким образом, это особый случай, для которого (при данной постановке задачи и при данных функциональных зависимостях) нет приемлемого оптимального решения, но для положительного r^* , хотя бы и слишком малого, поведение решения значительно не меняется. Конечно, если $r^* = 0$ и $\beta = 0$, то проблема эквивалентна проблеме оптимальной добычи в автаркии¹² (обсуждалось в [24]) и, поэтому как внутреннее использование ресурса, так и внутренний капитал уменьшаются до нуля в долгосрочном периоде.

2.3.2. Переменная прибыль от заграничных активов

Если прибыль от заграничных активов имеет вид $r(W - K)$, где $r' < 0$ и $r'' \neq 0$, то легко проверить, что необходимыми условиями являются следующие соотношения:

$$u'(C) = \lambda \quad (38)$$

$$\lambda \frac{d}{dE} \{P(E)E\} = \mu \quad (39)$$

$$F_K \leq r'(W - K)(W - K) + r, \quad = \quad \text{если } K > 0 \quad (40)$$

$$\lambda F_R \leq \mu, \quad = \quad \text{если } R > 0 \quad (41)$$

$$\dot{\lambda} - \delta\lambda = -\lambda \{r'(W - K)(W - K) + r\} \quad (42)$$

$$\mu(t) = \mu_0 e^{\delta t}. \quad (43)$$

Эти уравнения можно интерпретировать в терминах эффективности и оптимальности

¹² Автаркия - экономический режим страны, преследующий цель минимизации или полного неучастия в международной торговле; изоляционистское государство.

аналогично уравнениям (4) -(9), а именно:

$$\frac{d}{dE} \{P(E)E\} = F_R \quad (44)$$

$$\frac{\dot{F}_R}{F_R} = r'(W - K)(W - K) + r = F_K \quad (45)$$

$$u'' \frac{\dot{C}}{u'} = \delta - r'(W - K)(W - K) - r. \quad (46)$$

Тем не менее, появление W в (45) и (46) означает, что уравнения теперь гораздо более зависимы друг от друга, чем были раньше, и не могут быть проинтегрированы независимо друг от друга. В общем случае, траектории всех переменных будут зависеть от всех параметров системы, а независимость, полученная для предыдущих результатов, уже не имеет места.

2.3.3. Выводы

Как отмечают авторы [23], открытие богатой ресурсами экономики для торговли безусловно может значительно изменить ее политику добычи. В простейшем случае, который, возможно, не является плохим приближением к реальному миру, выбор оптимальной политики добычи становится очень простой политикой управления активами, потому что есть актив, прибыль с которого экзогенна. Когда эта прибыль не является экзогенной, то задача не является разделяющейся в этом смысле, а становится более сложной. Опуская предположение определенности, но сохраняя допущение о постоянстве прибыли из-за границы, снова усложняем решение. Так как все еще есть актив с постоянной нормой прибыли, то оптимальная политика снова состоит из синхронизации с ним ожидаемых скорректированных на риск норм прибыли на остальные активы. Но, конечно, соответствующая поправка на риск зависит от параметров функции предпочтений.

3. Использование модели ДИХ для анализа ЭС-2020

3.1. Модифицированная модель ДИХ

3.1.1. Специфика открытой модели для российской экономики

Постановка задачи сравнительного анализа ЭС-2020, рассматриваемая в данной работе, имеет следующие основные отличия от постановки задачи Дасгупты, Иствуда и Хила [23].

1. Критерий экономического роста. Экономика ДИХ строго следует утилитарному критерию (12), в то время как в данной работе проводится позитивный анализ краткосрочных и долгосрочных последствий уже заданного сценария в предположении, что экономика стремится выполнить минимальное требование устойчивого развития – постоянное потребление на душу населения. Как позже отмечал Дасгупта в работах с другими соавторами, утилитарный критерий или критерий приведенной ценности (PV) не всегда соответствует целям устойчивого развития [12]; кроме того, действия государства не всегда направлены на то, чтобы оптимизировать некий критерий, благоприятный для граждан этого государства [13].

2. Несовершенство экономики. Модель ДИХ предполагает отсутствие экстерналий и государственного влияния, что выражается в выполнении стандартного правила Хотеллинга в виде (21) и, как следствие, ведет к монотонно убывающим темпам добычи ресурса.¹³ Это предположение неправдоподобно для российской экономики и принципиально несовместимо с целями работы по исследованию ЭС-2020, задающей растущие темпы добычи. Поэтому предполагается, что правило Хотеллинга имеет вид (5), где аддитивный обобщенный модификатор отличен от нуля в общем случае, а его начальное значение и траектория однозначно определяются начальным состоянием экономики и траекториями анализируемых сценариев.

3. Структура рынка. В модели ДИХ предполагается, что богатая ресурсом страна монополично определяет цену на рынке, регулируя объемы экспорта.¹⁴ Это предположение, конечно, не может быть корректно использовано для описания положения России на международном нефтяном рынке. Запасы только стран ОПЕК на порядок выше, чем российские (927 против 60 млрд баррелей на 1 января 2008 г.), и совокупная средняя добыча ОПЕК также превосходила российскую в 2007 году (30,5 против 9,7 млн баррелей в день) [43]. Эти пропорции сохраняются

¹³ Условие (32).

¹⁴ Уравнение (24).

и в настоящее время.¹⁵ С другой стороны, экспорт российской нефти не настолько мал, чтобы можно было сказать, что он не может повлиять на цену. Поэтому мы используем предположение об олигополии, в которой цена определяется суммарным объемом ресурса на рынке (российский экспорт плюс экспорт остального мира). При этом мы сохраняем основную функциональную форму модели ДИХ, а именно, функцию с постоянной эластичностью. Кроме того, однопараметрическая модель цены (24) является слишком простой для практических исследований, поскольку она не может, например, одновременно отразить уровень текущей рыночной цены на нефть и эластичность спроса. Поэтому мы использовали функцию из более широкого, двухпараметрического класса функций.

4. Технический прогресс. Модель ДИХ использует максимально оптимистичную экзогенную модель технического прогресса в виде экспоненциально растущей совокупной производительности факторов¹⁶ (СПФ). Такая же модель использовалась, например, в работах Стиглица [47] и Солоу [46]. Однако, реальное поведение этого фактора является очень неопределенным, и эта неопределенность отражается в широком разнообразии подходов для его моделирования в ресурсной экономике. Так, например, используется модель в виде квазиарифметического роста СПФ [15] и даже в виде роста СПФ, ограниченного сверху [41, с. 17].

Заметим также, что СПФ в действительности растет медленнее, чем знания, и в некоторых случаях этот показатель может даже убывать в краткосрочном периоде из-за растущих расходов на исследования и внедрение новых технологий [37]. Неопределенность этого фактора в сочетании с невозобновляемостью ресурса может быть использована как аргумент против крайне оптимистичных моделей технического прогресса.

Так, в [18], было показано, что экспоненциально убывающие темпы добычи невозобновляемого ресурса, являющиеся результатом предположения об экспоненциально растущем техническом прогрессе¹⁷ приводят к коллапсу ресурсной экономики, если на самом деле рост знаний окажется менее оптимистичным, например, будет иметь форму СПФ, в точности компенсирующую амортизацию капитала (асимптотически линейную, с малым темпом прироста [17, раздел 8]).

Недооценка будущего технического прогресса, конечно, тоже имеет свой недостаток, а именно: ресурсная политика становится слишком бережной, со сравнительно более низким уровнем потребления в краткосрочном периоде. Однако, по мере накопления знаний, траектория добычи (и, соответственно, потребления) может корректироваться в этом “осторожном”

¹⁵ См., например, данные Росстата [8].

¹⁶ Формула (25).

¹⁷ Эндогенном, как в [31], [49], или экзогенном, как в модели ДИХ.

сценарии и асимптотически приближаться к траектории, предполагающей точное знание пути развития запаса технологий в начальной точке. Такое асимптотическое поведение показано в [17, раздел 9] на примере растущей траектории знаний о запасах невозобновляемого ресурса. Незначительное, уменьшающееся со временем отклонение от оптимальной траектории потребления представляется более предпочтительным с точки зрения устойчивого развития, чем коллапс экономики в случае переоценки возможностей технического прогресса и/или запаса ресурса.

Поскольку цель данной работы не связана с изучением развития знаний, мы используем достаточно простое предположение о форме технического прогресса, которое не является ни экстремально оптимистичным, ни экстремально пессимистичным. Некоторые работы в ресурсной экономике, например [25], [48], предполагают для простоты, что технический прогресс в точности компенсирует эффект роста населения. Однако, предположение о том, что численность населения должна стабилизироваться на некоторой константе, становится все более правдоподобным. Так, по оценке ООН [50] рост населения Земли должен остановиться на отметке около 9 миллиардов человек (умеренный сценарий). Численность населения уже стабилизировалась в развитых странах, основных потребителях невозобновляемых ресурсов. Отсутствие роста населения дает возможность использовать технический прогресс в упрощенных моделях для компенсации других факторов, негативно влияющих на рост. Поэтому, в данной работе предполагается, что технический прогресс выражается в таком росте СПФ, который в точности компенсирует амортизацию капитала.

5. Правило инвестирования. Модель ДИХ не рассматривает вопрос о правиле инвестирования, в то время как предлагаемый в настоящей работе анализ существенно опирается на предположение о том, что нефтяная рента полностью инвестируется в капитал (правило Хартвика $\dot{k} = \beta q$). В принципе, это предположение достаточно правдоподобно, поскольку используемое нами значение эластичности производства по ресурсу ($\beta = 0.25$) означает, что инвестиции составляют четвертую часть ВВП, что практически совпадает с данными Росстата (в 2007 г. этот показатель равнялся 24,7% [6, Табл. 4.5]). Кроме того, правило Хартвика оптимально с точки зрения критерия постоянного потребления как в случае стандартного правила Хотеллинга [33], так и в случае экономики с экстерналиями, например, в виде глобального потепления [48]. Поэтому данное правило согласуется с требованием асимптотически постоянного потребления, используемым в данной работе. Другое дело, что для практической реализации правила Хартвика важен не только объем, но и структура инвестиций, поскольку очевидно, что бесконечное инвестирование в углеводородную и атомную энергетику неизбежно приведет к

коллапсу экономики в силу конечности запасов этих ресурсов. Однако, вопрос об оптимальной структуре инвестиций требует дальнейшей детализации модели, что выходит за рамки данной работы. Мы оптимистично предполагаем, что структура инвестиций такова, что растущий капитал способен, в принципе, заменить в производстве исчезающий ресурс даже в случае сценария ЭС-2020, неблагоприятного для долгосрочного развития.

Таким образом, цели данного исследования, специфика экономики России и ее положение на международном рынке нефти определили постановку задачи в предлагаемом ниже виде.

3.1.2. Основные уравнения модифицированной модели

Модифицированный вариант балансового уравнения (11) имеет вид:

$$y(t) = c(t) + \dot{w}(t) = f(k(t), (1 - \gamma)r(t)) + \eta(t)(w(t) - k(t)) + p(\gamma r(t) + e_w(t))\gamma r(t), \quad (47)$$

где $y(t)$ – ВВП, $w(t)$ – совокупный капитал (внутренний плюс активы за границей), $k(t)$ – внутренний капитал, $\eta(t)$ – норма прибыли на активы за границей, $e_w(t)$ – мировой экспорт нефти, $\gamma r(t)$ – доля нефти, которая экспортируется Россией, $p(\gamma r(t) + e_w(t))$ – цена нефти на мировом рынке. Величины $y(t)$, $q(t) = f(k(t), (1 - \gamma)r(t))$, $c(t)$, $r(t)$, $e_w(t)$, $k(t)$, $w(t)$, $\dot{w}(t)$ рассматриваются в единицах на душу населения.

В данной модели предполагается, что в экономике присутствуют внешние эффекты, аддитивно модифицирующие правило Хотеллинга:

$$\dot{f}_r/f_r = f_k + \tau(t). \quad (48)$$

Предположим, что правило инвестирования единообразно для всех трех видов дохода: внутреннего выпуска $q(t) = f(k(t), (1 - \gamma)r(t)) = A(1 - \gamma)^\beta k^\alpha(t)r^\beta(t)$, прибыли с активов за границей $\eta(t)(w(t) - k(t))$ и дохода от экспорта нефти $p(\gamma r(t) + e_w(t))\gamma r(t)$. Тогда правило Хартвика имеет вид:

$$\dot{w}(t) = \beta [f(k(t), (1 - \gamma)r(t)) + \eta(t)(w(t) - k(t)) + p(\gamma r + e_w)\gamma r(t)]. \quad (49)$$

Положим, что активы за границей растут пропорционально общему капиталу страны, то есть

$$w(t) - k(t) = \delta w(t), \quad \delta \in (0, 1), \quad (50)$$

где δ – доля российского капитала, хранящаяся в виде активов за границей.

Тогда $k(t) = (1 - \delta)w(t)$ и (49) принимает вид

$$\dot{w}(t) = \beta [f((1 - \delta)w(t), (1 - \gamma)r(t)) + \eta(t)w(t)\delta + p(\gamma r(t) + e_w(t))\gamma r(t)]. \quad (51)$$

Поскольку траектории $r(t)$, $\eta(t)$, $e_w(t)$ задаются в виде сценариев, то для нахождения траектории капитала $w(t)$ следует решить дифференциальное уравнение (51). Начальное условие $w(0) = w_0$ можно найти, если записать процентное изменение внутреннего производства за исключением дохода от экспорта (\dot{q}_0/q_0) и подставить выражение для $k(t)$ из (50) и $\dot{w}_0 = \beta y_0$, полученное из уравнений (47) и (49):

$$\begin{aligned} \frac{\dot{q}_0}{q_0} = \alpha \frac{\dot{k}_0}{k_0} + \beta \frac{\dot{r}_0}{r_0} &= \alpha \frac{\dot{w}_0}{w_0} + \beta \frac{\dot{r}_0}{r_0} = \alpha \frac{\beta y_0}{w_0} + \beta \frac{\dot{r}_0}{r_0}, \\ w_0 &= \alpha \beta y_0 \left(\frac{\dot{q}_0}{q_0} - \beta \frac{\dot{r}_0}{r_0} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Решение уравнения (51) находится численно. Теперь, зная траекторию совокупного капитала, можно найти $k(t)$ из уравнения (50). Чтобы найти траекторию выпуска $q(t)$, следует вычислить коэффициент общей производительности факторов A из (47):

$$A = \frac{y_0 - p_0 \gamma r_0 - \eta_0 \delta w_0}{w_0^\alpha r_0^\beta (1 - \gamma)^\beta (1 - \delta)^\alpha}. \quad (52)$$

Зная $q(t)$, мы можем найти потребление $c(t)$ и проверить асимптотическое выполнение стандартного правила Хотеллинга $\tau(t) = \dot{f}_r/f_r - f_k \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

3.2. Результаты анализа ЭС-2020 для открытой экономики

3.2.1. Исходные данные и российский экспорт нефти

Возьмем те же данные, что и для случая с закрытой экономикой: $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.25$, $N = 142 \cdot 10^6$, $\dot{q}_0/q_0 = 0.06$, $s_0 = 115.763$ тонн на человека, $y_0 = 9119.23$ долларов США на человека в год, $t_0 = 2008$ год – и аналогичные сценарии добычи нефти:

$$r_{RES}(t) \approx \begin{cases} 3.42 + 0.02t, & t \in [0, t_{RES}], \\ \frac{3.66 + 4.06t}{(1 + 0.5t)^{2.2}}, & t \in [t_{RES}, +\infty], \end{cases} \quad r_{SUST}(t) \approx \frac{3.42 + 2.26(t - t_{RES})}{(1 + 0.3(t - t_{RES}))^{2.2}}.$$

За долю нефти γ , которую Россия экспортирует, мы берем среднее значение $\gamma = 0.76$ данных из [10] и [36].

3.2.2. Мировой экспорт нефти

По данным [43] мировые запасы нефти, исключая Россию, равны $1\,331\,698\,077 - 60\,000\,000 = 1\,271\,698\,077$ тысяч баррелей или $174\,205\,216$ тысяч тонн, что в расчете на одного жителя

России составляет 1221.55 тонн. Повторяя подход 2.2.1, мы предполагаем, что мировые запасы нефти, включая неразведанные, в два раза превышают данные [43], поэтому равны 2443.1 тонны на одного жителя России. Объем мировых запасов приводится здесь в единицах на одного жителя России исключительно для сравнения с российскими запасами. Доля мировой добычи нефти, которая идет на экспорт примерно равна 40% согласно [36]. Кроме того, в 2008 году в [26] был предложен прогноз мировой добычи нефти до 2030 года (в модели до $t_{EIA} = 22$). Используя этот прогноз, мы предполагаем, что мировой экспорт представим в виде линейной функции в течение срока действия прогноза с последующим переходом на устойчивую добычу нефти в смысле постоянного потребления в долгосрочном периоде.

Мировой экспорт $e_w(t)$, в зависимости от используемой в России политики добычи нефти r_{REP} или r_{SUST} , разбивается на два соответствующий случая:

$$e_{wRES}(t) \approx \begin{cases} 27.1 + 0.418t, & t \in [0, t_{EIA}], \\ \frac{36.319 + 45.16(t - t_{EIA})}{(1 + 0.56(t - t_{EIA}))^{2.2}}, & t \in [t_{EIA}, +\infty], \end{cases}$$

$$e_{wSUST}(t) \approx \begin{cases} 27.1 + 0.429t, & t \in [0, t_{EIA}], \\ \frac{36.54 + 45.45(t - t_{EIA})}{(1 + 0.56(t - t_{EIA}))^{2.2}}, & t \in [t_{EIA}, +\infty]. \end{cases}$$

3.2.3. Цена нефти на мировом рынке

В качестве модели цены возьмем двухпараметрическую зависимость, сохраняющую основную функциональную форму (24) модели ДИХ, а именно, функцию с постоянной эластичностью:

$$p = p_0 \left(\frac{e_w(t) + \gamma r(t)}{e_w(0) + \gamma r(0)} \right)^b, \quad (53)$$

где p_0 – цена нефти на мировом рынке в начальный момент. Согласно прогнозу ЭС-2020, цена российской нефти, в лучшем случае, могла достичь 30 долларов за баррель [10, с. 52]. Фактически же, в конце 2007 - начале 2008 года спот-цена нефти марки Юралс колебалась около 90 долларов за баррель [27]. В качестве p_0 мы возьмем среднее значение равное 60 долларам за баррель, то есть $p_0 = 60[\text{долларов}/\text{баррель}] / 0.1364[\text{тонн}/\text{баррель}] = 439.883$ долларов за тонну нефти. Используемая в литературе (см., например, [35]) ценовая эластичность спроса на нефть равна -0.3 .

3.2.4. Процентная ставка на активы за границей

В силу цикличности развития рыночной экономики, реальная процентная ставка подвергается соответствующим колебаниям (Рис. 11 до $t = 0$). Однако, поскольку целью работы является исследование долгосрочной устойчивости экономики, мы принимаем во внимание тот факт, что предельная производительность капитала (в нашем случае $\alpha q/k$) со временем стремится к нулю. Так как устойчивая добыча в долгосрочном периоде ведет к равновесию активов в экономике ($\tau(t) \rightarrow 0$, Рис. 10 и 26), то размер процентной ставки стремится к предельной производительности капитала, то есть тоже асимптотически убывает до нуля. Одной из задач данной работы является численное исследование влияния поведения “внешней” процентной ставки на качественные результаты сравнения сценария ЭС-2020 с устойчивым сценарием. Для этого построим две функции $\eta_1(t)$ и $\eta_2(t)$ по данным о реальной процентной ставке в США с 1955 года по 2007 год (с -57 по -1 год от t_0). Функция $\eta_1(t)$ будет циклически повторять поведение процентной ставки на интервале $(-57,-1)$, а $\eta_2(t)$ – на интервале $(-18,-1)$. Выбор интервалов был обусловлен тем, что в моменты $-57, -18, -1$ величина процентной ставки примерно одинакова.

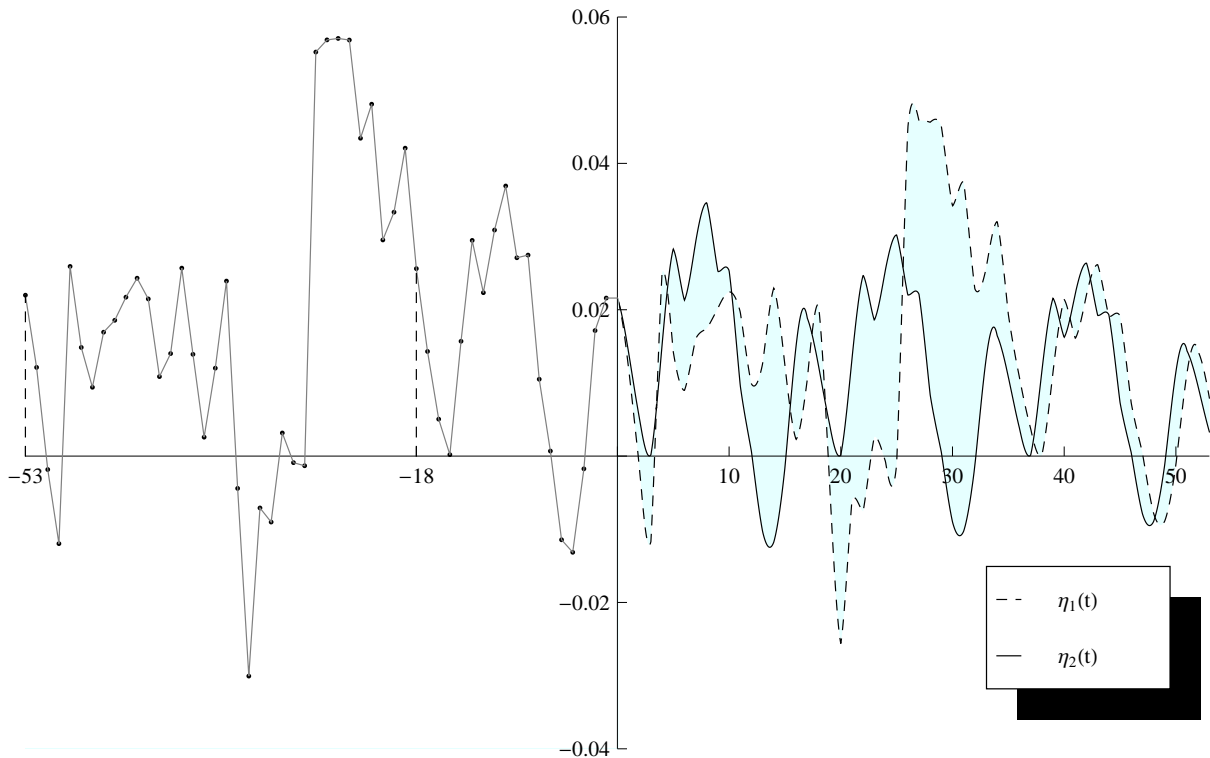


Рис. 11. Экстраполяция процентной ставки

Тренд процентной ставки асимптотически убывает до нуля по закону $\eta_i(t) = e^{-\varepsilon t} \cdot \bar{\eta}_i(t)$, где $\varepsilon = 8 \cdot 10^{-3}$ (параметр) и $\bar{\eta}_i(t)$ – интерполяция на соответствующих интервалах.

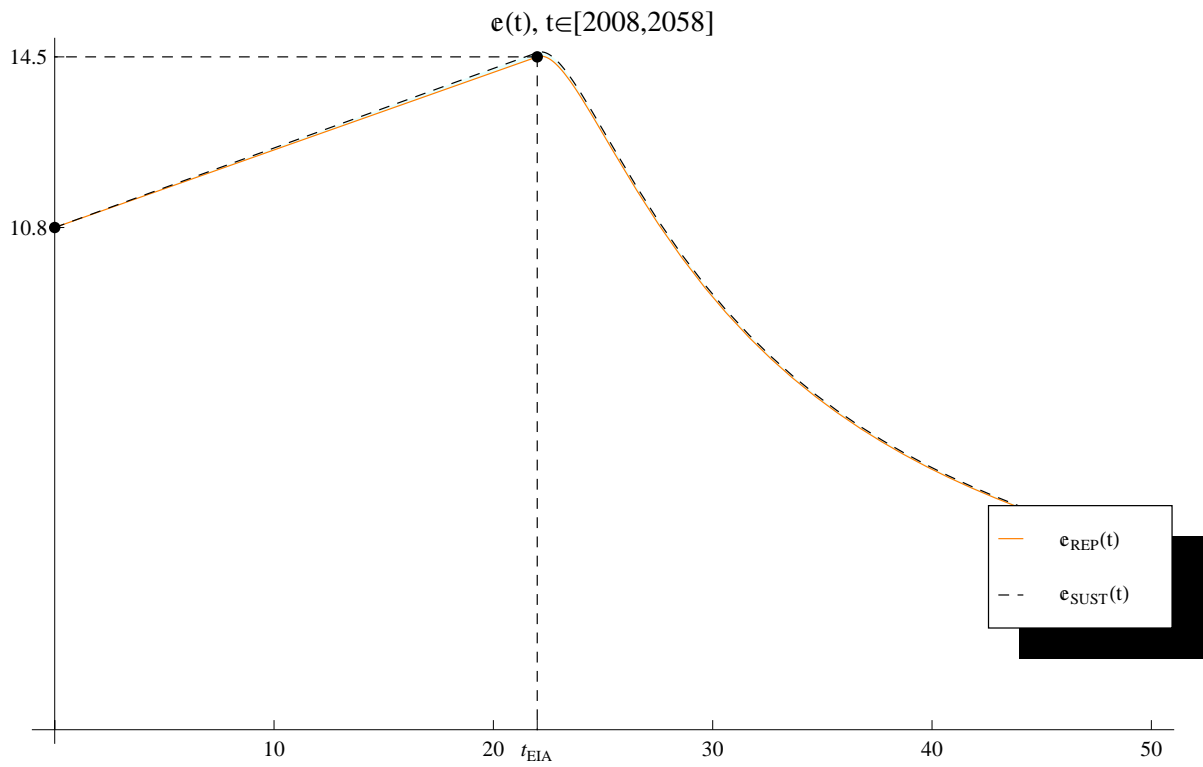


Рис. 12. Сценарии мирового экспорта нефти в краткосрочном периоде

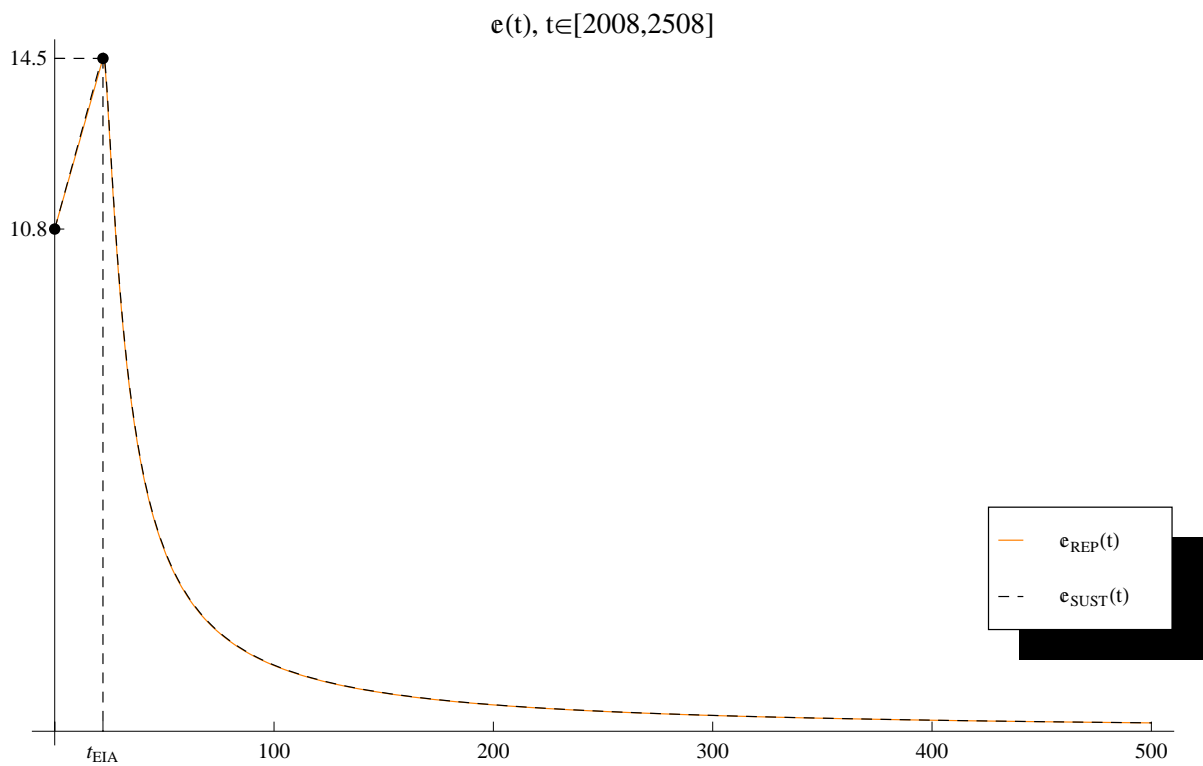


Рис. 13. Сценарии мирового экспорта нефти в долгосрочном периоде

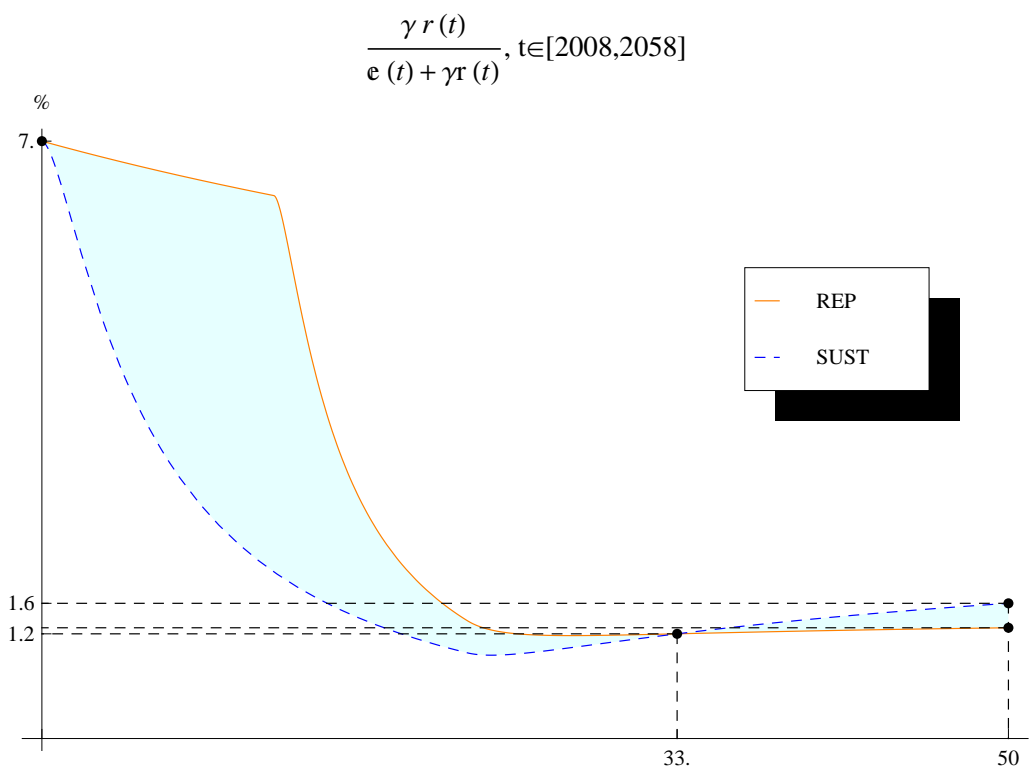


Рис. 14. Доля России на мировом рынке нефти в краткосрочном периоде

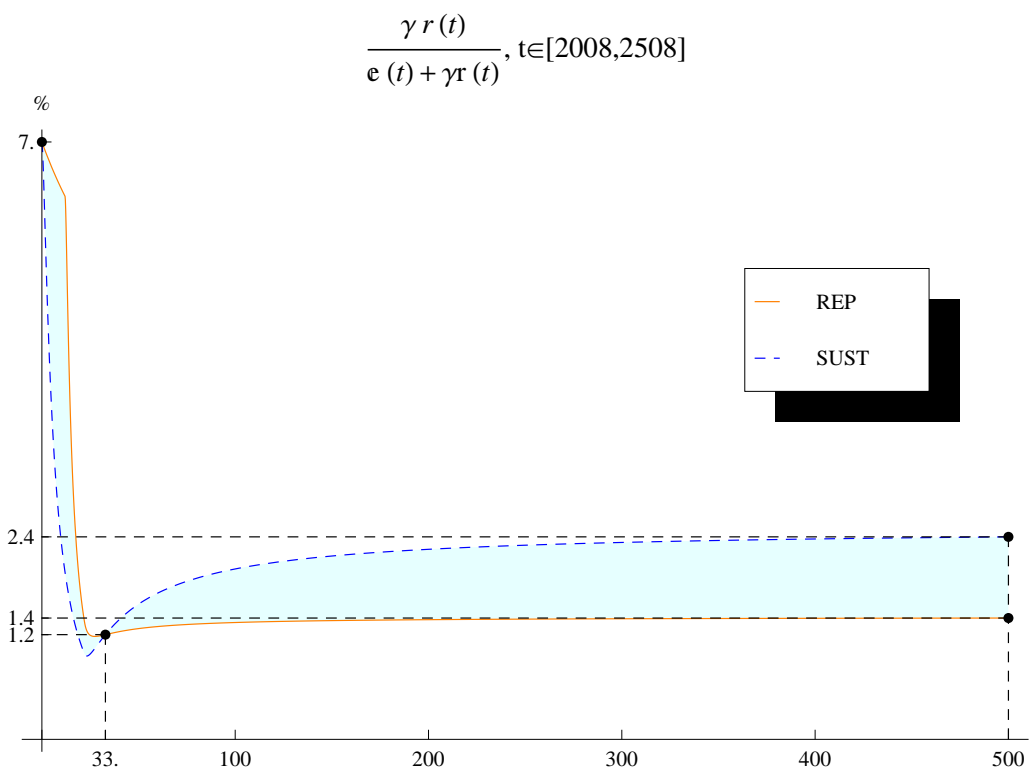


Рис. 15. Доля России на мировом рынке нефти в долгосрочном периоде

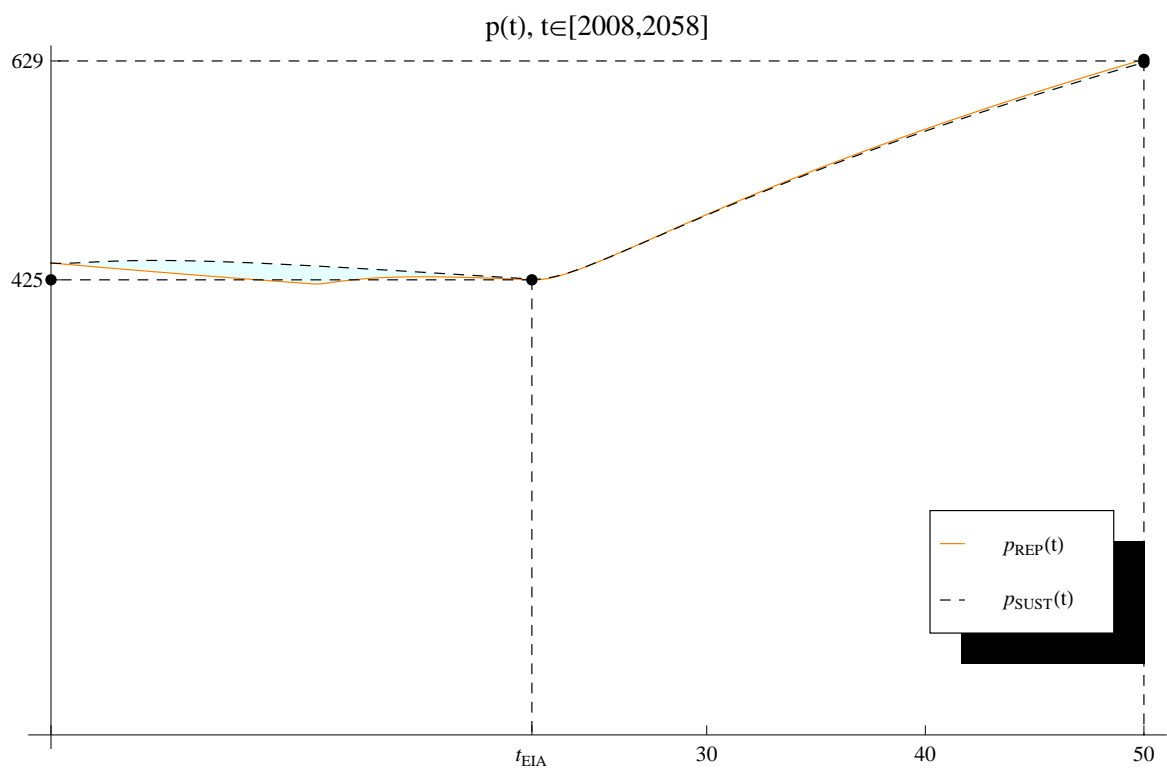


Рис. 16. Цены нефти на мировом рынке в краткосрочном периоде

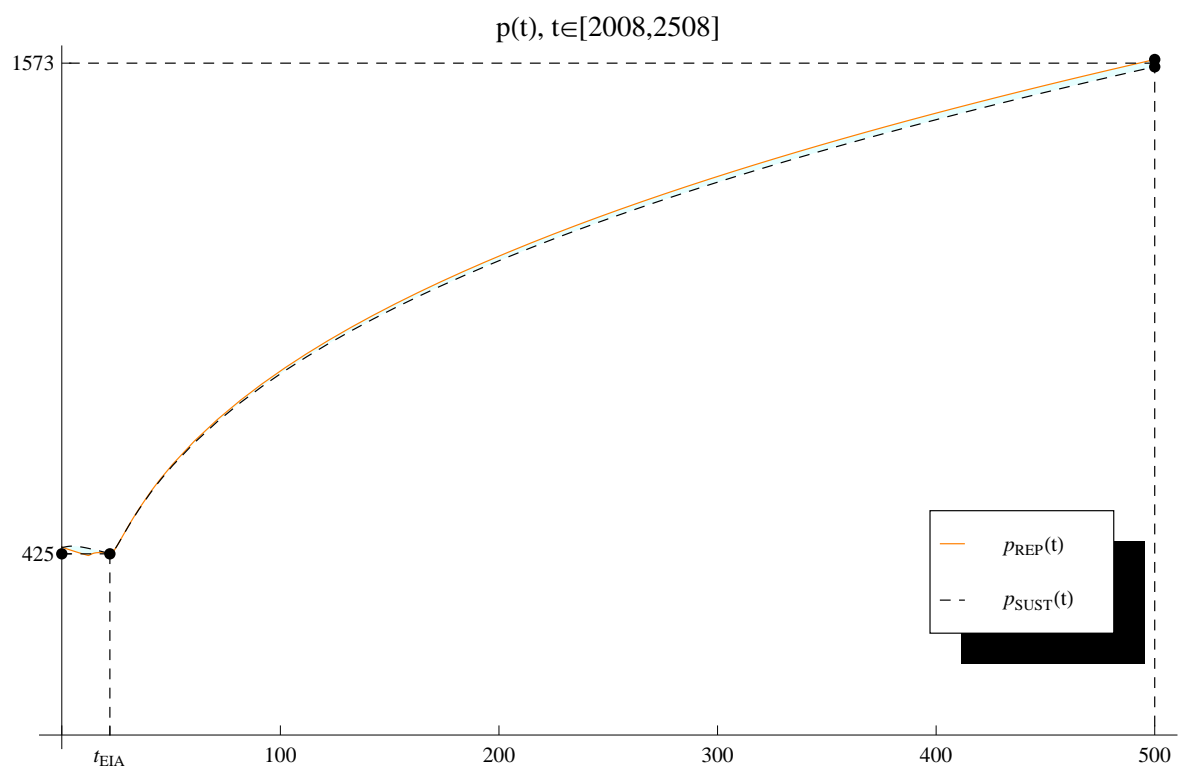


Рис. 17. Цены нефти на мировом рынке в долгосрочном периоде

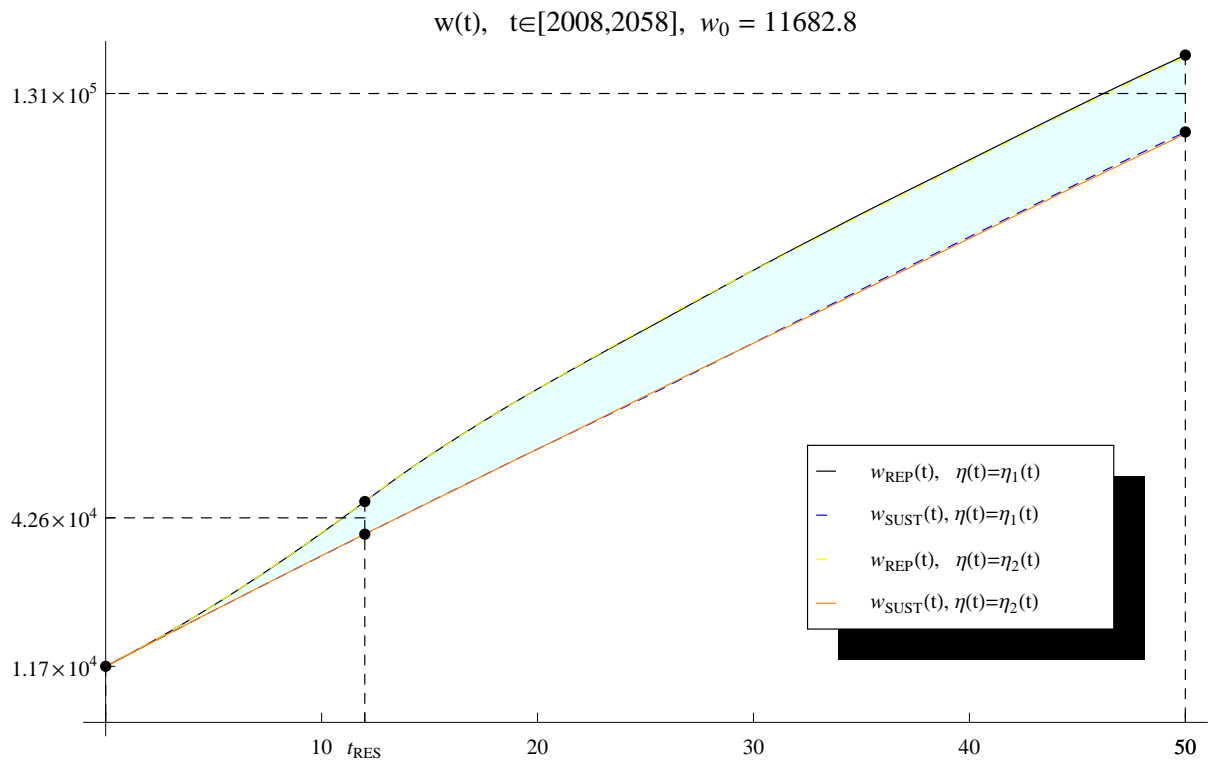


Рис. 18. Траектории совокупного капитала в краткосрочном периоде

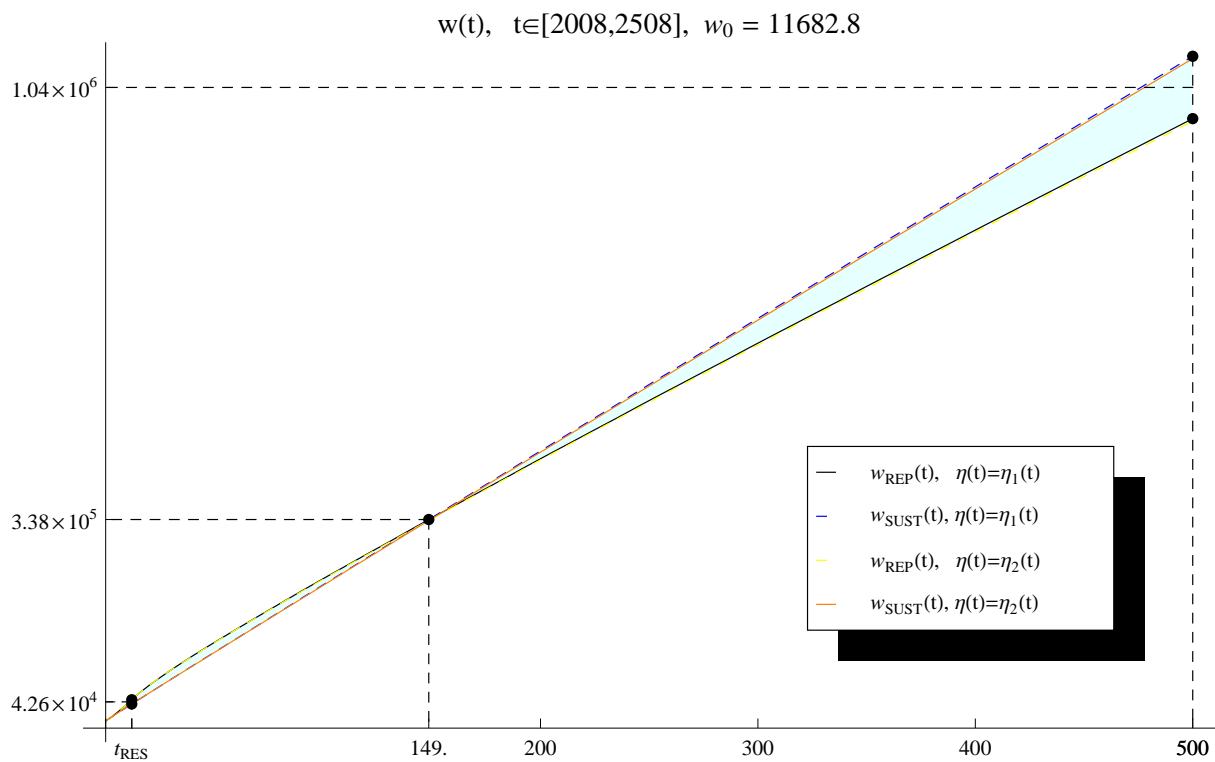


Рис. 19. Траектории совокупного капитала в долгосрочном периоде

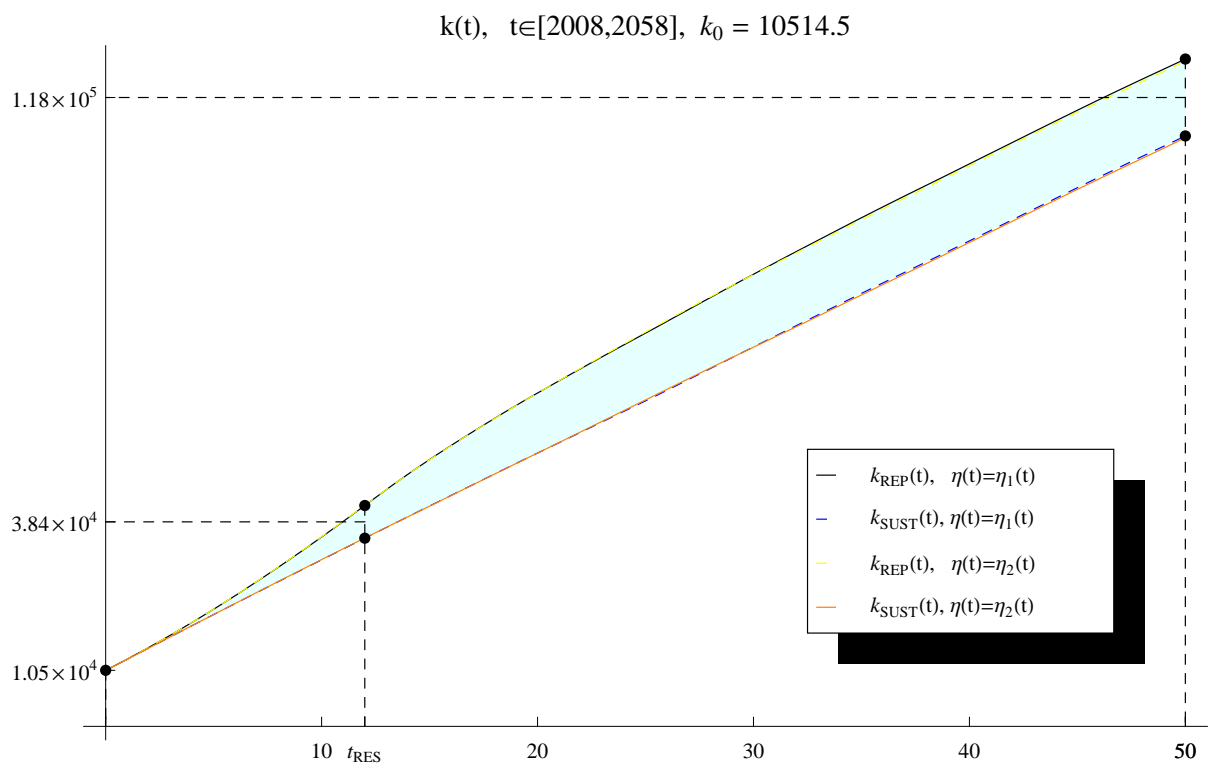


Рис. 20. Траектории внутреннего капитала в краткосрочном периоде

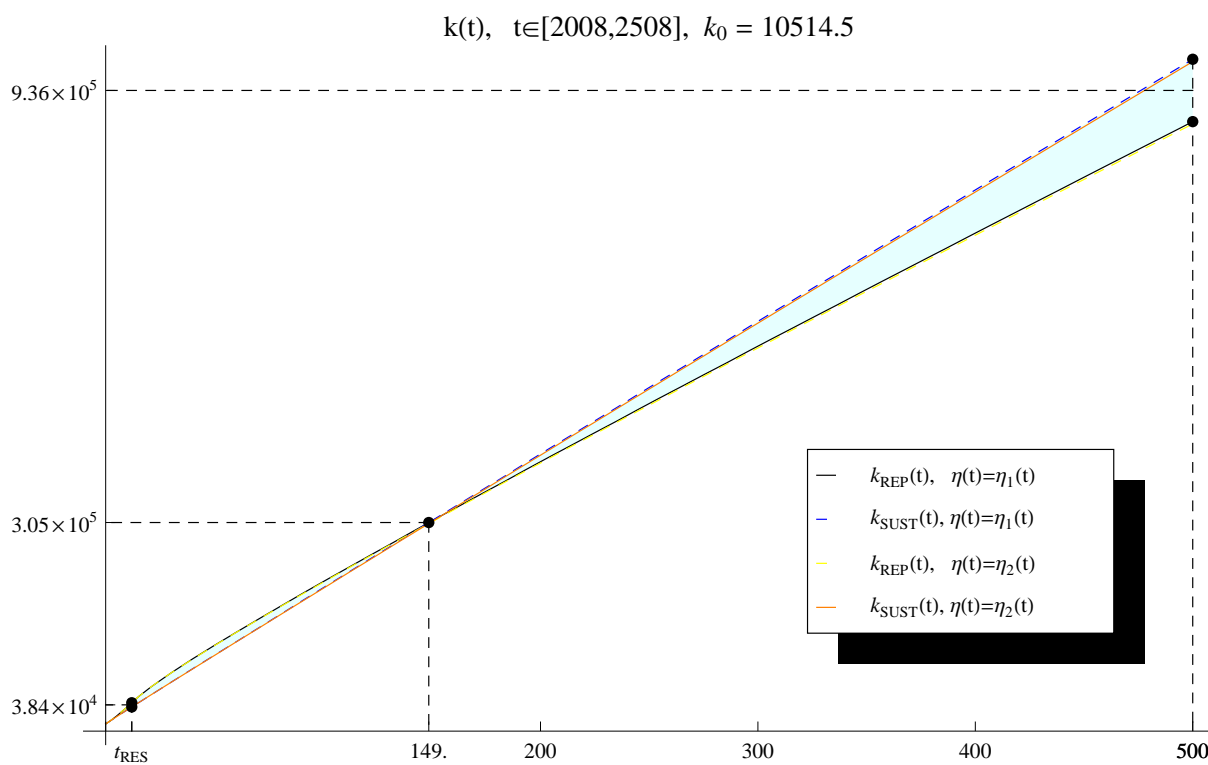


Рис. 21. Траектории внутреннего капитала в долгосрочном периоде

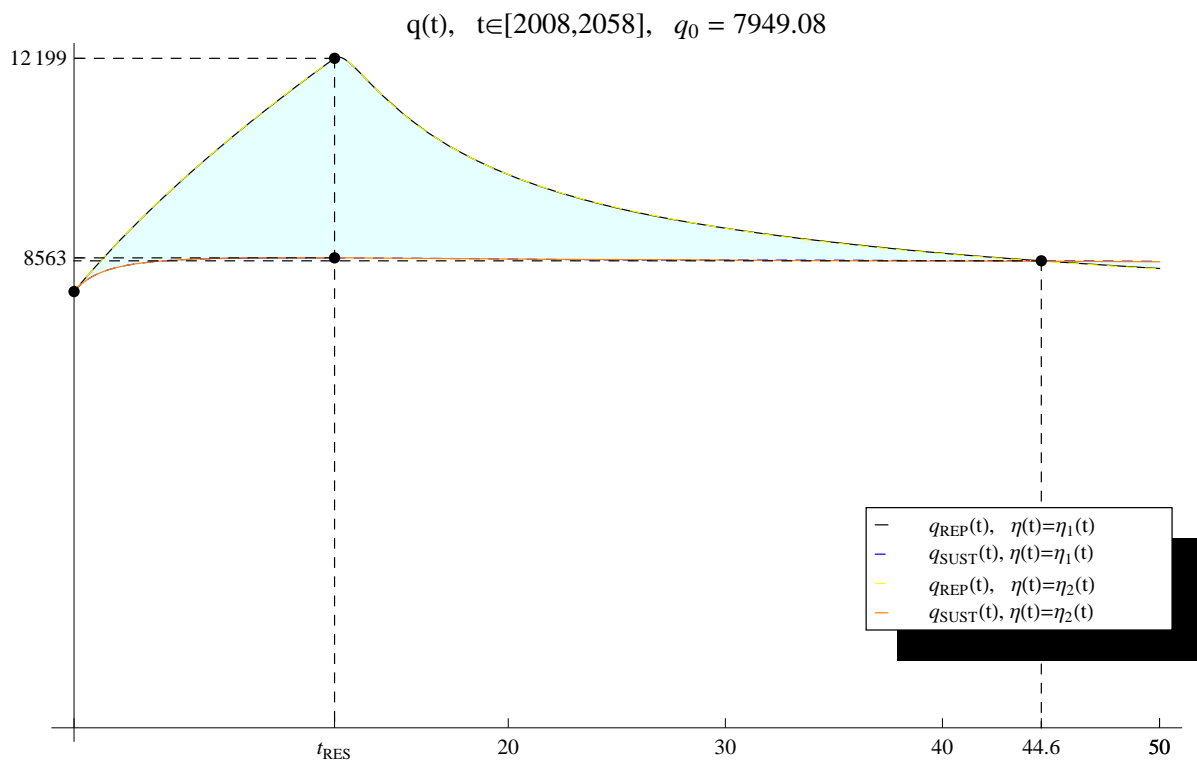


Рис. 22. Траектории внутреннего выпуска в краткосрочном периоде

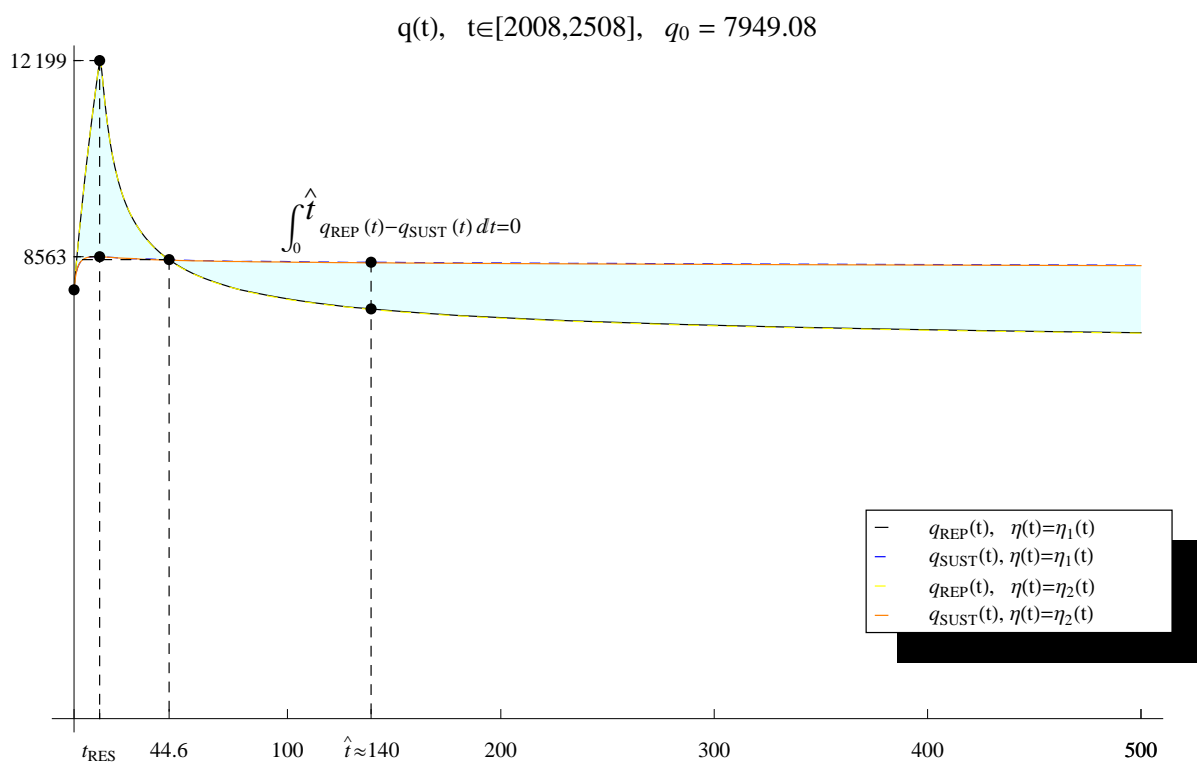


Рис. 23. Траектории внутреннего выпуска в долгосрочном периоде

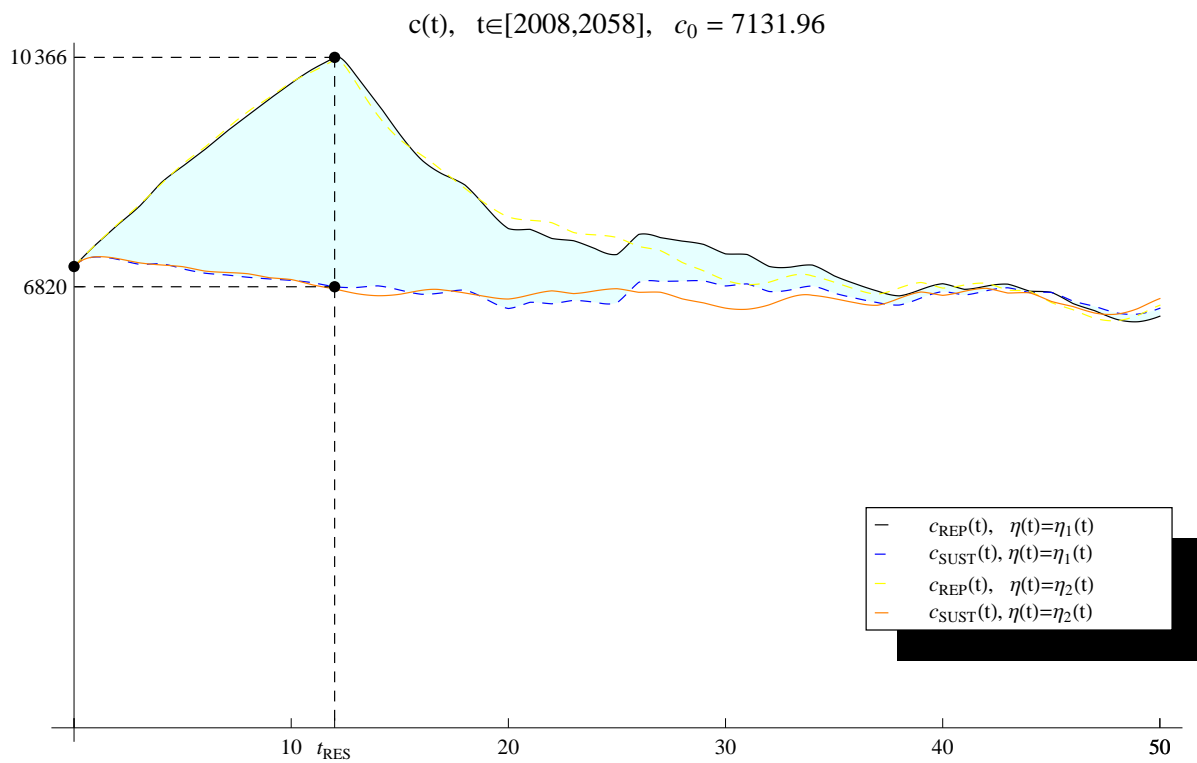


Рис. 24. Траектории потребления в краткосрочном периоде

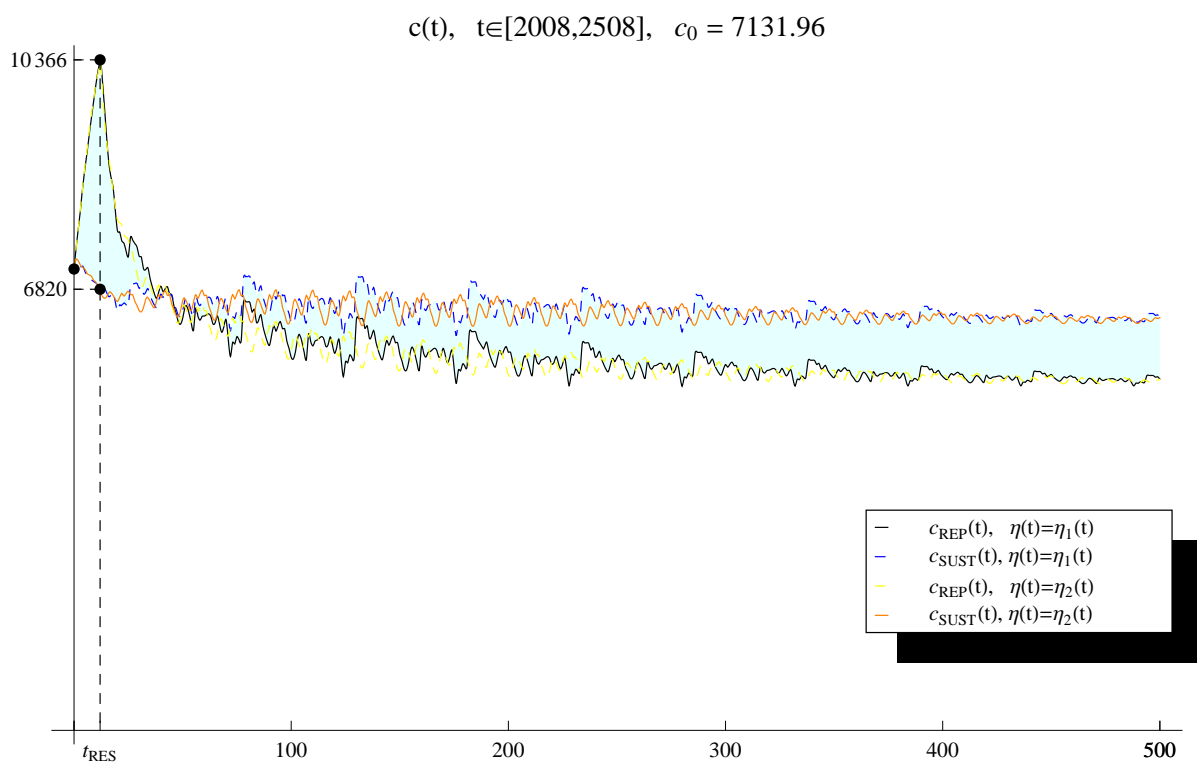


Рис. 25. Траектории потребления в долгосрочном периоде

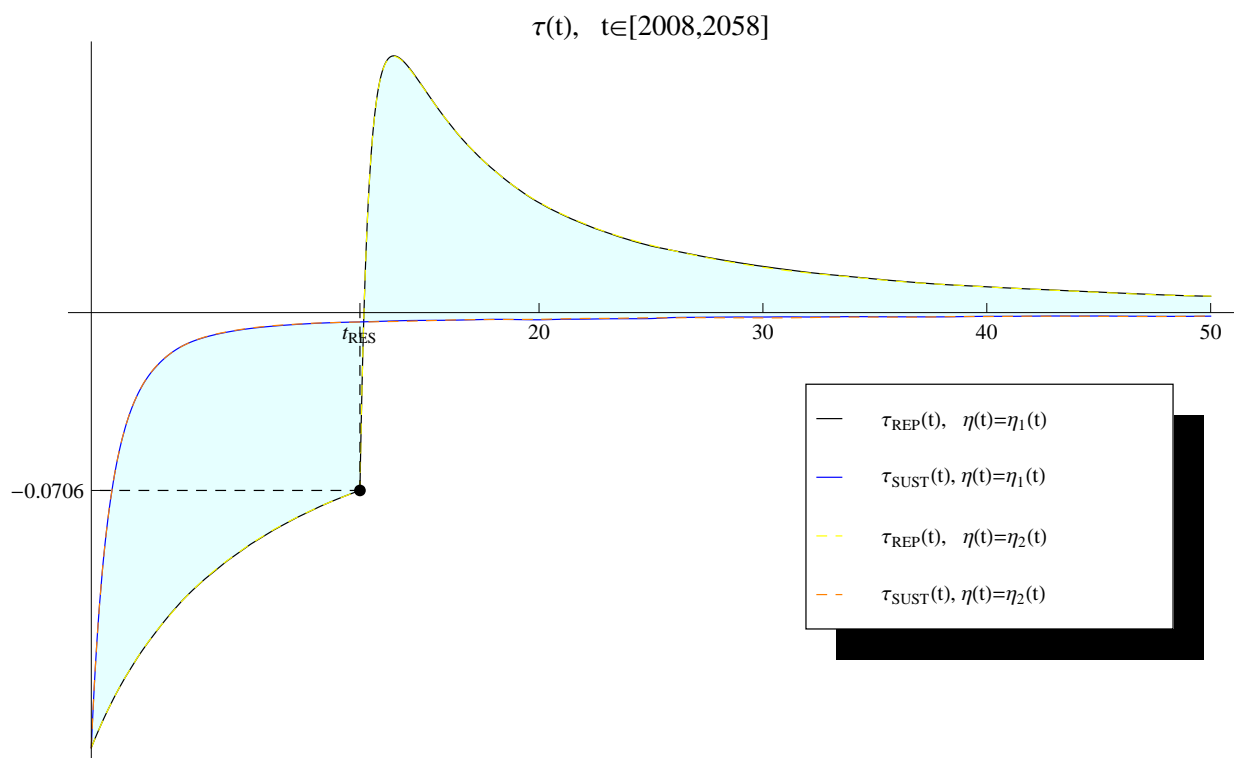


Рис. 26. Траектории “несовершенства экономики” $\tau(t)$ в краткосрочном периоде

4. Анализ результатов

На рисунках 18 - 26 приводится динамика экономических показателей для открытой модели российской экономики. Сравнение с аналогичными траекториями, полученными для закрытого случая (Рис. 2 - 10), показывает, что качественные выводы, сделанные в работах [11] и [20] о неблагоприятных последствиях стратегии ЭС-2020 для долгосрочного устойчивого развития России, сохраняются и для случая более детализированной модели, в которой доходы от экспорта нефти и, соответственно, капитал в виде активов за границей, не агрегированы в общую производственную функцию, а выступают в качестве самостоятельных слагаемых в балансовом уравнении (47). Действительно, как и в случае закрытой модели, сценарий ЭС-2020 дает более высокие экономические показатели в краткосрочном периоде для совокупного (и внутреннего) капитала, ВВП и потребления на душу населения (Рис. 18, 20, 22 и 24). Эти показатели, как и предполагается в ЭС-2020, достигаются за счет роста темпов добычи нефти (Рис. 2). Однако, последующая попытка перейти на экономически устойчивые (снижающиеся) темпы добычи приводит к резкому падению темпа роста экономических показателей, причем ВВП и потребление снижаются в абсолютных величинах и стабилизируются в долгосрочном периоде на уровнях, существенно меньших, чем для гипотетического сценария устойчивых темпов добычи с 2008 года (Рис. 23, 25). Результат является естественным следствием того, что экономика переходит к устойчивому развитию при менее благоприятных начальных условиях, чем в гипотетическом сценарии (меньший запас ресурса и более высокие темпы добычи). При этом, относительно высокий краткосрочный уровень потребления в сценарии ЭС-2020, не является устойчивым, поскольку получен экстенсивными методами, и, как следствие, неизбежно падает к более низкому устойчивому уровню, соответствующему начальным условиям, сложившимся к моменту окончания ЭС-2020.

Однако, нельзя сказать, что торговля ресурсом, введенная в модель, не приводит к новым качественным выводам в данной постановке задачи. При сравнении темпов изменений и уровней соответствующих экономических величин выясняется, что выводы о неблагоприятных экономических последствиях ЭС-2020, аналогичные закрытому случаю, получены для открытой модели при более низких значениях всех экономических показателей. Так, например, оказывается, что потребление, монотонно растущее в устойчивом сценарии для закрытой модели (Рис. 9, c_{SUST}), для открытого сценария имеет убывающий тренд в краткосрочном периоде (Рис. 24, c_{SUST}). Этот эффект можно объяснить тем, что в сложившихся на международном рынке условиях доход от единицы ресурса, проданной за рубеж меньше, чем производительность единицы ресурса внутри страны. Под условиями рынка мы подразумеваем, прежде всего то, что цена ресур-

са определяется, в большей мере, политикой картеля ОПЕК, чем объемами российской нефти. В этих условиях торговля ресурсом может иметь смысл только для достижения краткосрочных целей, и эти цели достигаются за счет существенного снижения уровня жизни всех оставшихся будущих поколений.¹⁸ Негативное влияние экспорта демонстрируется ниже в таблицах 1 и 2, а также на рисунках 27 - 32, совмещающих динамику экономики для открытого и закрытого случаев. Заметим также, что поведение “внешней” процентной ставки не оказывало влияния на качественные результаты сравнения независимо от значений параметров, меняющих поведение этого фактора в рамках правдоподобных сценариев.

¹⁸Осознание экономической неэффективности такой политики привело к появлению консервационистского движения на рубеже XIX - XX веков, что, в частности, послужило одним из стимулов для написания основополагающей статьи Гарольда Хотеллинга [34].

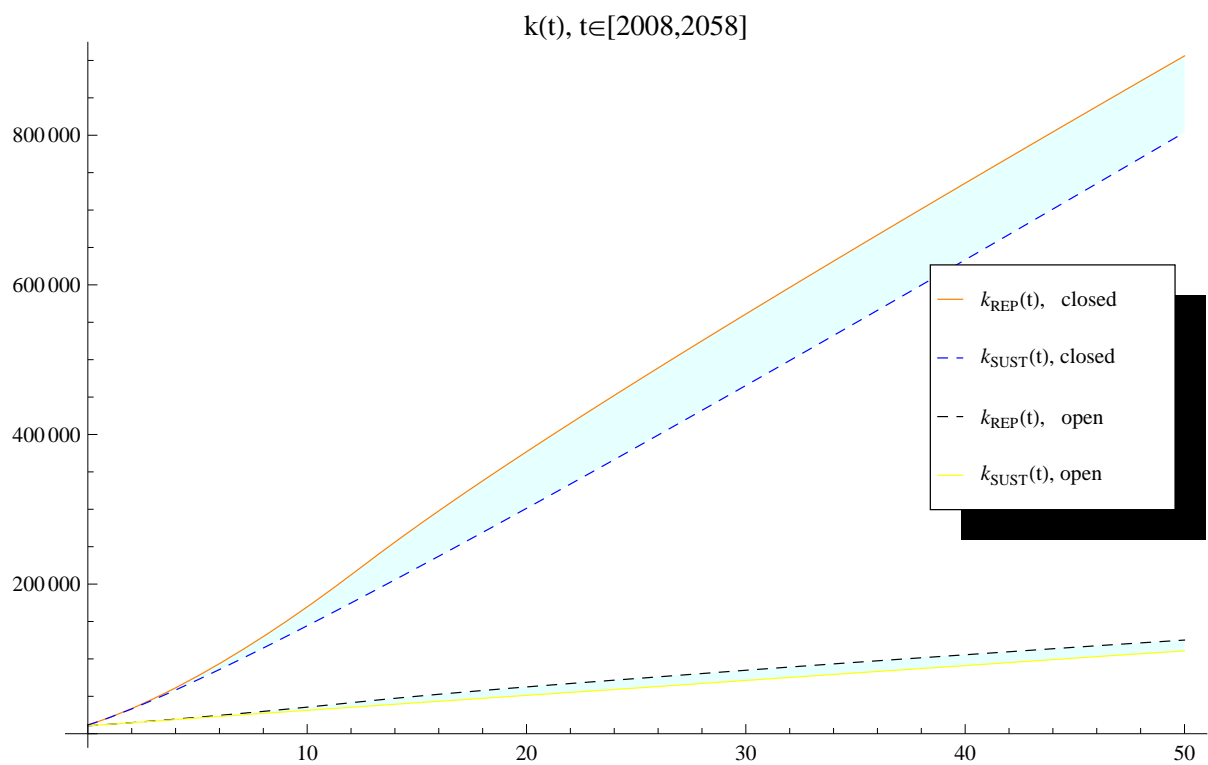


Рис. 27. Траектории внутреннего капитала в краткосрочном периоде

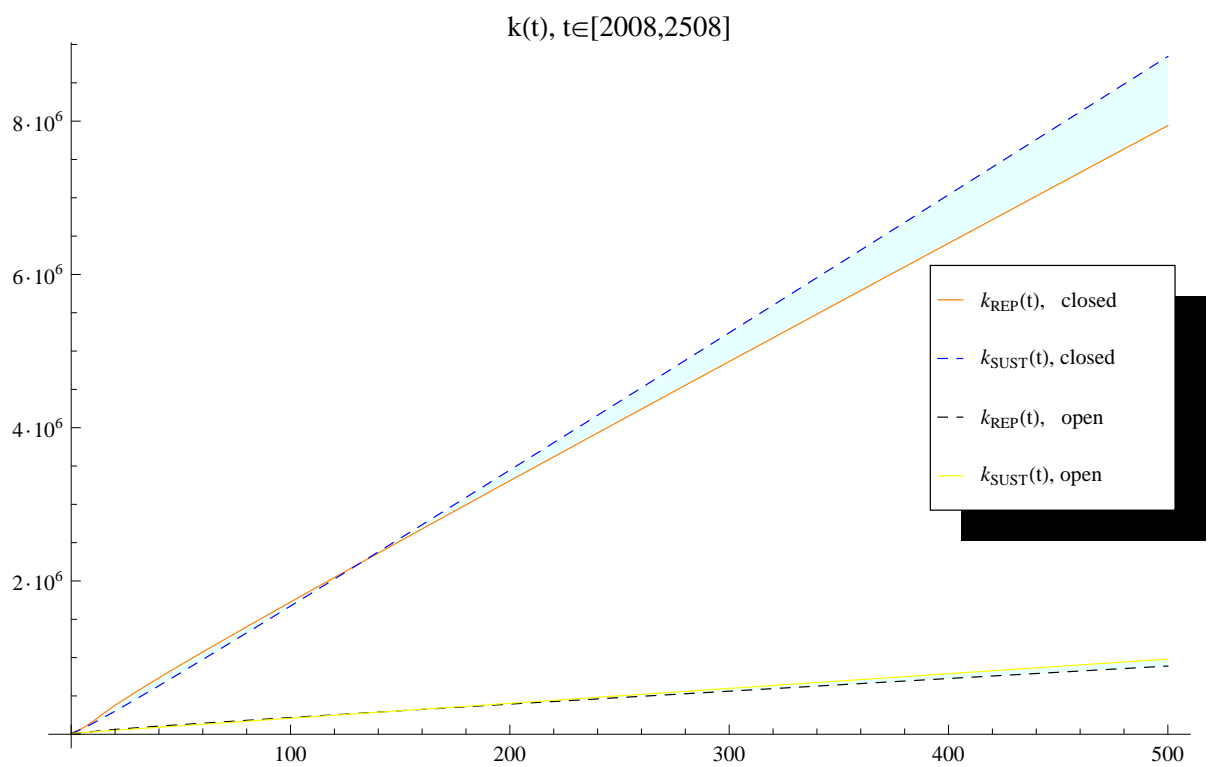


Рис. 28. Траектории внутреннего капитала в долгосрочном периоде

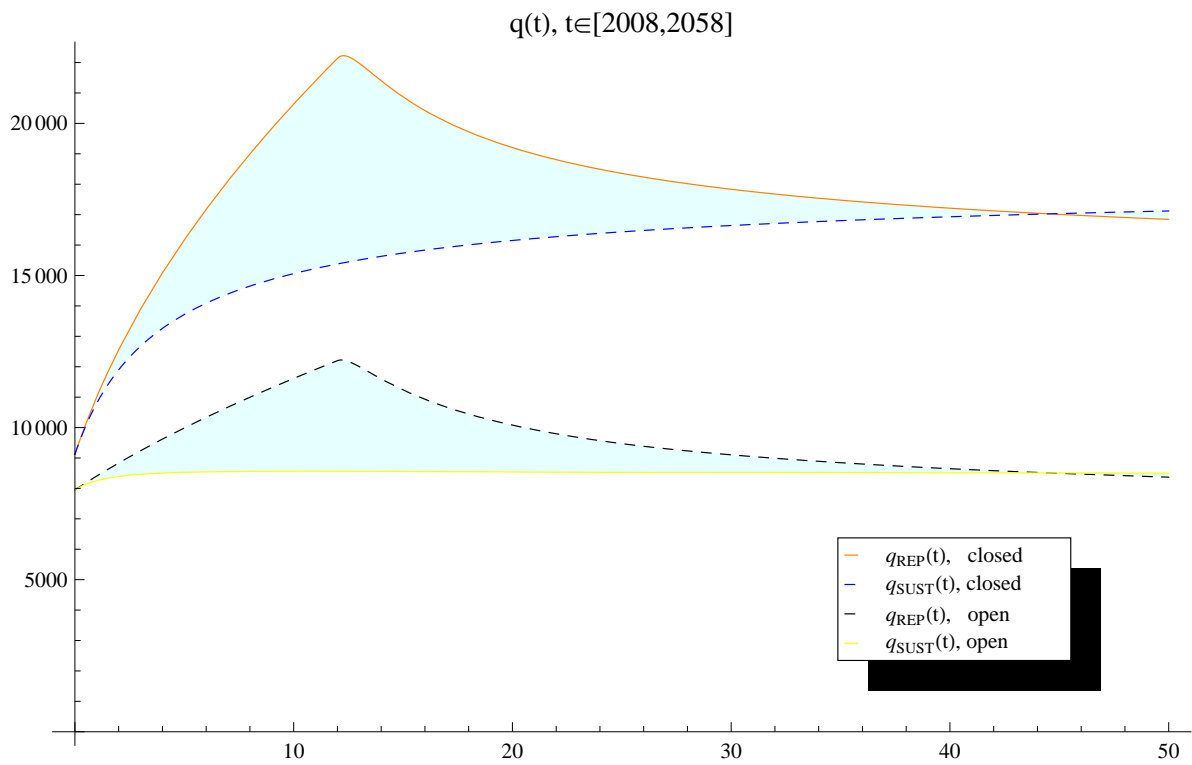


Рис. 29. Траектории внутреннего выпуска в краткосрочном периоде

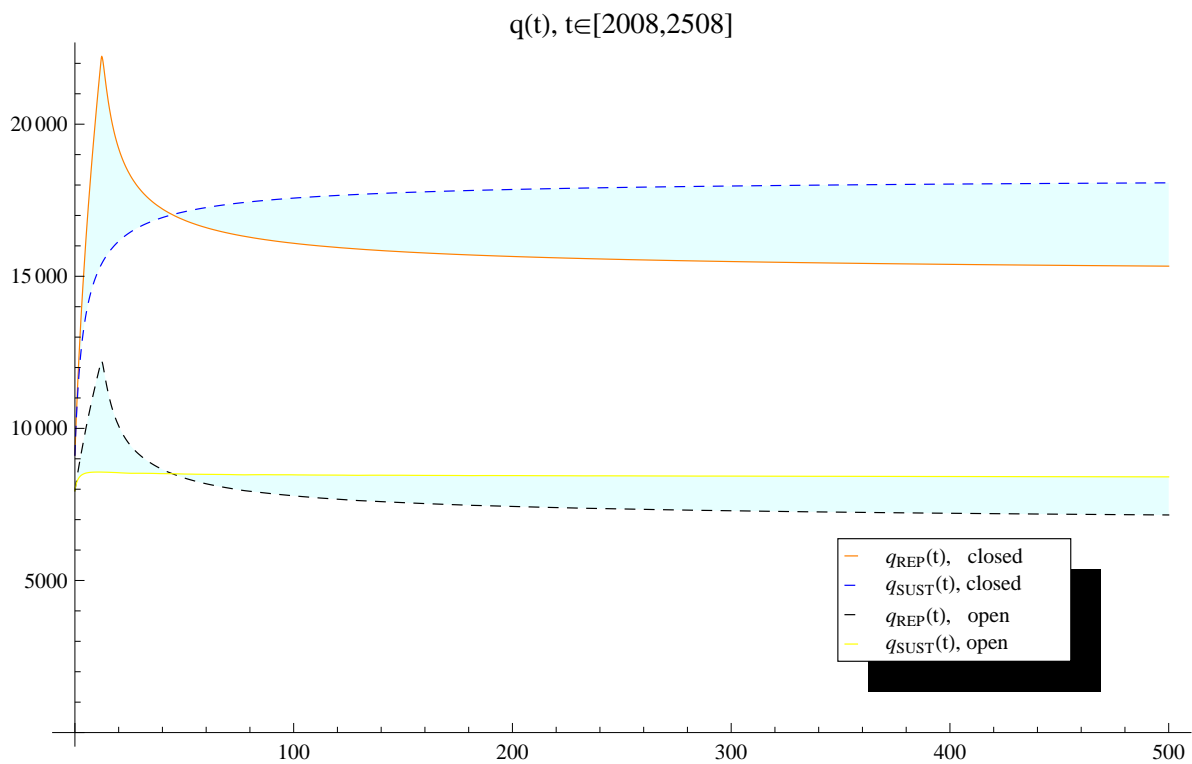


Рис. 30. Траектории внутреннего выпуска в долгосрочном периоде

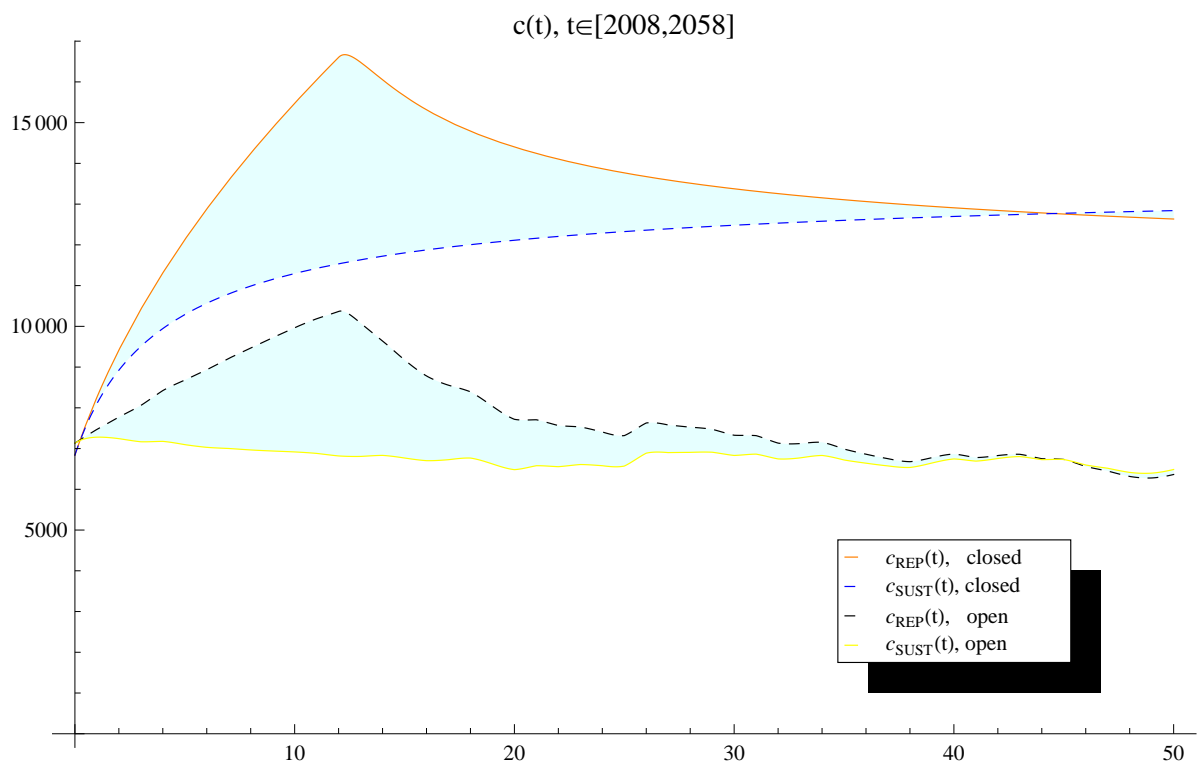


Рис. 31. Траектории потребления в краткосрочном периоде

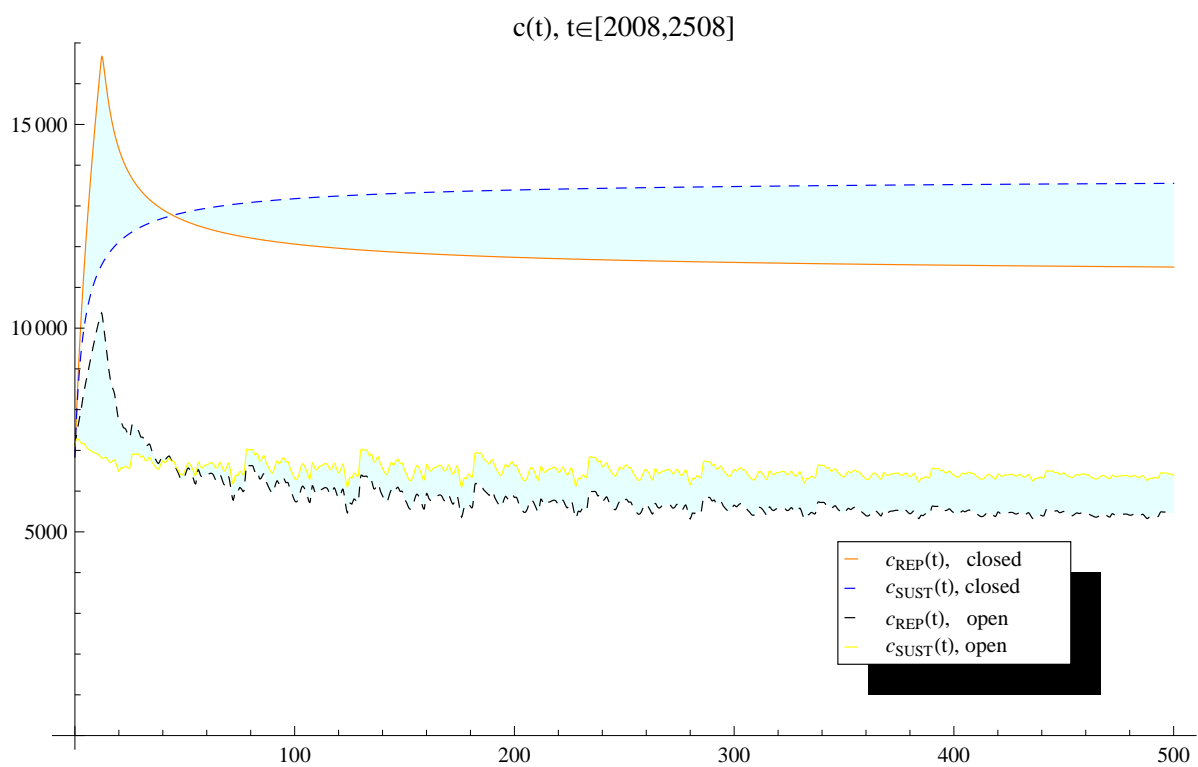


Рис. 32. Траектории потребления в долгосрочном периоде

Табл 1. Потребление в долларах США по среднегодовому курсу 2007 г. на душу населения в год в закрытой и открытой моделях экономики России для сценариев ЭС-2020 (c_{REP}) и устойчивых темпов добычи с 2008 года (c_{SUST}).

t	Закрытая экономика		Открытая экономика			
	c_{REP}	c_{SUST}	$c_{REP}, \eta_1(t)$	$c_{REP}, \eta_2(t)$	$c_{SUST}, \eta_1(t)$	$c_{SUST}, \eta_2(t)$
0	6839.4	6839.4	7131.9	7131.9	7131.9	7131.9
t_{RES}	16602.5	11534.4	10365.4	10325.5	6819.1	6785.0
t_{EIA}	14104.3	12207.2	7565.7	7809.1	6555.4	6755.8
50	12634.0	12841.0	6363.8	6533.6	6486.8	6636.4
100	12063.1	13177.6	5766.1	5863.8	6313.5	6406.5
200	11738.1	13390.6	5843.8	5496.2	6628.4	6270.4
500	11499.6	13554.1	5431.9	5428.0	6385.8	6381.6
1000	11398.8	13624.2	5274.0	5268.4	6293.7	6287.6
2000	11336.8	13667.4	5206.9	5204.3	6270.2	6267.5
5000	11289.8	13700.1	5155.9	5154.6	6252.5	6251.1
10000	11269.7	13714.1	5134.0	5133.2	6244.9	6244.0
15000	11261.8	13719.6	5125.3	5124.6	6241.8	6241.2
20000	11257.4	13722.7	5120.4	5119.9	6240.1	6239.6
25000	11254.5	13724.7	5117.3	5116.8	6239.0	6238.5
30000	11252.5	13726.1	5115.0	5114.6	6238.2	6237.8
40000	11249.7	13728.0	5112.0	5111.7	6237.1	6236.8
50000	11248.0	13729.2	5110.0	5109.8	6236.4	6236.2

Табл 2. Потребление в долларах США по среднегодовому курсу 2007 г. на душу населения в год в закрытой и открытой моделях экономики России для сценариев ЭС-2030 (c_{REP}) и и устойчивых темпов добычи с 2008 года (c_{SUST}).

t	Закрытая экономика		Открытая экономика			
	c_{REP}	c_{SUST}	$c_{REP}, \eta_1(t)$	$c_{REP}, \eta_2(t)$	$c_{SUST}, \eta_1(t)$	$c_{SUST}, \eta_2(t)$
0	6839.4	6839.4	7132.0	7132.0	7132.0	7132.0
$t_{REP} = t_{EIA}$	21304.7	12207.2	12219.0	12490.6	6555.4	6755.8
50	11477.6	12841.0	5755.3	5939.9	6486.8	6636.4
100	10022.0	13177.6	4773.9	4871.4	6313.6	6406.5
200	9296.0	13390.6	4669.8	4353.8	6628.4	6270.4
500	8783.4	13554.1	4166.7	4163.3	6385.8	6381.6
1000	8568.2	13624.2	3975.2	3970.5	6293.7	6287.6
2000	8435.6	13667.4	3882.0	3879.9	6270.2	6267.5
5000	8334.7	13700.1	3810.8	3809.7	6252.5	6251.1
10000	8291.4	13714.1	3780.0	3779.3	6244.9	6244.0
15000	8274.2	13719.6	3767.8	3767.2	6241.8	6241.2
20000	8264.6	13722.7	3761.0	3761.0	6240.1	6239.6
25000	8258.4	13724.7	3756.5	3756.2	6239.0	6238.5
30000	8254.0	13726.1	3753.4	3753.0	6238.2	6237.8
40000	8248.1	13728.0	3749.2	3749.0	6237.1	6236.8
50000	8244.3	13729.2	3746.4	3746.2	6236.4	6236.2

5. Заключение

В данной работе проводилось сравнительное исследование долгосрочных экономических последствий Энергетической стратегии России ЭС-2020 [10] с использованием наиболее правдоподобных и, ставших уже классическими, агрегированных моделей ресурсной экономики. В отличие от работ [11] и [20], анализировавших ЭС-2020 с точки зрения долгосрочного устойчивого развития и основанных на закрытой модели, мы предположили, что предельный доход от экспорта нефти может не совпадать с предельной производительностью ресурса во внутреннем производстве, и в этом случае эффект внешней торговли может качественно повлиять на результаты сравнительного анализа. Однако, как показано в Разделе 4, основные качественные результаты для “открытого” случая полностью совпали с результатами сравнения сценариев в закрытой экономике. В этом смысле оказалось, что закрытая модель может быть достаточно адекватной в *задачах сравнительного анализа* для российской экономики. Экономические последствия ЭС-2020 сравнивались с соответствующими показателями гипотетического сценария, предполагающего переход на устойчивые темпы добычи нефти (в смысле неубывающего в долгосрочном периоде потребления), начиная с 2008 года (устойчивый сценарий). В работе было показано, что

- 1) выполнение ЭС-2020 действительно дает краткосрочное повышение потребления на душу населения по сравнению с устойчивым сценарием;
- 2) попытка перейти на устойчивый сценарий после выполнения ЭС-2020 приводит к монотонно убывающему потреблению в долгосрочном периоде, которое стабилизируется на существенно более низком уровне, чем уровень устойчивого сценария.

Проведенные сравнения наглядно демонстрируют интуитивно понятный результат, о том что чем скорее начнется массовое внедрение энергосберегающих технологий и возобновляемой энергетики, тем более высоким будет устойчивый уровень благосостояния в долгосрочном периоде.

Оптимистичное предположение, использованное в работе, о том, что российская экономика с 2008 года или после реализации ЭС-2020 переходит на устойчивые темпы добычи нефти связано с существенностью этого ресурса и неприемлемостью сценария коллапса экономики. Однако, подготовленная концепция проекта следующей Энергетической стратегии до 2030 года (ЭС-2030) [3] по-прежнему предполагает достижение “энергетической безопасности” России за счет роста темпов добычи невозобновляемых ресурсов и роста экспорта.¹⁹ Эта политика планируется несмотря на известные существующие тенденции по уменьшению мирового спроса

¹⁹Последствия ЭС-2030 представлены в Табл. 2.

на нефть (за счет введения дешевающих невозобновляемых источников) и по удорожанию разведки и эксплуатации новых месторождений. Эти тенденции, очевидно, будут вести к уменьшению удельной прибыли от экспорта и требовать увеличения удельных инвестиций в добычу. В этих условиях продолжающаяся политика “обеспечения энергетической безопасности страны” за счет невозобновляемых ресурсов подобна попыткам азартного игрока, пытающегося укрепить свою материальную безопасность путем увеличения вложений в финансовую пирамиду.

Список литературы

- [1] Вдовин Ю. И. [2003] “Стратегия российской энергетики: с ветряком или с ‘мирным атомом’ ”? Bellona, *Возобновляемая энергетика*, 3 февраля 2003 г., http://www.bellona.ru/russian_import_area/energy/renewable/36721. 2
- [2] Кириллов Н. Г. [2005] “Стратегическая политика России — путь ‘в никуда’ ”? 5 сентября 2005, <http://www.energonew.ru/articles/art/1.htm>. 2
- [3] “Концепция энергетической стратегии России на период до 2030 года”: Прил. к научн., обществ.-дел. журналу “*Энергетическая политика*”. – М.: ГУ ИЭС, 2007. – 116 с. 2, 46
- [4] “Наше общее будущее: Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР)”: Пер. с англ. / Под ред. и с послесл. С. А. Евтеева и Р. А. Перелета / – М.: Прогресс, 1989. – 376 с. 4
- [5] Понтрягин, Л. С., Болтянский, В. Г., Гамкрелидзе, Р. В., Мищенко. Е. Ф. “Математическая теория оптимальных процессов”. – М.: Наука, 1983. – 391 с. 18
- [6] “Россия и страны мира”. [2008] Статистический сборник. – М.: Росстат, 2008, – 361 с. http://www.gks.ru/bgd/regl/b08_39/Main.htm . 26
- [7] Росстат [2009] “Номинальный объем произведенного ВВП в текущих ценах”. http://www.gks.ru/bgd/free/b01_19/IssWWW.exe/Stg/d000/i000610r.htm. 8
- [8] Росстат [2009] “О состоянии рынка нефти в январе-феврале 2009 года”. http://www.gks.ru/bgd/free/b04_03/IssWWW.exe/Stg/d02/63.htm. 25
- [9] Центральный Банк России. “Основные экономические показатели в 2007 году”. <http://www.cbr.ru/statistics/>. 8
- [10] “Энергетическая стратегия России на период до 2020 года”, 5 сентября 2003 г. 2, 28, 29, 46

- [11] Andreeva, A. A., Bazhanov, A. V. [2007] “Сценарии перехода к устойчивым темпам добычи нефти в России”. MPRA Paper № 5343, October 16, 2007.
Online at <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/5343/>. 2, 39, 46
- [12] Arrow, K., Dasgupta, P., Goulder L., Daily G., Ehrlich P., Heal, G., Levin, S., Maler, K. G., Schneider, S., Starrett, D., Walker, B. [2004] “Are we consuming too much?” *Journal of Economic Perspectives*, 18, pp. 147-172. 24
- [13] Arrow, K., Dasgupta, P. Mäler, K. G. [2003] “Evaluating projects and assessing sustainable development in imperfect economies”. *Environmental and Resource Economics*, 26, pp. 647-685. 24
- [14] Asheim, G. B. [2005] “Intergenerational ethics under resource constraints”. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 141(3), pp. 313-330. 6
- [15] Asheim, G. B., Buchholz, W., Hartwick J. M., Mitra, T., Withagen, C. [2007] “Constant savings rates and quasi-arithmetic population growth under exhaustible resource constraints”. *Journal of Environmental Economics and Management*, 53, pp. 213-229. 25
- [16] Bazhanov, A. V. [2006] “Decreasing of Oil Extraction: Consumption behavior along transition paths”. MPRA Paper № 469, October 16, 2006.
Online at <http://mpra.ub.unimuenchen.de/469/>. 54
- [17] Bazhanov, A. V. [2008] “Maximin-optimal sustainable growth with nonrenewable resource and externalities”. EERI Research Paper Series № 11/2008.
Online at http://ideas.repec.org/p/eei/rpaper/eeri_rp_2008_11.html. 25, 26
- [18] Bazhanov, A. V. [2008] “Sustainable growth in a resource-based economy: the extraction-saving relationship”. MPRA Paper № 12350, December 24, 2008.
Online at <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/12350/>. 15, 25, 54
- [19] Bazhanov, A. V. [2007] “The transition to an oil contraction economy”. *Ecological Economics*, October 15, 2007, 64, № 1: pp. 186-193. 6, 52
- [20] Bazhanov, A. V., Tyukhov, I. I. [2008] “Энергетическая стратегия России и развитие возобновляемой энергетики”. MPRA Paper № 13702, March 05, 2009.
Online at <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/13702/>. 2, 39, 46
- [21] Carlson, D. A. Haurie, A. B. [1987] “Infinite Horizon Optimal Control”. Berlin: Springer-Verlag. 254 p. 18

- [22] Cambridge Energy Research Associates® [2006] “Why the peak oil theory falls down: myths, legends, and the future of oil resources”. Online at <http://www.cera.com/aspx/cda/client/report/reportpreview.aspx?CID=8437&KID=>, December 20, 2007. 8
- [23] Dasgupta, P., Eastwood, R., Heal G. [1978] “Resource Management in a Trading Economy” *The Quarterly Journal of Economics*, 92, № 2: pp. 297-306. 3, 17, 19, 20, 21, 23, 24
- [24] Dasgupta, P., Heal, G. [1974] “The optimal depletion of exhaustible resources”. *Review of Economic Studies*, 1974, 41: pp. 3-28. 2, 5, 22
- [25] Dasgupta, P., Heal, G. [1979] “Economic Theory and Exhaustible Resources”. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 501 p. 7, 26
- [26] Energy Information Administration [2008] “Annual Energy Review. Energy Information Administration”. Report № DOE/EIA-0384(2007), June 23, 2008. Online at: <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/txt/stb0518.xls>. 29
- [27] Energy Information Administration “World Crude Oil Prices”, Russia, Urals 32°. Online at <http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/wepcuralsw.htm>. 29
- [28] Fuss, M. A. [1977] “The demand for energy in Canadian manufacturing”. *Journal of Econometrics*, 5, № 1: pp. 89-116. 5
- [29] Gaudet, G. [2007] “Natural Resource economics under the rule of Hotelling”. *Canadian Journal of Economics*, 40: pp. 1033-1059. 6
- [30] Griffin, J. M., Gregory, P. R. [1976] “An intercountry translog model of energy substitution responses”. *American Economic Review*, 66, № 5: pp. 845-857. 5
- [31] Grimaud, A., Rouge, L. [2005] “Polluting non-renewable resources, innovation, and growth: welfare and environmental policy”. *Resource and Energy Economics*, 27: pp. 109-129. 25
- [32] Halvorsen, R., Ford, J. [1979] “Substitution among energy, capital and labor inputs in American manufacturing”. *Advances in the Economics of Energy and Resources*. 1. Ed.: R. Pindyck. Greenwich, Conn.: JAI Press. 5
- [33] Hartwick, J. M. [1977] “Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources”. *American Economic Review*, 67: pp. 972-974. 6, 26

- [34] Hotelling, H. [1931] “The economics of exhaustible resources”. *Journal of Political Economy*, 39, № 2: pp. 137-175. [40](#)
- [35] Houthakker H. S., Kennedy M. [1974] “Demand for energy as a function of price”. Mimeo, Committee for Economic Development, December 1974. [29](#)
- [36] IEA [2004] “Analysis of the impact of high oil prices on the global economy”. International Energy Agency. May 2004. Online at http://www.iea.org/Textbase/Papers/2004/High_Oil_Prices.pdf. [28](#), [29](#)
- [37] Lipsey, R. G., Carlaw, K. I. [2004] “Total factor productivity and the measurement of technological change”. *Canadian Journal of Economics*, 37: pp. 1118-1150. [25](#)
- [38] Magnus, J. R. [1979] “Substitution between energy and non-energy inputs in the Netherlands”. 1950-1976. *International Economic Review*, 20, № 2: pp. 465-484. [5](#)
- [39] Neumayer, E. [1999] “Weak versus Strong Sustainability: Exploring the Limits of Two Opposing Paradigms”. Cheltenham, UK: Edward Elgar: 294 p. [4](#)
- [40] Neumayer, E. [2000] “Scarce or abundant? The economics of natural resource availability”. *Journal of Economic Surveys*, 14, № 3: pp. 307-335. [5](#)
- [41] Nordhaus, W.D., Boyer J. [2000] “Warming the World: Economic Models of Global Warming”. Massachusetts, USA: MIT Press: 258 p. [8](#), [25](#)
- [42] Nordhaus, W. D., Tobin J. [1972] “Is economic growth obsolete?”. Economic Growth, 5th Anniversary Colloquium, V, National Bureau of Economic Research, New York. [5](#)
- [43] “Worldwide look at reserves and production”. *Oil & Gas Journal*, 2007, 105, № 48: pp. 24-25. [8](#), [24](#), [28](#), [29](#)
- [44] Pindyck, R. S. [1979] “Interfuel substitution and the demand for energy: an international comparison”. *Review of Economics and Statistics*, 61, № 2: pp. 169-179. [5](#)
- [45] Solow, R.M. [1974] “Intergenerational equity and exhaustible resources”. *Review of Economic Studies*, 41: pp. 29-45. [2](#), [4](#), [5](#)
- [46] Solow, R.M. [1986] “On the intergenerational allocation of natural resources”. *Scandinavian Journal of Economics*, 88, № 1: pp. 141-149. [25](#)

- [47] Stiglitz, J. [1974] “Growth with exhaustible natural resources: Efficient and optimal growth paths”. *Review of Economic Studies*, 41: pp. 123-137. [2](#), [5](#), [25](#)
- [48] Stollery, K. R. [1998] “Constant utility paths and irreversible global warming”. *Canadian Journal of Economics*, 31, № 3: pp. 730-742. [26](#)
- [49] Takayama, A. [1980] “Optimal technical progress with exhaustible resources”. Kemp, M., Long, N.V. (Eds.), *Exhaustible Resources, Optimality and Trade*: pp. 95-110. [25](#)
- [50] UN, [2004] “World Population to 2300”. United Nations, New York. Online at <http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf>. [26](#)

7. Приложения

7.1. Вывод коэффициентов рациональной переходной кривой

7.1.1. Формулировка задачи

Для правительства закрытой экономики, переходящего на убывающие траектории добычи ресурсов, естественно пытаться минимизировать негативное воздействие этого перехода на краткосрочные экономические показатели. Процентное изменение ВВП можно записать как

$$\frac{\dot{q}}{q} = \alpha \frac{\dot{k}}{k} + \beta \frac{\dot{r}}{r}. \quad (54)$$

Так как экономика переходит к снижающимся темпам добычи с ($\dot{r} < 0$), правительство стремится уменьшить негативное влияние убывающей добычи на выпуск q . Для определения переходной траектории можно рассмотреть следующие “краткосрочные” критерии, “смягчающие” процесс перехода к устойчивым темпам добычи:

- 1) критерий “плавного перехода”, который дает оптимальную траекторию с минимальным абсолютным значением отрицательного ускорения $A(t) = \dot{r}(t)$. Другими словами, задача имеет вид:

$$F_1(r(t)) = \min_t A(t) \rightarrow \max_{r(t)}, \text{ с ограничениями: } r(0) = r_0, \int_0^{\infty} r(t) dt = s_0, \quad (55)$$

где последнее условие подразумевает эффективность использования существенного ресурса.

Однако, отрицательное ускорение $\dot{r}(t)$ влияет на процентное изменение ВВП не прямо, а как числитель дроби $\dot{r}(t)/r(t)$. Исходя из этого, мы можем сформулировать

2) критерий “минимального шока на ВВП”, а именно:

$$F_2(r(t)) = \min_t \left[\frac{\dot{r}(t)}{r(t)} \right] \rightarrow \max_{r(t)}, \quad (56)$$

при тех же начальных условиях.

Наконец, мы можем принять во внимание первый член в уравнении (54), который способен изменять точку максимального влияния отрицательного ускорения, или, другими словами, мы можем применить максимальный критерий ко всему выражению \dot{q}/q , что может быть сформулировано как

3) критерий “максимального процентного изменения ВВП”:

$$F_3(r(t)) = \min_t \left[\alpha \frac{\dot{k}(t)}{k(t)} + \beta \frac{\dot{r}(t)}{r(t)} \right] \rightarrow \max_{r(t)} \quad (57)$$

при тех же ограничениях.

7.1.2. Рациональная переходная кривая

Переходная кривая может быть построена в том же классе рациональных функций, что и кривая Хартвика (см., например, [19]):

$$r(t) = r_0 \left[1 + \frac{r_0 \beta t}{s_0 (\alpha - \beta)} \right]^{-\frac{\alpha}{\beta}}. \quad (58)$$

Различие лишь в числителе, который в выражении для ускорения $A = \dot{r}$ должен зависеть от t с отрицательным коэффициентом, чтобы контролировать “плавный переход” в окрестности $t = 0$. Например, $A(t)$ может иметь вид

$$A(t, b, c, d) = \dot{r}(t) = \frac{A_0 + bt}{(1 + ct)^d}, \quad (59)$$

где $b < 0$, $c > 0$, $d > 1$ (для сходимости $A(t) \rightarrow -0$ при $t \rightarrow \infty$). Согласно уравнению (59), $r(t)$ зависит от b , c и d :

$$r(t) = \frac{-\frac{A_0 + b/[c(d-2)]}{c(d-1)} + \frac{bt}{c(2-d)}}{(1 + ct)^{d-1}}.$$

Заметим, что постоянная интегрирования выражения $\dot{r}(t) = A(t)$ должна быть равна нулю для сходимости интеграла $\int_0^\infty r(t) dt$ и, кроме того, для сходимости этого интеграла d должно быть больше трех. Затем мы получаем условие $r_0 = -[A_0 + b/[c(d-2)]] [c(d-1)]$, из которого можно выразить b :

$$b(c, d) = -c(d-2) [r_0 c(d-1) + A_0], \quad (60)$$

и переходная кривая зависит теперь от c и d :

$$r(t) = r_0 \frac{1 + (c(d-1) + A_0 r_0^{-1})t}{(1+ct)^{d-1}}, \quad (61)$$

Коэффициент c можно найти из условия конечности ресурса $s_0 = \int_0^\infty r(t)dt$:

$$\frac{s_0}{r_0} = \int_0^\infty (1+ct)^{1-d} dt + [c(d-1) + A_0/r_0] \int_0^\infty \frac{t}{(1+ct)^{d-1}} dt = \frac{1 + \{r_0 c(d-1) + A_0\} / \{r_0 c(d-3)\}}{c(d-2)},$$

что означает, что c является решением квадратного уравнения

$$c^2 \frac{s_0}{r_0} - c \frac{2}{d-3} - \frac{A_0}{r_0(d-2)(d-3)} = 0.$$

Единственный подходящий ($c > 0$) корень:

$$c(d) = \left[\frac{r_0}{d-3} + \sqrt{\frac{r_0^2}{(d-3)^2} + \frac{s_0 A_0}{(d-2)(d-3)}} \right] \frac{1}{s_0}. \quad (62)$$

Итак, у нас есть единственный независимый параметр d , который определяет форму кривой, включая её пик.

7.1.3. Потребление вдоль переходных кривых

Проверим наши краткосрочные критерии на совместимость с долгосрочной целью — убывающим потреблением. Для простоты исследуем случай, когда ресурсная рента всегда инвестируется в капитал и нет запаздываний между моментом инвестирования и соответствующим увеличением капитала. Единственным поводом для изменения существующего подхода к исчерпанию ресурса является то, что устойчивая траектория добычи существенного для экономики ресурса должна быть убывающей и асимптотически стремиться к нулю.

Заметим, что постоянное потребление на душу населения на всем временном промежутке для данной постановки задачи является результатом:

- 1) инвестирования всей нефтяной ренты в капитал без запаздывания,
- 2) выполнения правила Хотеллинга.

Рациональные переходные кривые (59) удовлетворяют только первому условию в отличие от кривой Хартвика (58), которая получена из правила Хотеллинга, потому и удовлетворяет его в точности. Чтобы проверить поведение потребления вдоль некоторой траектории, нам следует проверить выполнение правила Хотеллинга вдоль кривой. Для стандартного случая $\dot{q} = f_k \dot{k} + f_r \dot{r}$. Далее $\dot{f}_r = f_r \left(\alpha \frac{\dot{k}}{k} + (\beta - 1) \frac{\dot{r}}{r} \right)$ или

$$\dot{f}_r f_r = f_k \left[\frac{\dot{k}}{q} - (1 - \beta) \frac{k \dot{r}}{\alpha q r} \right]. \quad (63)$$

Очевидно, что для кривой Хартвика $[\cdot] \equiv 1$, потому что $\dot{r}/r = -\alpha q/k$ и $\dot{k} = \beta q$.

Отсюда следует, что если $[\cdot] < 1$, то $\dot{f}_r/f_r < f_k$, а, следовательно, и $\alpha q/k + \dot{r}/r > 0$. Из (54) и правила Хартвика следует, что $\dot{q} > 0$. Аналогично, при $[\cdot] > 1$ выпуск $\dot{q} < 0$. В общем случае $\text{sgn } \dot{q} = \text{sgn } \{1 - [\cdot]\}$. Итак, чтобы исследовать поведение потребления $c = (1 - \beta)q$ в долгосрочном периоде вдоль переходной кривой, нужно проверить асимптотическое поведение $[\cdot]$ в уравнении (63)

Утверждение 1. Если экономика с производственной функцией $q = k^\alpha r^\beta$ такая, что

- 1) ресурсная рента полностью инвестируется в капитал;
- 2) нет запаздываний между моментом инвестирования и соответствующим увеличением капитала;
- 3) темпы добычи $r(t)$ удовлетворяют условию

$$\dot{r}(t) = \frac{A_0 + bt}{(1 + ct)^d}, \quad b < 0, \quad c > 0, \quad d > 3,$$

тогда асимптотическое поведение $q(t)$ для различных β будет иметь вид:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \text{sgn } \dot{q}(t) = \begin{cases} -1, & \beta(d - 2) \geq 1, \\ \text{sgn } L(d, \alpha, \beta), & \beta(d - 2) < 1, \end{cases} \quad (64)$$

$$\text{где } L(d, \alpha, \beta) = \frac{\alpha - \beta(d - 2)}{\alpha - \alpha\beta(d - 2)}.$$

Доказательство Утверждения 1 есть в [16] и, в более общем виде, в [18]. Упрощенное по сравнению с [16] выражение для $L(d, \alpha, \beta)$ было получено прямой подстановкой (60) и (62) для $b(c(d), d)$ и $c(d)$.

Следствие 1. При условиях Утверждения 1 потребление $c(t)$

- 1) асимптотически убывает, если $d > \alpha/\beta + 2$;
- 2) асимптотически постоянно, если $d = \alpha/\beta + 2$;
- 3) асимптотически возрастает, если $3 < d < \alpha/\beta + 2$,

где d – это управляющая переменная переходной кривой (61).

Доказательство. Заметим, что для $\beta(d - 2) < 1$ или $d < 1/\beta + 2$ знаменатель $L(d, \alpha, \beta)$ положителен. Знак $L(d, \alpha, \beta)$ определен числителем. Так как $c(t) = (1 - \beta)q(t)$ и $\text{sgn } \dot{c} = \text{sgn } \dot{q}$, то, подставляя выражения для d в $L(d, \alpha, \beta)$ в уравнении (64), мы подтверждаем справедливость Следствия 1.

В случае, если $\beta(d - 2) \geq 1$ или $d \geq 1/\beta + 2$, мы определяем знак dc/dt первой строчкой в (64), которая входит в рассмотренный случай 1) Следствия 1.