



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.33.013:004.416 «311»

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-121-132>

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

© Л.Н. Такайшвили¹

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. Вычислительный эксперимент при исследовании перспектив развития угледобывающих регионов достаточно трудоемкий и слабоформализуемый, что связано с особенностями угольной промышленности как объекта исследования. В статье представлены имитационные модели, разработанные в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН для исследования перспектив развития угольной промышленности России и, в частности, ее восточных регионов. Модели реализованы в рамках информационно-модельного комплекса (ИМПК) «Уголь». **ЦЕЛЬ.** Рассмотрение возможности реализации названных имитационных моделей для исследования перспектив развития угольной промышленности. **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ.** В исследованиях использованы методы системного анализа, оценки инвестиционных проектов принятия решений в условиях неопределенности. Для верификации моделей использованы официальные статистические данные и прогнозы развития экономики регионов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Представлена реализация имитационных моделей: модели, предназначенные для оценки инвестиционных проектов предприятий и групп предприятий и три типа балансовых моделей. Модели могут использоваться совместно с оптимизационными производственно-транспортными моделями и самостоятельно. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сложная структура объекта исследования, трудность формализации зависимостей показателей развития угольной промышленности от отдельных наиболее значимых факторов, преобладающая роль эксперта в исследованиях не позволяют применять компьютерные модели с фиксированным входом и выходом. Имитационное моделирование является эффективным инструментом исследования перспектив развития угольной промышленности регионов России. С использованием представленных моделей неоднократно выполнялся компьютерный эксперимент, подтвердивший рациональность и оправданность применения этих моделей.

Ключевые слова: моделирование, вычислительный эксперимент, имитационная модель, угольная промышленность, восточные регионы России, исследование, добыча, потребление.

Информация о статье. Дата поступления 05 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Такайшвили Л.Н. Имитационные модели в исследованиях перспектив развития угольной промышленности восточных регионов России // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 121–132. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-121-132

SIMULATION MODELS IN THE STUDIES OF COAL INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE EASTERN REGIONS OF RUSSIA

L.N. Takaishvili

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT. When studying the development prospects of coal-mining regions, the use of a computational experiment is rather labor-intensive, moreover, it is difficult to formalize. This is due to the features of coal industry as an object of research. The article presents the simulation models constructed at Melentiev Energy Systems Institute SB RAS in order to study the development prospects of Russian coal industry as a whole and the eastern regions of Russia in particular. The models are implemented in the framework of the information and model complex (IMPC) Coal. **PURPOSE.** The purpose of the paper is to consider the possibility of implementing the simulation models in order to study the development pro-

¹Такайшвили Людмила Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ТЭК Сибири и Дальнего Востока, e-mail: luci@isem.irk.ru

Lyudmila N. Takaishvili, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Energy Sector of Siberia and Far East, e-mail: luci@isem.irk.ru



spects of the coal industry. **MATERIAL AND METHODS.** The study uses the methods of system analysis, evaluation of investment projects, decision-making under conditions of uncertainty. Official statistical data and forecasts of regional economy development are used for model verification. **RESULTS.** The paper presents the simulation models being implemented including the models designed to evaluate investment projects of enterprises and groups of enterprises and 3 types of balance models. The models can be used independently or together with optimization production and transport models. **CONCLUSION.** The complex structure of the research object, the complexity of formalizing the dependencies of coal industry development indices on individual, most significant factors, the prevailing role of an expert in research do not allow to use the computer models with the fixed input and output. Simulation modeling is an effective tool for studying coal industry development prospects in the regions of Russia. The repeated computer experiment on the basis of the presented models has proved the rationality and feasibility of their use.

Keywords: modeling, computing experiment, simulation model, coal industry, Eastern regions of Russia, research, mining, consumption

Information about the article. Received July 5, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Takaishvili L.N. Simulation models in the studies of coal industry development in the eastern regions of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 121–132. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-121-132 (In Russian)

Введение

Угольная промышленность страны является одной из больших систем энергетики в составе топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [1–3]. Основными свойствами угольной промышленности как большой системы энергетики являются: структурная сложность, масштабность и инерционность [4]. Угольной продукции присущи: неоднородность продукта, обусловленная широким диапазоном изменения качественных характеристик; множество направлений использования; слабая востребованность и взаимозаменяемость (технологические установки рассчитаны на уголь определенного качества). Все это находит отражение в моделях, предназначенных для исследования развития и функционирования угольной промышленности. Вычислительный эксперимент достаточно трудоемкий и слабоформализуемый, что связано с особенностями угольной промышленности как объекта исследования [4]. При выполнении вычислительного эксперимента зарубежными и российскими учеными используются оптимизационные и имитационные модели, разработанные для исследования как отдельных процессов, связанных с технологиями добычи и переработки угля, так и функционирования предприятий, регионов и отрасли в целом во взаимодействии с другими отраслями экономики [5–8]. Из зарубежного опыта моделирования развития угольной промышленности наиболее всеобъемлющей, учитывающей множество связей угольной промышленности с отраслями экономики и внутреннюю структуру, является угольный блок в национальной системе моделирования энергетики США – модель NEMS [5]. Реализованы также модели функционирования угольной промышленности Польши, Южной Африки, Австралии и другие [5–8].

Российский опыт моделирования развития угольной промышленности насчитывает более 70 лет [9–12]. В Институте энергетических исследований (ИНЭИ) РАН разработана система имитационных моделей, позволяющая выявить наиболее эффективные направления развития отрасли исходя из прогнозируемых вариантов развития экономики России [10]. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН исследования и прогнозирование развития угольной промышленности страны и регионов в ТЭК ведутся более 40 лет [12]. В исследованиях используются оптимизационные и имитационные модели. Угледобывающие регионы России имеют существенные отличия по своим характеристикам, в том числе условиям добычи угля, поставок и прочим. Большинство основных угледобывающих предприятий страны расположены в восточных регионах – в Сибири и на Дальнем Востоке, на которые приходится более 95% объемов добычи. Для исследования развития угледобычи в восточных регионах России разработаны имитационные модели, представленные в данной статье.



Инструментарий для исследования перспектив развития угольной промышленности

При исследовании перспектив развития угольной промышленности решаются следующие задачи:

1. Анализ существующего состояния угольной отрасли.
2. Разработка сценариев развития экономики (страны или региона).
3. Прогноз потребности в электро- и теплоэнергии.
4. Прогноз потребности в топливе в зависимости от принятого сценария.
5. Прогноз востребованных объемов добычи, объемов и направлений поставок угля с

учетом:

- сложившихся тенденций добычи, поставок, потребления доступных ресурсов угля;
 - возможностей транспортной инфраструктуры и других факторов.
6. Прогноз развития топливных отраслей на основе балансов топлива.

Непосредственно к исследованиям перспектив развития угольной промышленности относятся задачи 1 и 5.

Для задач исследования развития угольной отрасли в ИСЭМ СО РАН выполнена интеграция информационной базы и системы взаимосвязанных моделей в информационно-модельном комплексе (ИМК) «Уголь», в состав которого входят информационная система и система моделей. Реализованы три вида моделей: имитационные, расчетные и оптимизационные, формулируемые в виде задач линейного программирования. Представленные модели могут использоваться как вместе, так и каждая самостоятельно, в зависимости от постановки задачи исследования. С использованием одной модели может решаться несколько задач. С использованием оптимизационных моделей можно получить прогнозы, требующие доработки. Для доработки результатов решения наиболее подходят имитационные модели. Решение формируется при непосредственном участии эксперта, при этом возможно учесть большую часть особенностей функционирования и развития процессов добычи и потребления угля. На начало исследования, как правило, существует неопределенность в составе доступных исходных данных, объеме и алгоритме предварительных расчетов показателей. Исходная информация, доступная на начало исследования, и уникальность объектов угольной промышленности не позволяют создать инструментарий для имитационных моделей с зафиксированными входом и выходом. Специфика научных исследований такова, что практически для каждого из них создавались свои имитационные модели на основе разработанных ранее.

Имитационные модели для исследования развития угольной промышленности

Реализовано 4 вида имитационных моделей, соответствующих разным уровням и аспектам рассмотрения: «INVEST COAL», «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации».

Модель «INVEST COAL» разработана для оценки экономической эффективности функционирования и развития предприятия или группы предприятий. С использованием этой модели может решаться также обратная задача – определение цены угля или других показателей при заданном показателе эффективности. В модели рассчитываются: балансовая прибыль; чистая прибыль; рентабельность продукции и поток денежной наличности; выручка от реализации продукции. В издержки производства на добычу угля входят затраты на электроэнергию, теплоэнергию, материалы, оплату труда, амортизация, налоги, услуги промышленного характера; выплата процентов за кредит и прочие расходы. Критериальными показателями являются: состояние текущего счета; дисконтированный текущий счет; чистая текущая стоимость; индекс прибыльности; рентабельность продукции; внутренняя норма доходности и срок возврата капитала. Для повышения надежности получаемых оценок выполняется анализ устойчивости, представляющий собой расчет зависимости обобщающих финансово-экономических показателей от тех или иных изменений исходных параметров проекта (рис. 1).

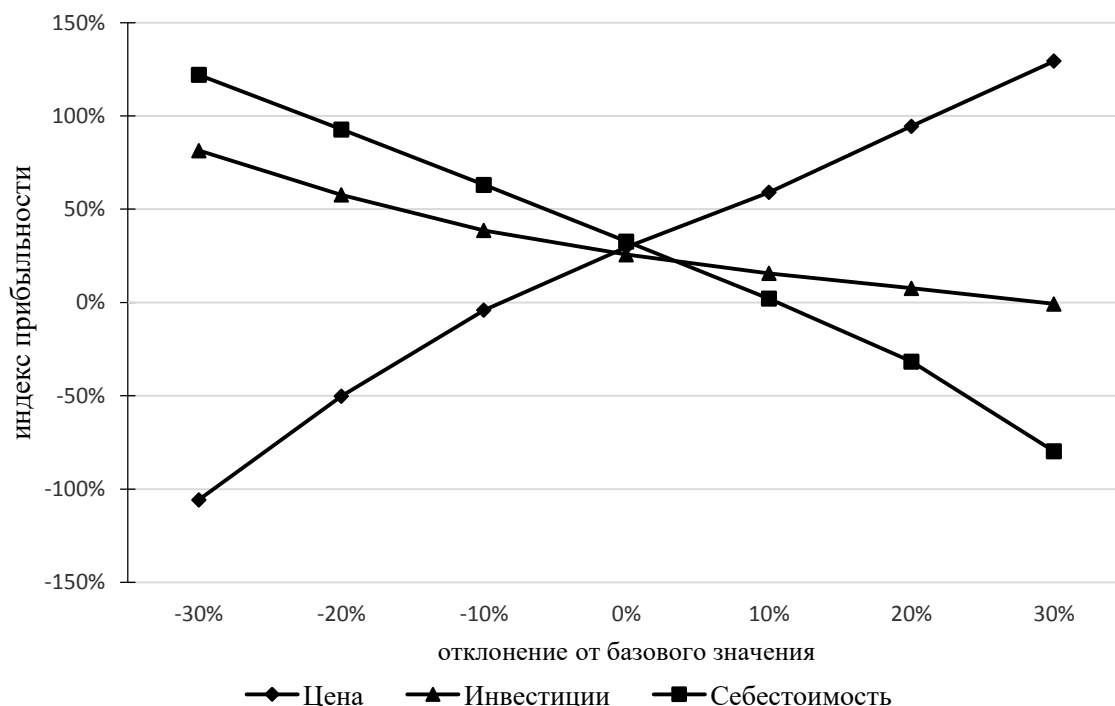


Рис. 1. Зависимость индекса прибыльности от отклонений исходных параметров от базовых значений

Fig. 1. Dependence of the profitability index on input parameter deviation from basis values

Модели «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации» отличаются детализацией представления объектов и некоторыми другими аспектами, не имея существенных различий по структуре.

Модели одного и того же типа, создаваемые для конкретных исследований, отличаются в зависимости от объема доступной информации и целей исследования. В качестве субъектов рынка, в зависимости от степени детализации, выступают угли, угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия, регионы. В качестве региона рассматриваются субъекты Федерации (СФ), федеральные округа (ФО), экспорт как обобщенный регион, Российская Федерация в целом или другие территориальные образования, объединенные по какому-либо признаку. Связи между субъектами рынка представлены объемами поставок и затратами на транспортировку. Поставки и потребление угля прогнозируются с учетом сложившихся тенденций поставок и потребления угля в регионах России и поставок на экспорт.

Модель «Балансы» позволяет на основе данных о потенциальных возможностях добычи углей и потребностей в углях получить прогноз востребованных объемов добычи и поставок углей по федеральным округам.

Модель «Балансы регионов» является дополнением к оптимизационной производственно-транспортной модели угольной промышленности России и модели «Балансы». В качестве версии поставок угля в регионы, от которой начинается поиск решения, может служить решение, полученное с помощью этих моделей.

Модель «Субъект Федерации» предназначена для исследования развития угольной промышленности на уровне СФ. В ней представлена наиболее полная детализация показателей: по угледобывающим предприятиям, обогатительным фабрикам, потреблению определенных углей в разрезе СФ и с учетом деления СФ по каким-либо признакам (административным, транспортной доступности и др.) и т.п.

Структура имитационных моделей

В имитационных моделях «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации» выделены три функциональных блока: «Производство», «Потребление» и «Балансы угля». В блоках «Производство» и «Потребление» реализованы схемы расчета и распределения товарной продукции. Конечной товарной продукцией являются ресурсы угля для энергетики и коксовый концентрат. Товарная продукция поставляется на экспорт и для внутреннего потребления (электростанции, котельные, коксохимические заводы, прочие потребители).

Блок «Производство». Входные данные структурируются соответствующим образом для получения выходных данных. В них также содержится информация об объемах добычи угля, поступающих на обогатительные фабрики (ОФ) (коксующиеся и энергетические отдельно), о коэффициентах выхода товарной продукции и отходов на обогатительных фабриках. Информация об объемах добычи является выходными данными, которые структурируются по следующим признакам: объемы добычи угля на шахтах, разрезах, действующих и новых предприятиях; объемы добычи угля по районам; объемы добычи по видам углей: бурый, каменный (энергетический, коксующийся); объемы товарной продукции по продуктам (коксовый концентрат, энергетический концентрат, промпродукт, отходы); объемы добычи, поступающие потребителю в рядовом виде для бурого и каменного углей. Возможно структурирование и по другим признакам, например, группам предприятий, выделенных по территориальному или административному критерию.

В экономико-математической формулировке учитываются: районирование территории; добыча угля по видам (бурый, каменный, коксующийся); переработка на обогатительных фабриках; поставки внутри субъекта Федерации и в другие регионы России, по направлениям использования (электростанции, коксохимические заводы, население и др.) и на экспорт.

В частных случаях отдельные компоненты могут отсутствовать.

Объемы добычи угля в субъекте Федерации определяются по следующей формуле:

$$D_{sf}^t = \sum_{r=1}^R \left(\sum_{n=1}^N (D_{rnk}^t + D_{rn\epsilon}^{t\text{ кам}} + D_{rn\delta}^{t\text{ б}}) + \sum_{a=1}^A (D_{rak}^t + D_{ra\epsilon}^{t\text{ кам}} + D_{ra\delta}^{t\text{ б}}) \right), \quad (1)$$

где D_{sf}^t – объем добычи углей sf -субъекта Федерации в t -ом периоде; sf – индекс субъекта Федерации ($sf = 1, \dots, SF$), где SF – число субъектов Федерации; t – индекс периода времени ($t = 1, \dots, T$), где T – число периодов; r – индекс района в субъекте Федерации ($r = 1, \dots, R$), где R – число районов; n – индекс нового предприятия ($n = 1, \dots, N$), где N – число новых предприятий; a – индекс действующего предприятия ($a = 1, \dots, A$), где A – число действующих предприятий.

Объемы добычи угля в r -ом районе в t -ом периоде складываются из составляющих:

D_{rnk}^t – объем добычи коксующихся углей на новом предприятии n ;

$D_{rn\epsilon}^{t\text{ кам}}$ – объем добычи каменных энергетических углей на новом предприятии n ;

$D_{rn\delta}^{t\text{ б}}$ – объем добычи бурых энергетических углей на новом предприятии n ;

D_{rak}^t – объем добычи коксующихся углей на действующем предприятии a ;

$D_{ra\epsilon}^{t\text{ кам}}$ – объем добычи каменных энергетических углей на действующем предприятии a ;

$D_{ra\delta}^{t\text{ б}}$ – объем добычи бурых энергетических углей на действующем предприятии a ;

Также выделяются предприятия по способу добычи (открытый, подземный). Формула (1) дает представление о возможной структуре добычи. Для отдельных регионов некоторые составляющие будут равны нулю.



Потребителям поставляется товарная продукция, которая включает продукты обогащения углей: коксовый и энергетический концентрат, промпродукт (низкосортный продукт переработки углей) и угли, поступающие в рядовом виде потребителям (бурые и каменные).

Объемы товарной продукции определяются по формуле:

$$T_{sf}^t = \sum_{r=1}^R \left(\sum_{f=1}^F (T_{f\kappa}^t + T_{f\varepsilon}^t + T_{f\Pi\Pi}^t) + \sum_{n=1}^A (D_{rn\varepsilon p}^t + D_{rn\kappa p}^t) + \sum_{a=1}^A (D_{ra\varepsilon p}^t + D_{ra\kappa p}^t) \right), \quad (2)$$

где f – индекс обогатительной фабрики в субъекте федерации ($f=1, \dots, F$), где F – число обогатительных фабрик; $D_{rn\varepsilon p}^t, D_{rn\kappa p}^t, D_{ra\varepsilon p}^t, D_{ra\kappa p}^t$ – коксующийся (κ) и энергетический (ε) уголь, поставляемый в рядовом виде (p) с новых (n) и действующих (a) предприятий.

Товарную продукцию после переработки на обогатительных фабриках можно представить следующими уравнениями:

$$T_{f\kappa}^t = \alpha_{f\kappa\kappa} * (D_{n\kappa}^{t\text{пер}} + D_{a\kappa}^{t\text{пер}}); \quad (3)$$

$$T_{f\varepsilon}^t = \beta_{f\varepsilon\kappa} * (D_{n\varepsilon}^{t\text{пер}} + D_{a\varepsilon\kappa}^{t\text{пер}} + D_{a\varepsilon\delta}^{t\text{пер}}); \quad (4)$$

$$T_{f\Pi\Pi}^t = \alpha_{f\Pi\Pi\kappa} * (D_{n\kappa}^{t\text{пер}} + D_{a\kappa}^{t\text{пер}}) + \beta_{f\Pi\Pi\varepsilon} * (D_{n\varepsilon}^{t\text{пер}} + D_{a\varepsilon\kappa}^{t\text{пер}} + D_{a\varepsilon\delta}^{t\text{пер}}), \quad (5)$$

где $\alpha_{f\kappa\kappa}, \beta_{f\varepsilon\kappa}, \alpha_{f\Pi\Pi\kappa}, \beta_{f\Pi\Pi\varepsilon}$ – коэффициенты выхода коксового концентрата, энергетического концентрата и промпродукта на ОФ при переработке угля нового (n) или действующего (a) предприятия. Символами $T_{f\kappa}^t, T_{f\varepsilon}^t$ и $T_{f\Pi\Pi}^t$ обозначены соответствующие объемы выхода товарной продукции. $D_{n\kappa}^{t\text{пер}}, D_{a\kappa}^{t\text{пер}}, D_{n\varepsilon}^{t\text{пер}}, D_{a\varepsilon}^{t\text{пер}}$ – объемы добычи, поставляемые на переработку (пер) с новых (n) и действующих (a) предприятий.

Объемы товарной продукции подразделяются на ресурсы энергетического и коксующегося углей. Для получения баланса между потребностью и добычей ресурсы энергетического угля в тоннах натурального топлива $R_{sf}^{\text{эт}}$ (6) переводятся в тонны условного топлива $R_{ysf}^{\text{эт}}$ (7), по соответствующим калорийным эквивалентам Q_r^t . Ресурсы энергетического угля в натуральном исчислении (6) состоят из объемов продуктов переработки на ОФ: энергетический концентрат и промпродукт (низкосортные продукты переработки коксующихся и энергетических углей) и объемов добычи угля (бурого и каменного), поступающего потребителю в рядовом виде.

$$R_{sf}^{\text{эт}} = \sum_{r=1}^R (T_{f\varepsilon}^t + T_{f\Pi\Pi}^t + D_{rn\varepsilon p}^{t\text{кам}} + D_{rn\varepsilon}^{t\delta} + D_{ra\varepsilon}^{t\delta}); \quad (6)$$

$$R_{ysf}^{\text{эт}} = \sum_{r=1}^R (Q_{r\varepsilon\kappa}^t * T_{r\varepsilon\kappa}^t + Q_{r\Pi\Pi}^t * T_{r\Pi\Pi}^t + Q_{rn\varepsilon p}^{t\text{кам}} * D_{rn\varepsilon p}^{t\text{кам}} + Q_{rn\varepsilon}^{t\delta} * D_{rn\varepsilon}^{t\delta} + Q_{ra\varepsilon}^{t\delta} * D_{ra\varepsilon}^{t\delta}). \quad (7)$$

Блок «Потребление». Потребление угля включает внутреннее потребление угля для рассматриваемого региона, потребность в угле других регионов РФ и стран – импортеров угля. Потребители в регионах РФ объединяются по группам: потребители энергетического (объекты энергетики и другие) и коксующегося угля (металлургические заводы). Потребители энергетического угля группируются по направлению использования угля: электростанции, ко-



тельные, коммунально-бытовые и прочие потребители [5]. В блоке «Потребление» учитывается потребность в обязательных поставках на объекты энергетики.

Блок «Балансы угля». Получение балансов угля связано с поиском востребованных объемов добычи и поставок углей с учетом определенного критерия развития. Обобщенное балансовое уравнение имеет вид

$$T_{sf}^t + B_{sf}^t = P_{sf}^t + V_{sf}^t, \quad (8)$$

где T_{sf}^t – товарная продукция sf -того субъекта федерации в t -ом периоде; B_{sf}^t – ввоз в sf -й субъект федерации в t -ом периоде; P_{sf}^t – внутреннее потребление sf -субъекта федерации в t -ом периоде; V_{sf}^t – вывоз из sf -го субъекта федерации в t -ом периоде.

В балансовом уравнении (8) представлено соотношение ресурсов к распределению (суммы объемов товарной продукции, получаемой в регионе, и объемов ввоза угля в регион) и суммы прогнозируемых объемов потребления и объемов вывоза в другие регионы и на экспорт.

Уравнения составляются и решаются для коксующихся и энергетических углей отдельно. Для энергетических углей расчет выполняется в условном исчислении. Для получения востребованных объемов добычи и поставок углей в натуральном исчислении выполняется расчет, обратный представленному в уравнении (7). Балансы энергетических и коксующихся углей в натуральном исчислении сводятся в общий баланс угля. Уравнение (8) представлено для субъекта Федерации, точно такие же уравнения будут для всех уровней административной структуры страны: районы в субъекте Федерации, СФ, ФО, страна в целом.

Процесс нахождения балансов угля – итерационный. На первом этапе в блоке «Балансы» определяется разность между левой и правой частями уравнения (8) и, в зависимости от полученных результатов, выполняется одно или несколько действий.

1. В случае, когда потребность больше, чем ресурсы угля:

- рассматривается возможность увеличения мощностей добывающих действующих предприятий или ввода новых мощностей;
- рассматривается возможность сокращения поставок на экспорт и в другие регионы;
- рассматривается возможность удовлетворения потребности за счет ввоза из других регионов;
- экспертам рекомендуется сократить потребность в угле на объектах (например, сдвинуть сроки ввода мощностей на объектах энергетики).

2. В ситуации, когда ресурсы энергетического угля больше, чем потребность в энергетическом угле, необходимо:

- сократить объемы переработки угля;
- сократить объемы добычи угля;
- сдвинуть на более поздний период ввод новых мощностей по добыче угля.

Кроме представленного необходим также анализ соответствия потребности в определенных углях возможностям добычи (получения товарного продукта) этого угля, так как на объектах энергетики взаимозаменяемости углей практически не существует.

На следующем этапе возвращаемся в блоки «Производство» или «Потребность» для корректировки условий развития и далее итерационно получаем решение.

Поскольку процесс исследования слабоформализуемый, то возможны и другие действия эксперта в зависимости от конкретного объекта исследования.

Существует неопределенность в исходной информации как по возможностям добычи угля, так и по прогнозу потребления угля. Способ преодоления неопределенности – вариантный подход, т.е. решение находится для нескольких возможных сценариев развития экономики региона.

Реализация и использование имитационных моделей

Имитационные модели реализованы в электронных таблицах MS EXCEL, что дает следующие преимущества:

- возможность нетрудоемко настраивать, адаптировать модели к конкретным исследованиям, вводить алгоритмы расчета показателей, формировать таблицы результатов в соответствии с потребностями исследователя и т.п.;
- возможность провести вычисления, не предусмотренные заранее, потребовавшиеся в ходе исследований;
- результаты расчетов обрабатываются и представляются в виде таблиц и графиков, пригодных для помещения в печатный материал (статьи, монографии, отчеты), что существенно экономит время подготовки материалов.

На рис. 2 представлены фрагменты имитационных моделей «INVEST COAL», разработанных для разных исследований предприятий восточных регионов России. С использованием модели «INVEST COAL» решались прямая и обратная задачи для разрезов Мугунский, Харанорский, Солнцевский, предприятия Востсибуголь и других. Универсальность подхода позволила адаптировать эту модель для исследования других объектов энергетики: ГРЭС на угле и газе; Вилуйская и Богучанская ГЭС и т.п.

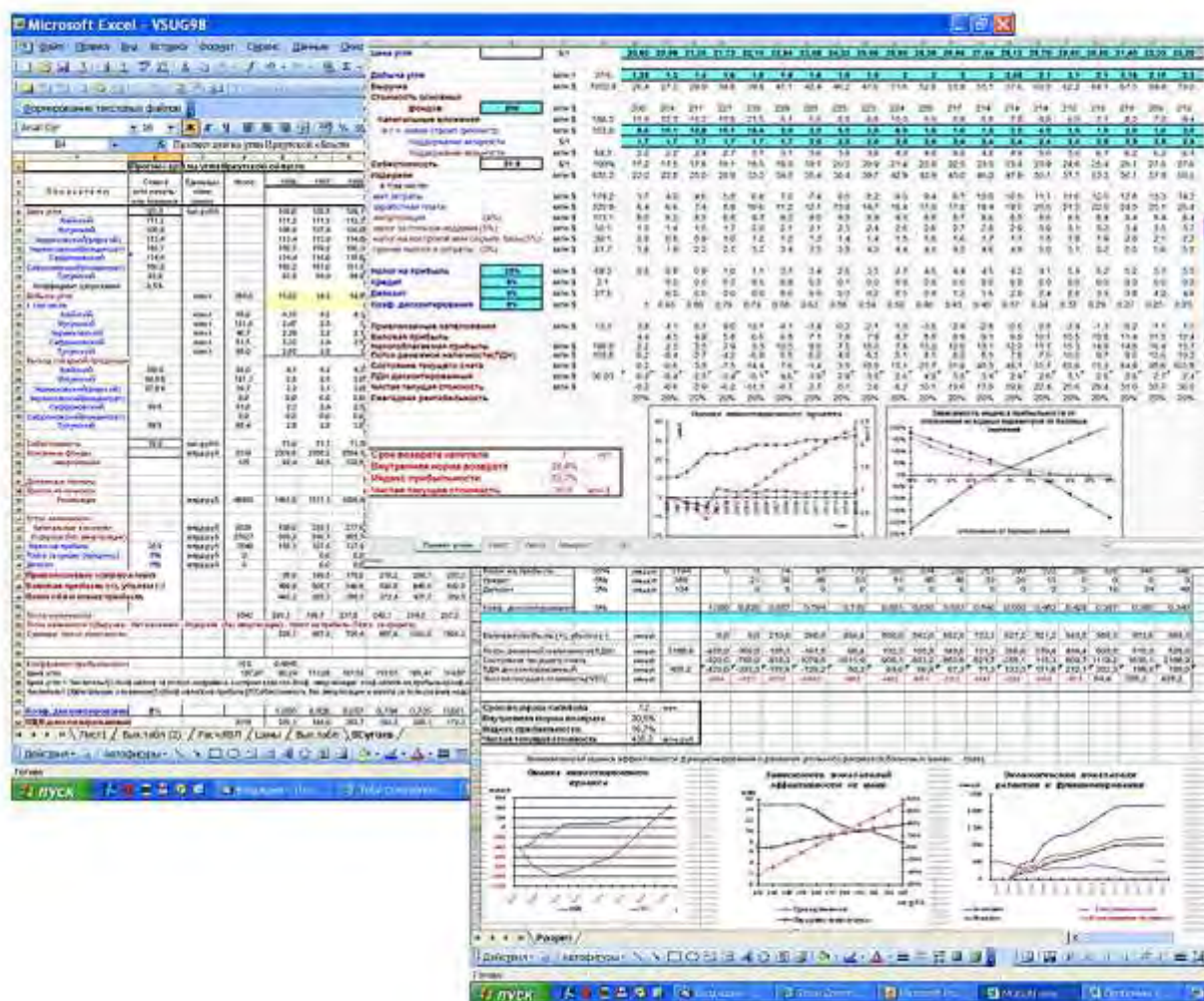


Рис. 2. Фрагменты моделей «INVEST COAL»
Fig. 2. Fragments of INVEST COAL models

Имитационные модели «Балансы», «Балансы регионов» разрабатывались для прогнозирования развития угольной промышленности при отличающихся вариантах развития экономики и энергетики и для разных периодов времени.

Модель «Балансы» использовалась при исследовании развития угольной промышленности страны.

Модель «Балансы регионов» ориентирована главным образом на угольную промышленность Восточной Сибири и Дальнего Востока по субъектам Федерации и угледобывающим предприятиям.

Имитационная модель «Субъект Федерации» применялась в исследованиях развития угольной промышленности Иркутской и Амурской областей, Республики Саха (Якутия) и других субъектов Федерации [13, 14]. Реализация модели состоит из разделов: «Инструкция по работе с моделью», «Экономико-математическая формулировка модели», «Исходные данные», «Результаты расходов», «Таблицы для помещения в печатные материалы» (рис. 3).

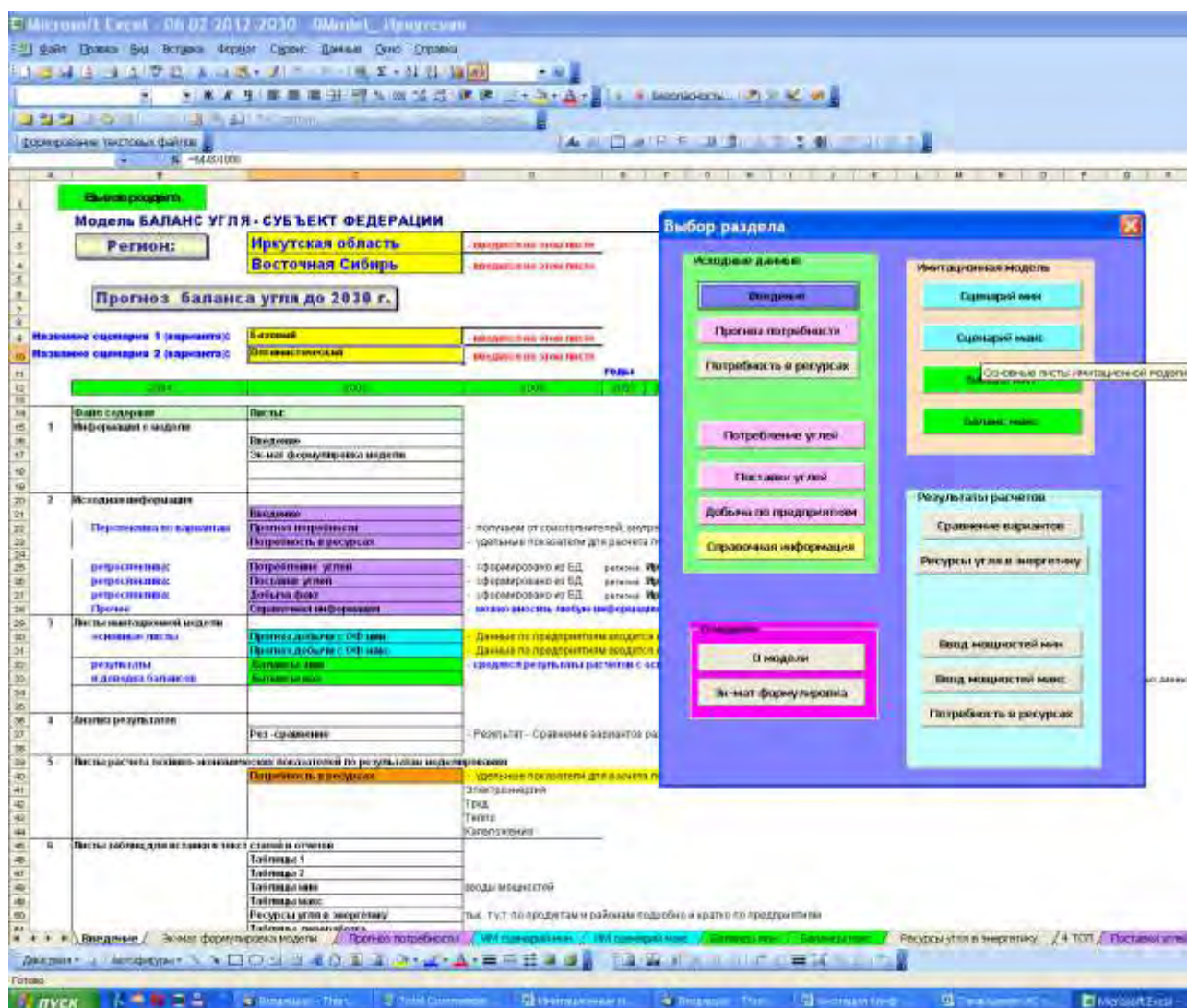


Рис. 3. Интерфейс модели «Субъект Федерации»
Fig. 3. Interface of the model Constituent Entity of the Federation

В имитационной модели, разработанной для исследования угольной промышленности республики Саха (Якутия), наиболее полно представлены все возможные аспекты функционирования угольной промышленности: добыча открытым и подземным способами энергетиче-



ского (каменного и бурого) и коксующегося углей; переработка на обогатительных фабриках; отличающиеся условия добычи, потребления и поставок углей для разных территорий республики и т.д.

В имитационных моделях «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации» используются показатели, основными из которых являются:

- прогнозы по вариантам развития экономики: потребность в угле; ограничения на ресурсы энергетических углей; ограничения на добычу энергетических и коксующихся углей;
- оценки по возможностям развития угледобывающих предприятий регионов;
- качественные характеристики углей;
- технико-экономические показатели деятельности предприятий;
- данные для расчета потребности в ресурсах, таких как капитальные вложения, электро- и теплоэнергия, трудовые ресурсы, соответствующие удельные показатели;
- существующая транспортная схема поставок;
- ретроспективные данные по поставкам и потреблению углей.

Результаты расчетов содержат согласованные с ретроспективными данными прогнозные показатели, оформленные в виде таблиц (с разной степенью детализации для разных моделей) в разрезах административного деления страны и регионов:

- потенциальные возможности развития добычи угля и возможные объемы производства угля экспортного качества;
- объемы направления поставок угля, в том числе на экспорт;
- объемы востребованной добычи угля, в том числе по предприятиям;
- ресурсы угля в энергетику;
- вводы мощностей в угольной промышленности;
- объемы переработки угля;
- выход товарной продукции углей;
- балансы угля всего и энергетического угля в частности;
- потребность в ресурсах: капитальные вложения в развитие угольной промышленности; численность занятых на добычу и переработку угля; в электро- и тепло-энергии на добычу и переработку угля;
- направления развития угольной промышленности (новое строительство, расширение мощностей);
- структура добычи (открытый и подземный способы, бурый и каменный угли, энергетический и коксующийся угли) и переработки;
- таблицы и графики для помещения в печатную продукцию.

С помощью представленных моделей в разные годы выполнены прогнозы развития угольной промышленности регионов и оценка инвестиционных проектов [13–15]. Сравнение результатов исследований, выполненных в предыдущие годы (2004–2014) с фактическими показателями развития угольной промышленности в последующие годы показали оправданность применения моделей такого типа для исследования перспектив развития угольной промышленности регионов. Данные прогноза на 2010 г. достаточно близки к фактическим данным, несмотря на то, что прогноз на 2010 г. и далее выполнялся без учета экономического кризиса.

Заключение

Имитационное моделирование является эффективным инструментом исследования перспектив развития угольной промышленности восточных регионов. Представленные в статье модели являются достаточно гибким, настраиваемым на конкретные задачи и адекватным инструментом исследования развития угольной промышленности. Выбранный способ реализации является рациональным, что показали многочисленные исследования. В дальнейшем



возможна интеграция моделей с учетом современного уровня развития информационных технологий и потребностей исследователя с оптимальным сочетанием адаптируемости, универсальности и минимального времени разработки.

Работа выполнена в рамках научного проекта XI.174.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310435-0.

Библиографический список

1. В.П. Булатов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм [и др.]. Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях Новосибирск: Наука, 1995. 189 с.
2. Гамм А.З., Макаров А.А., Санеев Б.Г. [и др.]. Теоретические основы системных исследований в энергетике: монография. Новосибирск: Наука, 1986. 336 с.
3. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. М.: Наука, 1983. 455 с.
4. Такайшвили Л.Н. Учет свойств угольной промышленности, как системы топливно-энергетического комплекса при моделировании ее развития // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 10. С. 138–149. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-138-149>
5. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2015 // U.S. Energy Information Administration. September 2015. 224 p. URL: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554\(2015\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554(2015).pdf) (19.06.2018).
6. Mohr S., Höök M., Mudd G., Evans G. Projection of long-term paths for Australian coal production – comparisons of four models // International Journal of Coal Geology. 2011. Vol. 86. Part 4. P. 329–341. DOI: 10.1016/j.coal.2011.03.006
7. Suwala W. Modelling Adaptation of the Coal Industry to Sustainability Conditions // Energy. 2008. Vol. 33. Issue 7. P. 1015–1026.
8. Budeba M.D., Joubert J.W., Webber-Youngman R.C.W. A proposed approach for modelling competitiveness of new surface coal mines // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM). 2015. Vol. 115. No. 11. P. 1057–1064.
9. Цветков Н.И. Использование метода математического моделирования при комплексном проектировании угольного бассейна // Уголь. 1967. № 2. С. 10–15.
10. Плакиткина Л.С. Имитационные модели для прогнозирования угольной промышленности. // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 3. С. 162–175.
11. Амосенок Э.П., Бабенко Т.И., Лугачева Л.И., Маркова В.М., Соколов А.В., Чурашев В.Н. [и др.]. Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов: монография / отв. ред. В.В. Кулешов, Н.И. Сулов. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2014. 488 с.
12. Беляев Л.С., Воропай Н.И., Кононов Ю.П., Агафонов Г.В., Макаров А.А., Санеев Б.Г., Соколов А.Д. [и др.]. Методы исследования и управления системами энергетики: монография / отв. ред. А. П. Меренков, Ю. Н. Руденко. Новосибирск: Наука, 1987. 369 с.
13. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н., Муzychuk С.Ю. Уголь в топливно-энергетическом балансе Иркутской области // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 12. С. 185–194. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-185-194>
14. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н., Петров Н.А., Павлов Н.В. Угольная промышленность Республики Саха (Якутия): существующее состояние и возможности развития // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44). С. 64–69.
15. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Угольная промышленность Байкальского региона: существующее состояние и перспективы развития // Вестник ИрГТУ. 2012. № 12 (71). С. 112–118.

References

1. Bulatov V.P., Voropai N.I., Gamm A.Z. [et al.]. Sistemnye issledovaniya v energetike v novykh sotsial'no-ekonomicheskikh usloviyakh [System studies in the energy sector in the new socio-economic conditions]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1995, 189 p. (In Russian)
2. Gamm A.Z., Makarov A.A., Saneev B.G. [et al.]. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh is-sledovaniy v energetike* [Theoretical foundations of system researches in power engineering]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 336 p. (In Russian)
3. Melent'ev L.A. *Sistemnye issledovaniya v energetike* [System researches in power engineering]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 455 p. (In Russian)
4. Takaishvili L.N. Consideration of system features of coal industry as a part of fuel and energy sector when its development modeling. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 10, pp. 138–149. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-138-149> (In Russian)
5. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2015 // U.S. Energy Information Administration. September 2015. 224 p. Available at: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554\(2015\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554(2015).pdf) (accessed 19 June 2018).
6. Mohr S., Höök M., Mudd G., Evans G. Projection of long-term paths for Australian coal production – comparisons of four models // International Journal of Coal Geology. 2011. Vol. 86. Part 4. P. 329–341. DOI: 10.1016/j.coal.2011.03.006



7. Suwala W. Modelling Adaptation of the Coal Industry to Sustainability Conditions // *Energy*. 2008. Vol. 33. Issue 7. P. 1015–1026.
8. Budeba M.D., Joubert J.W., Webber-Youngman R.C.W. A proposed approach for modelling competitiveness of new surface coal mines // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*. 2015. Vol. 115. No. 11. P. 1057–1064.
9. Tsvetkov N.I. Using mathematical modeling in coal basin integrated design. *Ugol' [Coal]*. 1967, no. 2, pp. 10–15. (In Russian)
10. Plakitkina L.S. The imitating models for forecasting of the Russian coal industry development. *Izvestiya RAN. Energetika [Izvestia RAS. Power Engineering]*. 2010, no. 3, pp. 162–175. (In Russian)
11. Amosenok E.P., Babenko T.I., Lugacheva L.I., Markova V.M., Sokolov A.V., Churashev V.N. [et al.]. *Sistemnoe modelirovanie i analiz mezo- i mikroekonomicheskikh ob"ektov* [System modeling and analysis of mezo- and microeconomic objects]. Novosibirsk: IEOPP SO RAN Publ., 2014, 488 p. (In Russian)
12. Belyaev L.S., Voropai N.I., Kononov Yu.P., Agafonov G.V., Makarov A.A., Saneev B.G., Sokolov A.D. [et al.]. *Metody issledovaniya i upravleniya sistemami energetiki* [Methods of energy system research and management]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987, 369 p. (In Russian).
13. Sokolov A.D., Takaishvili L.N., Muzychuk S.Yu. Coal in the fuel and energy balance of the Irkutsk region. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 12, pp. 185–194. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-185-194> (In Russian)
14. Sokolov A.D., Takaishvili L.N., Petrov N.A., Pavlov N.V. Coal industry of the Republic of Sakha (Yakutia): current condition and development possibilities. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2010, no. 4 (44), pp 64–69. (In Russian)
15. Sokolov A.D., Takaishvili L.N. Baikal region coal industry: current state and development prospects. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2012, no. 12 (71), pp. 112–118. (In Russian)

Критерии авторства

Такайшвили Л.Н. самостоятельно получены и оформлены научные результаты, она также несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Takaishvili L.N. has independently obtained and formalized the scientific results. She bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.