

УДК 658.512.614

## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ В АЛГОРИТМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ\*

В.Г. МАМОНОВА<sup>1</sup>, Ю.И. ГОРБАЧЁВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент. E-mail: pobeda2011@inbox.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистр. E-mail: go-juli-igo@mail.ru

Любая человеческая деятельность в наше время связана с производством и потреблением энергии, особенно электрической. Производство энергии и тепла – трудоемкий и сложный процесс, объединяющий экономические, социальные и экологические аспекты. Для эффективного управления этим процессом необходим системный подход. В статье рассматривается алгоритм управления сложным объектом, который позволит управлять экологическими рисками на уровне предприятия теплоэнергетики. Экологическими рисками считаются концентрации вредных примесей в выбросах предприятий теплоэнергетики. Группы вредных примесей, которые будут оцениваться, выбраны на основе анализа состава выбросов. Это оксид и диоксид азота, оксид серы, оксид углерода, твердые вещества. В настоящей статье предлагается комплекс моделей, который позволит провести оценку процесса производства тепла согласно выделенным показателям эффективности для улучшения работы построенного алгоритма. Комплекс состоит из моделей двух уровней. Первый уровень – это модели управляющих альтернатив, позволяющие оценить, как именно реорганизовать процесс производства тепла наилучшим образом. Для снижения концентрации вредных выбросов были выбраны три малозатратных способа: сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха, двухступенчатое сжигание, рециркуляция части отходящих газов. Для каждого из них построена модель в нотации BPMN, что позволяет сравнить временные и финансовые затраты, требуемые на реализацию какого-либо способа. Для оценки концентрации как показателя эффективности предложен второй уровень моделей – имитационная модель, относящаяся к классу моделей системной динамики. Она позволяет получить концентрацию всех примесей на каждый день прогнозируемого месяца в виде графиков. Таким образом, комплекс моделей в алгоритме управления экологическими рисками позволяет оценить все показатели эффективности, выбранные в статье.

**Ключевые слова:** экология, экологические риски, управление, бизнес-процесс, BPMN, имитационное моделирование, теплоэнергетика, концентрация, вредные выбросы

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-1-77-92

---

\* Статья получена 13 января 2015 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Человечество в процессе жизнедеятельности существенно изменяет все, чего касается тем или иным образом. Особенно это влияние отражается на экологии окружающей среды, ухудшая которую человек ухудшает и собственные условия жизни. Проблемы экологии тесно связаны со здоровьем человека, вызывают болезни, уменьшают продолжительность жизни. Поэтому так важно следить за состоянием окружающей среды и беречь ее.

Экологический риск – это вероятность возникновения отрицательных изменений в окружающей природной среде или отдаленных неблагоприятных последствий этих изменений, возникающих вследствие отрицательного воздействия на окружающую среду [3].

Все стороны человеческой деятельности, в том числе и природоохранной, неразрывно связаны с производством и потреблением энергии, прежде всего электрической. Согласно мировому топливно-энергетическому балансу (рис. 1), большая часть энергии производится путем сжигания органического топлива, т. е. за счет теплоэнергетики.

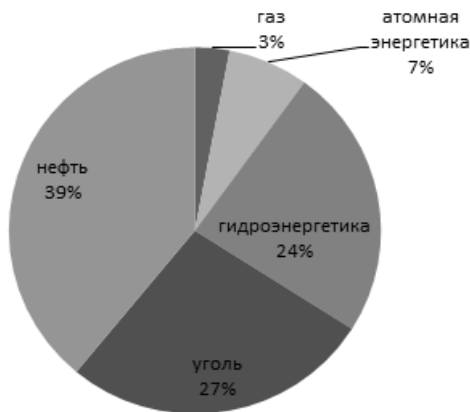


Рис. 1. Топливо-энергетический баланс мировой энергетики

Одной из важнейших проблем, возникающих с постоянным ростом и развитием отрасли теплоэнергетики, является ее влияние на состояние окружающей среды. Эта проблема должна решаться уже на уровне предприятий отрасли. Для этого необходимы соответствующие управленческие алгоритмы, один из которых представлен в настоящей статье.

## 1. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ОБЪЕКТОМ

Для успешного развития любой отрасли, в том числе и теплоэнергетики, помимо разработки инновационных технологий необходимо также создание новых механизмов управления. В качестве такого механизма был предложен алгоритм управления предприятием теплоэнергетики как сложным объектом (рис. 2). Алгоритм построен в нотации IDEF0. Для описания функциональных моделей будем использовать IDEF0 – методологию функционального моделирования и графическую нотацию, предназначенную для формализации и описания бизнес-процессов. Отличительной особенностью IDEF0 является ее акцент на соподчиненность объектов. В IDEF0 рассматриваются логические отношения между работами, а не их временная последовательность.

На рис. 3 представлена декомпозиция блока А1.

Одним из основных факторов загрязнения окружающей среды предприятиями теплоэнергетики являются выбросы, попадающие в атмосферу вместе с продуктами сгорания топлива. При применении данного алгоритма к предприятиям теплоэнергетики в качестве ядра проблемы была взята концентрация вредных веществ в выбросах.

Глобальной целью управления предприятием теплоэнергетики является снижение концентрации вредных веществ в выбросах до ПДК. Разделим процессы достижения глобальной природоохранной цели на долгосрочную (стратегическую) и краткосрочную (оперативную) [1].

Стратегическая деятельность имеет целью достижение концентрации вредных веществ в выбросах значений меньше ПДК. Оперативная деятельность призвана снизить концентрацию вредных веществ до достижимого минимума в текущих условиях функционирования объекта.

Следующим этапом алгоритма является определение объекта управления. Его декомпозиция представлена на рис. 4. Рассмотрим подробнее данные, получаемые на данном этапе в качестве выходной информации.

В качестве набора показателей эффективности выступает концентрация вредных веществ в выбросах. Как было сказано ранее, теплоэнергетическая отрасль использует различные виды топлива, и при сжигании каждого из них в атмосферу попадает большое количество разнообразных веществ. Несмотря на работы по переводу котельных на жидкое топливо, подавляющее число из них, а также все четыре новосибирские ТЭЦ, в качестве топлива используют уголь. На основе анализа работ по данной тематике были выбраны четыре группы веществ, образующихся при сгорании угля. Это твердые вещества, оксид и диоксид азота, оксид углерода, оксид серы. Концентрация именно этих веществ является набором показателей эффективности.

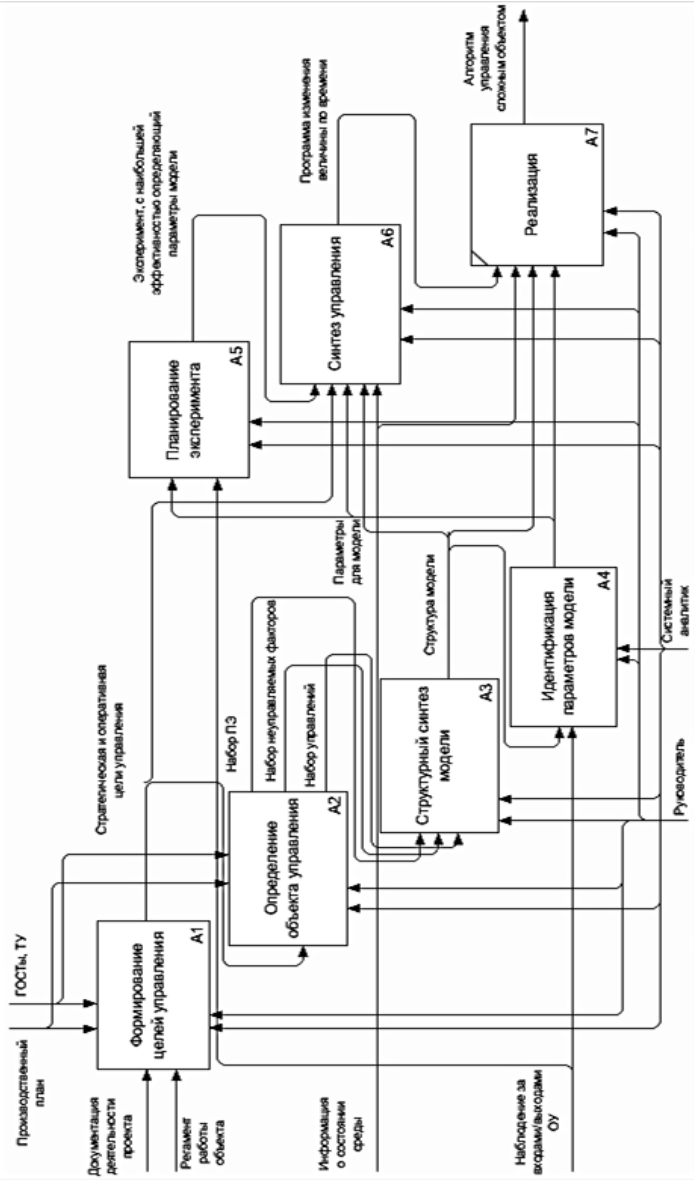


Рис. 2. Алгоритм управления сложным объектом

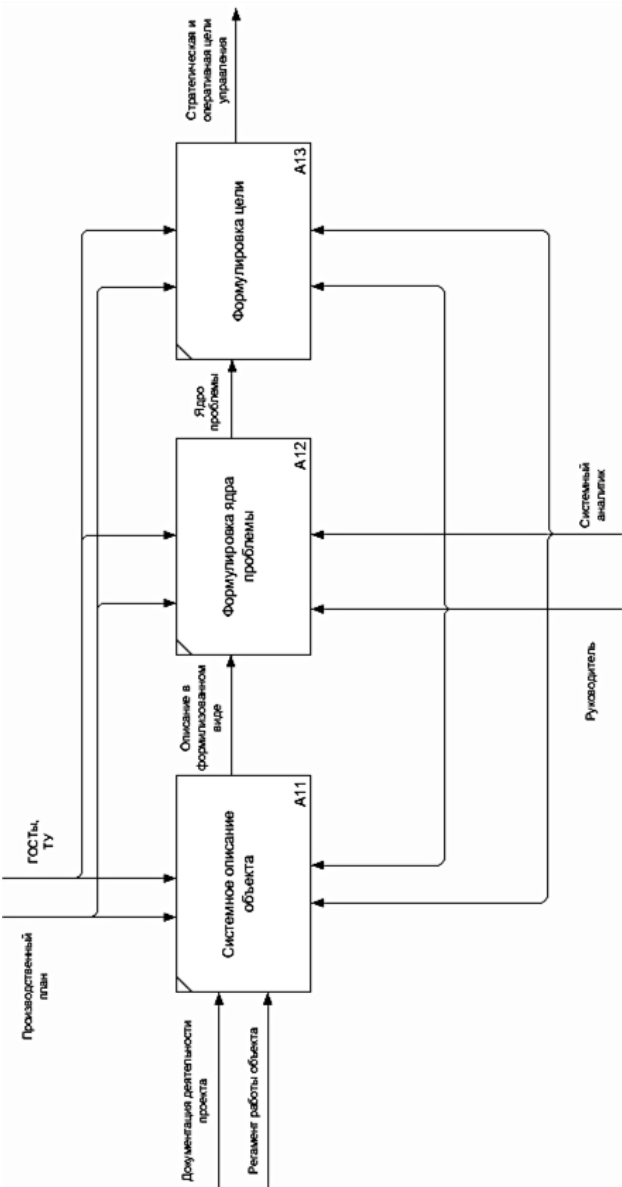


Рис. 3. Декомпозиция блока «Формирование целей управления»

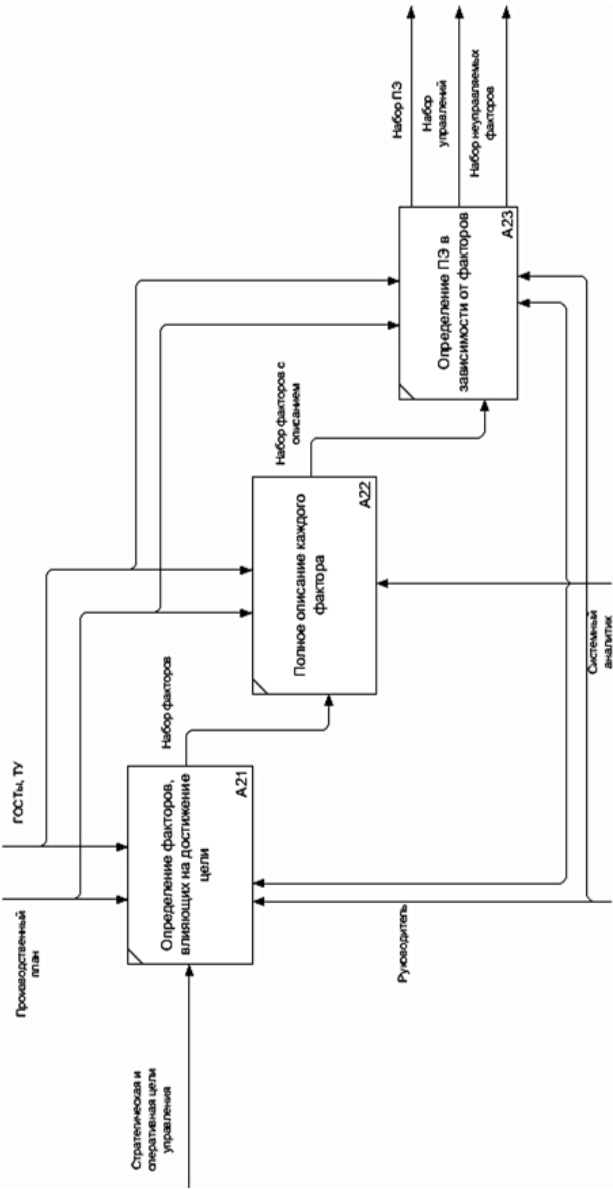


Рис. 4. Декомпозиция блока «Определение объекта управления»

В качестве неуправляемых факторов, влияющих на концентрацию вредных примесей, выступают погодные условия. Во-первых, условия рассеивания выбросов, соответственно, и концентрация зависят от температуры, скорости ветра, влажности и др. Особенно значение максимально разовой концентрации зависит от подобных параметров. Во-вторых, от температуры окружающей среды в зимний отопительный период напрямую зависит количество топлива, необходимое для отопления города.

Набор управлений представлен в виде альтернатив по снижению концентрации вредных веществ. Прежде всего, необходимо решить, значение какого именно показателя эффективности будет снижаться в первую очередь. Проанализировав зависимость выбранных веществ друг от друга, а также от внешних факторов, например от температуры, была выбрана концентрация оксида и диоксида азота. Обе концентрации пересчитываются в единый индекс, поэтому и относятся к одной группе.

Далее на основе исследований энергетиков в этой области были рассмотрены различные способы снижения концентрации оксида азота на этапе сжигания топлива в топке и выбраны на трех малозатратных способах: сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха, двухступенчатое сжигание топлива, рециркуляция продуктов сгорания [4]. Таким образом, набор управлений представляется в виде вектора альтернатив

$$U = \{U_1, U_2, U_3\},$$

где  $U_1$  – сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха;  $U_2$  – двухступенчатое сжигание топлива;  $U_3$  – рециркуляция продуктов сгорания.

В табл. 1 приведена эффективность этих способов в процентах.

Таблица 1

#### Эффективность выбранных способов снижения концентрации

| Тип горелки по механизму организации горения          | Снижение концентрации NOx по сравнению с обычной горелкой, % |
|---|--|
| Горелки с низким избытком воздуха                     | 20...25  |
| Двухступенчатое сжигание                              | 25...35  |
| Горелки с внутренней рециркуляцией продуктов сгорания | 40...50  |

Так как способы отличаются друг от друга по значениям экономических показателей эффективности, для того чтобы оценить, какой способ подойдет

лучше для той или иной ситуации, в рамках работы были предложены модели, реализованные в нотации BPMN.

## 2. BPMN-МОДЕЛИ АЛЬТЕРНАТИВ УПРАВЛЕНИЯ

Компьютерные системы, основанные на процессном подходе к управлению бизнес-системами, получили название систем управления бизнес-процессами или BPM-систем (*BusinessProcessManagement*). Они объединяют в себе непосредственно моделирование процессов с их последующей автоматизацией и системный подход к повышению эффективности деятельности организации [8].

В данной статье для оценки выбранных альтернатив управления по временным и финансовым затратам, требуемым для их реализации, предлагаются модели, показанные на рис. 5–7.

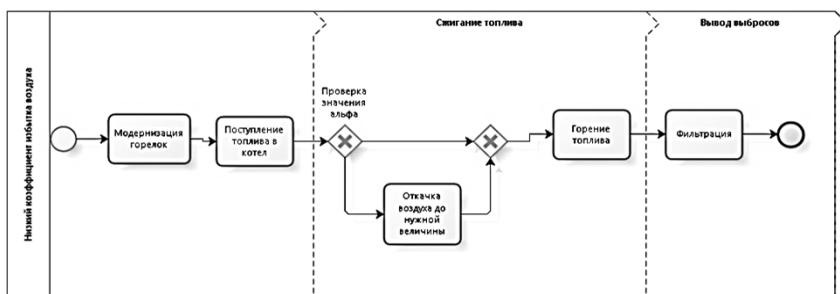


Рис. 5. Модель бизнес-процесса сжигания топлива с низким коэффициентом избытка воздуха

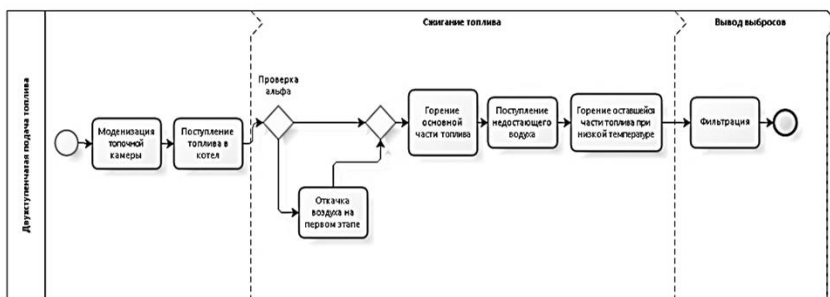


Рис. 6. Модель бизнес-процесса двухступенчатого сжигания воздуха



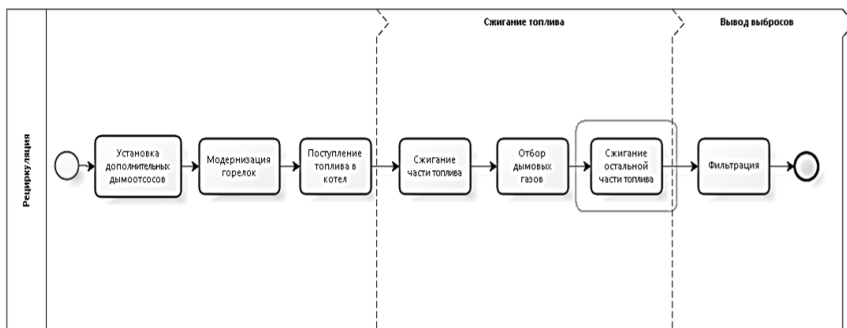


Рис. 7. Модель бизнес-процесса рециркуляции продуктов сгорания

Каждый блок в процессе имеет собственное значение выбранных показателей эффективности, и на выходе получают их суммарные значения, на основе которых можно решить, согласно какой альтернативе будет изменен производственный процесс в зависимости от экономических показателей, которыми располагает предприятие в конкретной ситуации [7].

Эти модели помогают выбрать стратегию развития предприятия в ближайшем будущем, т. е. реализуют стратегическую деятельность. Чтобы регулировать работу предприятия в текущий момент времени, т. е. осуществлять оперативную деятельность, в настоящей статье предлагается отдельная модель.

### 3. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА «СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА» НА УРОВНЕ КОТЕЛЬНОЙ

Для описываемого случая при оперативном управлении решение может быть принято не только в текущий момент времени, но и за сутки до момента управления. В основу имитационной модели, предлагаемой в настоящей статье как модель оперативного управления, заложены принципы системной динамики. Системная динамика главным образом используется в долгосрочных, стратегических моделях и принимает высокий уровень абстракции. Люди, продукты, события и другие дискретные элементы представлены в моделях системной динамики не как отдельные элементы, а как система в целом.

Комплекс моделей, реализованных в нотации BPMN, не позволяет оценить значения концентраций выбранных групп вредных веществ, поэтому в данной модели именно эти показатели эффективности и будут рассчитываться.

На концентрацию вредных веществ большое влияние оказывают неуправляемые параметры, особенно условия рассеивания. Это влияние также необходимо учесть в данной модели. Структурная схема имитационной модели «Сжигание топлива» представлена на рис. 8. В качестве объекта моделирования выступает котельная.

Переменные «Концентрация\_CO», «Концентрация\_NO2», «Концентрация\_SO2» и «Концентрация\_твердых\_веществ» зависят от потоков выбросов соответствующих загрязняющих веществ и условий рассеивания, представленных в табл. 2 temp в виде значений температуры воздуха и табл. 3 wind в виде значений скорости ветра.

Значения в табл. 2 temp и табл. 3 wind записываются при выборе файла Excel с входной информацией. Данные берутся на основе прогноза погоды на месяц.

Результатом моделирования является концентрация выбранных вредных веществ на каждый день месяца в виде графиков (рис. 9).

*Таблица 2. temp*

| День | Значение |
|------|----------|
|      |          |

*Таблица 3. wind*

| День | Значение |
|------|----------|
|      |          |

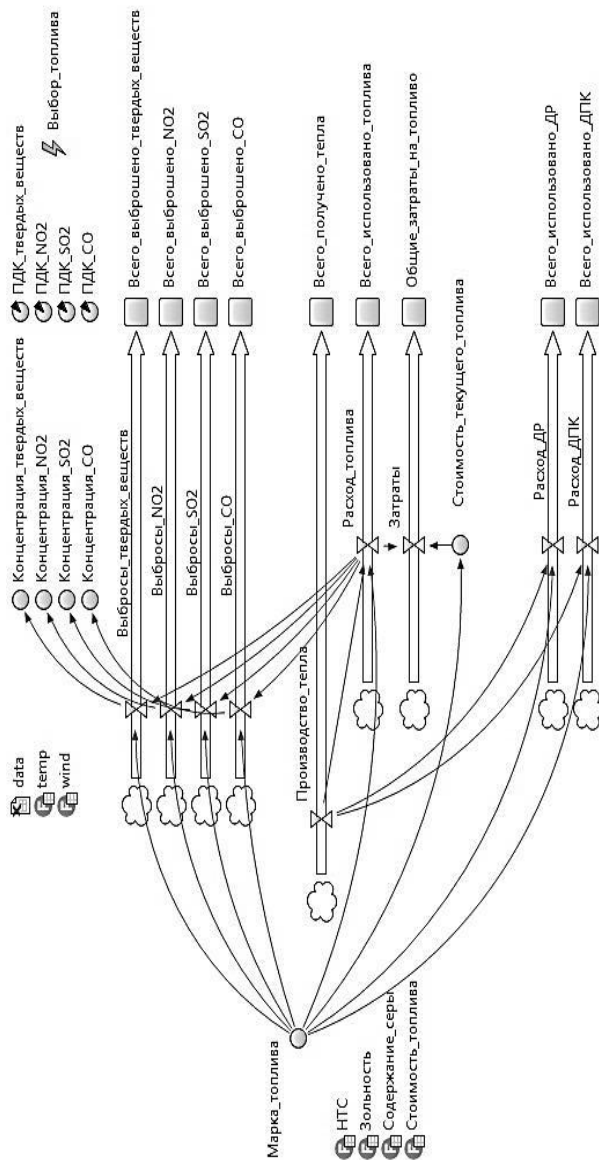


Рис. 8. Структурная схема имитационной модели

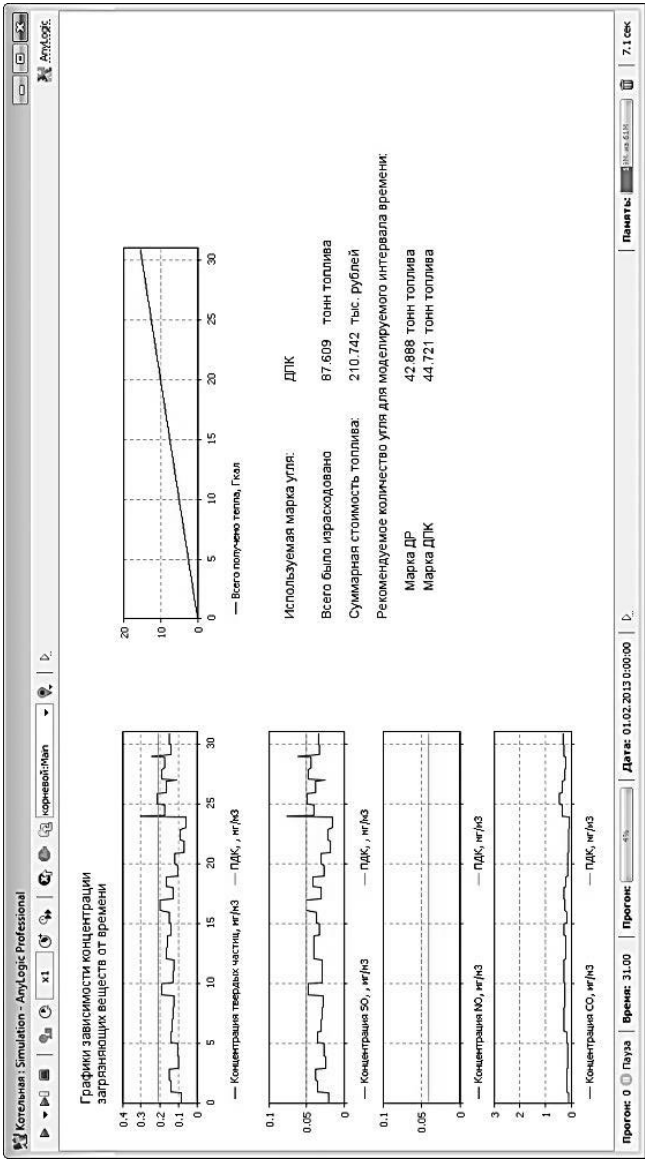


Рис. 9. Результаты моделирования

Модель позволяет оценить концентрацию относительно ПДК и при превышении этого уровня заменить марку угля на ту, при сжигании которой значение показателя эффективности будет наилучшим. На основе полученного прогноза можно оперативно управлять концентрацией вредных веществ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования разработан алгоритм управления сложным объектом, согласно которому сформулированы стратегическая и оперативная цели управления, набор неуправляемых факторов, выбраны показатели эффективности. В качестве стратегического управления предложены три альтернативы, для анализа которых построен комплекс моделей в нотации BPMN. В качестве оперативного управления построена имитационная модель, позволяющая оценить не только все показатели эффективности, но и проследить их зависимость от неуправляемых факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мамонов В.И., Мамонова В.Г.* Функциональная модель системного анализа в проблеме управления качеством окружающей среды города: учебное пособие. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 92 с.
2. *Мамонова В.Г., Михеев И.С.* Моделирование процесса «Хирургическое лечение» с использованием нотации BPMN // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 2 (76). – С. 121–136.
3. *Бурков В.Н., Щепкин А.В.* Экологическая безопасность. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2003. – 92 с.
4. Токсичные ингредиенты продуктов сгорания органического топлива: статья [Электронный ресурс] / ИМДОС-М: web-сайт производственно-коммерческого центра по производству горелочных устройств для предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – URL: <http://promgorelki.ru/2013-05-15-08-58-18> (дата обращения: 02.03.2015).
5. Официальный русскоязычный сайт компании AnyLogic [Электронный ресурс] / Anylogic. – URL: <http://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 02.03.2015).
6. Сайт Департамента энергетики, жилищного и коммунального хозяйства города Новосибирска [Электронный ресурс] / Схема теплоснабжения города Новосибирска до 2030 года. – URL: <http://www.degkh.ru/shema-ts/> (дата обращения: 02.03.2015).
7. *Мамонова В.Г., Ганелина Н.Д., Мамонова Н.В.* Моделирование бизнес-процессов: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 43 с.

8. BPMN Specification [Electronic resource] / Object Management Group: website. – URL: <http://www.bpmn.org/> (accessed: 02.03.2015).

9. Робсон М., Уллах Ф. Практическое руководство по реинжинирингу бизнес-процессов [Электронный ресурс] / пер. с англ. под ред. Н.Д. Эриашвили. – URL: <http://www.management.com.ua/bpr/bpr012-2.html> (дата обращения: 02.03.2015).

10. Бримсон Дж.А. Стратегия реинжиниринга для совершенствования работы организации: адапт. пер. с англ. [Электронный ресурс] / Элитариум 2.0: Центр дистанционного образования: web-сайт. – СПб., 2005. – URL: [http://www.elitarium.ru/2007/05/17/strategija\\_reinzhiniringa.html/](http://www.elitarium.ru/2007/05/17/strategija_reinzhiniringa.html/) (дата обращения: 02.03.2015).

**Мамонова Виктория Георгиевна**, доцент кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление в социальных экономических системах. Имеет более 40 публикаций. E-mail: [pobeda2011@inbox.ru](mailto:pobeda2011@inbox.ru)

**Горбачёва Юлия Игоревна**, магистрант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – компьютерное моделирование систем. E-mail: [go-juli-igo@mail.ru](mailto:go-juli-igo@mail.ru)

### **Development of the complex of models in algorithm of ecological risk management in heat power system\***

**V.G. Mamonova<sup>1</sup>, Y.I. Gorbachova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Novosibirsk state technical university, 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk 630073, Russian Federation, associate professor, e-mail: [pobeda2011@inbox.ru](mailto:pobeda2011@inbox.ru)

<sup>2</sup>Novosibirsk state technical university, 20 prospect Karla Marksa, Novosibirsk 630073, Russian Federation, master student, e-mail: [go-juli-igo@mail.ru](mailto:go-juli-igo@mail.ru)

Any human activity is connected with production and consumption of energy, especially electric presently. Heat and power production it is also warm – the labor-intensive and difficult process uniting economic, social and ecological aspects. System approach is necessary for effective management of this process. In article the complex object management algorithm which will allow to operate ecological risks at the level of the heat power enterprises is considered. Concentration of harmful impurities in emissions of the heat power enterprises are considered as ecological risks. Groups of harmful impurity which will be estimated, are cho-

---

\*Received 13 January 2015.

sen on the basis of the analysis of structure of emissions. It is oxide and dioxide of nitrogen, sulfur oxide, carbon oxide, solid substances. In the present article the complex of models which will allow to carry out an assessment of process of production of heat according to the allocated efficiency indicators, for improvement of work of the constructed algorithm is offered. The complex consists of models of two levels. The first level is the models of the operating alternatives allowing to estimate how exactly to reorganize process of production of heat in the best way. For decrease in concentration of harmful emissions were chosen three of a way: burning of fuel with low coefficient of excess of air, two-level burning, recirculation of part of flue gases. For each of them the model in the notation of BPMN that allows to compare the time and financial expenditure demanded on realization of any way is constructed. For a concentration assessment as indicator of efficiency the second level of models – the imitating model belonging to the class of models of system dynamics is offered. She allows to receive concentration of all impurity for every day of the predicted month in the form of schedules. Thus, the complex of models in algorithm of management of environmental risks allows to estimate all indicators of efficiency chosen in article.

**Keywords:** ecology, ecological risks, management, business process, BPMN, imitating modeling, power system, concentration, harmful emissions

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-1-77-92

## REFERENCES

1. Mamonov V.I., Mamonova V.G. *Funktsional'naya model' sistemnogo analiza v probleme upravleniya kachestvom okruzhayushchei sredy goroda. Ch. 1* [Functional model of the system analysis in problem of environmental quality monitoring of the city. Pt. 1]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014. 92 p.
2. Mamonova V.G., Mikheev I.S. Modelirovanie protsessa «Khirurgicheskoe lechenie» s ispol'zovanie notatsii BPMN [Modeling of "Surgical treatment" process in BPMN notation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 2 (76), pp. 121–136.
3. Burkov V.N., Shchepkin A.V. *Ekologicheskaya bezopasnost'* [Environmental safety]. Moscow, IPU RAN Publ., 2003. 92 p.
4. *Tocsichnie ingridienti produktov sgoraniya organicheskogo topliva* [Toxic ingredients of the products combustion of organic fuel]: website Industrial and commercial center "IMDOS-M" – well-known Russian manufacturer of burners for oil refineries and petrochemical industry. Available at: <http://promgorelki.ru/> (accessed 02.03.2015)
5. *Ofitsial'nyi russkoyazychnyi sait kompanii AnyLogic* [Official Russian-speaking website of the AnyLogic company]. Available at: <http://www.anylogic.ru/> (accessed 02.03.2015)
6. *Skhema teplosnabzheniya goroda Novosibirska do 2030 goda. Sait Departamenta energetiki, zhilishchnogo i kommunal'nogo khozyaistva goroda Novosi-*

birska [Scheme of heat supply Novosibirsk city until 2030 year. Website of the Department of Energy, Housing and Communal Services Novosibirsk city]. Available at: <http://www.degkh.ru/shema-ts/> (accessed 02.03.2015)

7. Mamonova V.G., Ganelina N.D., Mamonova N.V. *Modelirovanie biznes-protsessov* [Modeling of business processes]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012. 43 p.

8. BPMN Specification. Object Management Group (OMG): website. Available at: <http://www.bpmn.org/> (accessed: 02.03.2015)

9. Robson M., Ullah P. *A practical guide to business process re-engineering*. Hampshire: Gower, 1996 (Russ. ed.: Robson M., Ullakh F. *Prakticheskoe rukovodstvo po reinzhiniringu biznes-protsessov*. Moscow, Audit Publ., YuNITI Publ., 1997. 224 p.). Available at: <http://www.management.com.ua/bpr/bpr012-2.html/> (accessed 02.03.2015)

10. Brimson J.A. *Strategiya reinzhiniringa dlya sovershenstvovaniya raboty organizatsii*. Elitarium 2.0. Tsentr distantsionnogo obrazovaniya: web-sait [Reengineering strategy for improving the organization's work. Website Distance Learning Center Elitarium 2.0]. Available at: [http://www.elitarium.ru/2007/05/17/strategiya\\_reinzhiniringa.html/](http://www.elitarium.ru/2007/05/17/strategiya_reinzhiniringa.html/) (accessed 02.03.2015)