

МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОСЛЕДСТВИЙ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Днекешев А.А.

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия
dnekeshev1991@gmail.com

Резчиков А.Ф., Степановская И.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
rw4cy@mail.ru, irstepan@yandex.ru

Кушников В.А., Кушникова Е.В.

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия
kushnikoff@yandex.ru, lkushnikova@gmail.com

Аннотация. Разработана математическая модель для системы подготовки и принятия решений нефтеперерабатывающего предприятия, позволяющая анализировать последствия атмосферных выбросов и рекомендовать действия по уменьшению ущерба.

Ключевые слова: нефтеперерабатывающее предприятие, атмосферные выбросы, химически опасные вещества, математическая модель, системы поддержки принятия решений.

Введение

В современном мире нефтеперерабатывающие предприятия являются важными компонентами энергетической инфраструктуры, которые за последние десятилетия увеличили свою промышленную деятельность, что привело к увеличению выбросов химически опасных веществ в атмосферу. Данное обстоятельство может иметь серьезные негативные последствия для окружающей среды и здоровья человека. Поэтому важно разрабатывать модели и методы поддержки принятия решений, которые помогут анализировать и предотвращать негативные последствия таких выбросов.

Анализ последствий атмосферных выбросов на нефтеперерабатывающих предприятиях является сложной задачей, требующей интеграции данных о выбросах, метеорологических условиях, топографии местности и других факторов. Для эффективного анализа и принятия решений в этой области в настоящее время достаточно эффективно используются модели и методы теории управления, искусственного интеллекта, теории графов, системной динамики и др., которые позволяют предсказывать и оценивать последствия выбросов химически опасных веществ [1-28].

1. Краткий обзор моделей и методов поддержки принятия решений при анализе последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ на нефтеперерабатывающих предприятиях

Одной из ключевых моделей, применяемых в анализе выбросов, является модель диффузии. Эта модель основывается на принципах физики и позволяет предсказывать распределение загрязнителей в атмосфере в зависимости от расположения их источников, весового расхода загрязнителей атмосферы, метеорологических условий и других факторов. Модель диффузии помогает определить зоны возможного воздействия выбросов и оценить уровень риска для окружающей среды и населения [1-5].

Другой важной моделью, успешно используемой в данной предметной области, является модель риска [6,7]. Она учитывает не только физические характеристики выбросов, но и вероятность их возникновения, а также восприимчивость окружающей среды и населения. Модель риска позволяет оценить потенциальные последствия выбросов и определить необходимые меры предосторожности для минимизации рисков.

Помимо моделей, в анализе выбросов широко применяются разнообразные методы поддержки принятия решений [8-10]. Один из таких методов связан с анализом чувствительности. Он позволяет определить, какие параметры выбросов имеют наибольшее влияние на результаты анализа и приоритетны для контроля. Анализ чувствительности помогает также установить наиболее важные аспекты, на которые следует обратить особое внимание при планировании мероприятий по снижению выбросов.

Еще одним методом является многокритериальный анализ, который позволяет учитывать несколько критериев при принятии решений [11-14]. В контексте анализа последствий выбросов на

нефтеперерабатывающих предприятиях многокритериальный подход может использоваться для оценки эффективности различных мероприятий по снижению выбросов, учитывая их экологическую эффективность, экономические затраты и другие факторы.

Важным элементом поддержки принятия решений является использование геоинформационных систем (ГИС) [15]. ГИС позволяют интегрировать различные данные, включая информацию о выбросах, топографии, населенных пунктах и других факторах в пространственной форме. Это позволяет визуализировать и анализировать данные, что помогает в принятии решений по управлению выбросами и предотвращению их негативных последствий.

Одной из наиболее распространенных моделей данной предметной области является модель распространения загрязнителей в атмосфере AERMOD (Atmospheric Dispersion Modeling System) [16,17]. Она основывается на уравнениях Навье-Стокса и учитывает такие факторы, как скорость и направление ветра, температура, влажность и другие параметры окружающей среды. AERMOD позволяет прогнозировать концентрации загрязнителей в различных точках окружающей среды и оценивать их влияние на здоровье человека.

Другой широко используемой моделью является модель CALPUFF, которая позволяет моделировать долгосрочное распространение загрязнителей в атмосфере на большие расстояния [18,19]. Она учитывает такие факторы, как атмосферная стабильность, турбулентность, влияние топографии и другие параметры. CALPUFF позволяет анализировать последствия выбросов на больших расстояниях от источника и определять зоны потенциального воздействия загрязнителей атмосферы.

Кроме перечисленных моделей и методов, в поддержку принятия решений при анализе последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ на нефтеперерабатывающих предприятиях достаточно широко применяется методология системной динамики [20-28].

Системная динамика является инструментом моделирования и анализа сложных динамических систем, включающих взаимодействия между различными компонентами и переменными. Она позволяет учитывать временные задержки, обратные связи, накопление и распространение эффектов в системе.

Применение системной динамики в анализе последствий атмосферных выбросов позволяет моделировать долгосрочные изменения в окружающей среде и оценивать динамику воздействия загрязнителей на различные компоненты системы, такие как атмосфера, почва, вода, растения и животные. Модели системной динамики строятся на основе системы дифференциальных уравнений и позволяют проводить сценарный анализ и оценку эффективности различных мер по снижению выбросов и минимизации их последствий.

Модель, построенная с использованием системной динамики, может включать в себя переменные, представляющие концентрации загрязнителей в атмосфере, эффективность технологий очистки, затраты на экологические мероприятия, а также факторы, влияющие на потребление энергии и производственные объемы. Это позволяет исследовать различные сценарии и оценить их последствия на протяжении времени.

Проанализировав все вышеперечисленные модели и методы анализа поддержки принятия решений последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ на нефтеперерабатывающих предприятиях были определены ряд их преимуществ:

- Учет динамических изменений: в отличие от модели CALPUFF и статических моделей метод системной динамики позволяет анализировать накапливаемые изменения в системе с течением времени. Это важно при анализе долгосрочных последствий выбросов и прогнозировании эффектов принимаемых решений на протяжении в том числе длительных интервалов времени.
- Учет сложной системы взаимосвязей между переменными модели: методология системной динамики позволяет учитывать сложные взаимосвязи и обратные связи между компонентами системы. В отличие от методов системного анализа и экспертных систем, которые могут учитывать взаимодействия только в пределах определенных моделей или знаний экспертов, системная динамика позволяет более полно и гибко моделировать взаимодействия между компонентами системы.
- Моделирование различных сценариев и стратегий: системная динамика позволяет моделировать и анализировать различные сценарии и стратегии воздействия на систему. В отличие от экспертных систем, которые основаны на предварительно заданных правилах и знаниях экспертов, метод системной динамики позволяет исследовать эффекты различных решений и стратегий в динамической системе.

- Учет задержек и инерций: в отличие от методов системного анализа и экспертных систем, метод системной динамики способен учитывать задержки и инерции в системе. Это особенно важно при анализе систем, где изменения в одной части системы могут проявиться с задержкой или иметь кумулятивные эффекты на других частях системы.
- Интеграция различных факторов и переменных: системная динамика позволяет интегрировать различные факторы, переменные и аспекты в системный анализ. В отличие, например, от модели CALPUFF, которая фокусируется на моделировании атмосферного распространения выбросов, метод системной динамики позволяет включать в модель и другие аспекты, такие как технические, экономические, экологические и социальные факторы, что позволяет получить более полную картину системы.

Таким образом, методология системной динамики обладает рядом преимуществ перед вышеупомянутыми моделями и методами, позволяя учитывать динамические изменения, сложные взаимосвязи, задержки и инерции, моделировать различные сценарии и учитывать широкий спектр факторов в анализе последствий атмосферных выбросов на нефтеперерабатывающих предприятиях.

2. Постановка задачи

Разработать математическую модель, позволяющую осуществить анализ последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ на нефтеперерабатывающем предприятии с учетом большого количества положительных и отрицательных обратных связей, существующих между переменными модели, а также внешних возмущений, существенно влияющих на безопасность функционирования нефтеперерабатывающего предприятия и величину ущерба от последствий атмосферных выбросов.

3. Математическая модель

Выше было установлено, что для решения поставленной задачи целесообразным представляется использование аппарата системной динамики, неоднократно успешно примененного при моделировании различных видов сложных процессов и систем. Для этого построим комплекс взаимосвязанных математических моделей, предусматривающий выполнение следующих действий:

- Выбор выходных переменных, отражающих влияние на безопасность работы нефтеперерабатывающего предприятия согласно ГОСТ Р 22.1.10-2002.
- Разработка графа причинно-следственных связей между переменными системы и внешними воздействиями.
- Построение системы уравнений системной динамики в общем виде, решение которых позволит прогнозировать значения переменных, связанных с безопасностью функционирования нефтеперерабатывающего предприятия на различных временных интервалах.
- Определение функциональных зависимостей между переменными с помощью аппарата регрессионного анализа.
- Анализ численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений высокой размерности.

Исходя из требований стандарта ГОСТ Р 22.1.10-2002, в качестве показателей, отражающих безопасность функционирования нефтеперерабатывающего предприятия, используются следующие переменные: $X_1(t)$ – время испарения химически опасных веществ в районе аварии с поверхности земли; $X_2(t)$ – время ликвидации последствий аварии на химически опасном; $X_3(t)$ – площадь заражения в результате аварии; $X_4(t)$ – время подхода первичного и/или вторичного облака к населенным пунктам; $X_5(t)$ – количество пораженных от первичного облака; $X_6(t)$ – количество пораженных от вторичного облака, чел.; $X_7(t)$ – количество получивших амбулаторную помощь, чел.; $X_8(t)$ – количество размещенных в стационаре и реанимации, чел.; $X_9(t)$ – количество пораженной техники, ед.; $X_{10}(t)$ – количество объемов растворов для обеззараживания местности; $X_{11}(t)$ – количество сил и средств, необходимых для проведения аварийно-спасательных работ; $X_{12}(t)$ – эффективность системы оповещения, в процентах; $X_{13}(t)$ – количество людей в зоне поражения; $X_{14}(t)$ – количество спасателей в зоне поражения; $X_{15}(t)$ – развитость системы МЧС.

Хотя некоторые из переменных имеют качественный характер, на практике используются количественные шкалы, которые имеют ясное физическое значение. Для преобразования этих переменных в количественное представление часто применяются методы нечеткой логики. В данном исследовании предполагается, что рассматриваемые переменные уже измеряются в количественной

шкале и при проведении вычислений используются их нормализованные значения, определенные по следующей формуле:

$$X_i^*(t) = \frac{X_i(t)}{x_i^{norm}}, i = \overline{1..15}, \quad (1)$$

где $X_i(t)$ – текущее значение характеристики, определенное в количественной шкале; x_i^{norm} – нормировочный коэффициент.

Кроме того, в модели учитываются внешние факторы, влияющие на безопасность функционирования нефтеперерабатывающего предприятия:

$F_1(t)$ – направление розы ветров; $F_2(t)$ – уровень финансирования системы МЧС города; $F_3(t)$ – степень экономического развития города; $F_4(t)$ – наличие прибыли у предприятия; $F_5(t)$ – доля современного оборудования на предприятии; $F_6(t)$ – использование особо опасных веществ в технологическом процессе; $F_7(t)$ – курс национальной валюты относительно доллара; $F_8(t)$ – курс национальной валюты относительно евро; $F_9(t)$ – количество убежищ.

4. Разработка графа причинно-следственных связей переменных системы и внешних факторов

Граф причинно-следственных связей позволяет определить релевантные с точки зрения решения задачи связи переменных системы и внешних факторов. На рис.1. такой граф построен для переменных модели $X_i(t)$, $i=1, \dots, 14$ и возмущений $F_i(t)$, $i=1, \dots, 9$, влияющих на безопасность функционирования нефтеперерабатывающего предприятия

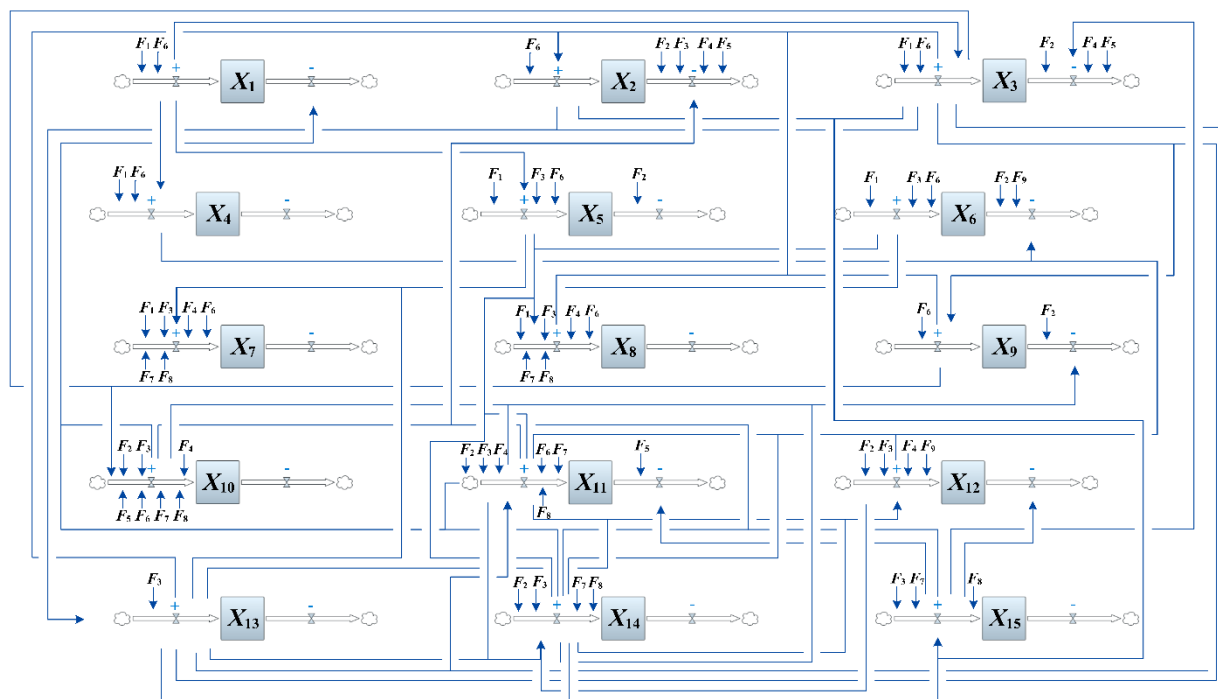


Рис.1. Граф причинно-следственных связей

Данный граф используется при формировании нелинейных дифференциальных уравнений системной динамики.

5. Синтез уравнений системной динамики

Построение моделей на основе аппарата системной динамики [20-28] предполагает выбор моделируемых переменных, называемых, в терминах системной динамики – уровнями, характеризующие функционирование системы. На их основе строятся дифференциальные уравнений вида:

$$\frac{dX(t)}{dt} = X^+(t) - X^-(t), \quad (2)$$

где $X^+(t)$, $X^-(t)$ – положительные и отрицательные, соответственно, темпы скорости изменения переменной $X(t)$, включающие все факторы, которые вызывают рост и убывание данной переменной, соответственно.

Делается допущение, что темпы представляют собой функции, которые зависят от факторов. Темпы имеют вид:

$$X^\pm(t) = f(F_1(t), F_2(t), \dots, F_k(t)) = f_1(F_1(t))f_2(F_1(t)), \dots, f_k(F_k(t)) \quad (3)$$

где F_1, \dots, F_k – факторы, которые могут представлять собой как переменные, так и внешние функции.

В соответствии с причинно-следственным графом показателей безопасности функционирования нефтеперерабатывающего предприятия построим уравнения системной динамики в общем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = (F_1(t) + F_6(t)) - (f_1(X_{10}(t)) \times f_2(X_{11}(t)) \times f_3(X_{14}(t))) \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = (f_4(X_3(t)) \times f_5(X_7(t)) \times f_6(X_8(t)) \times f_7(X_9(t)) \times f_8(X_{13}(t)) \times F_1(t) + \\ F_6(t)) - (f_9(X_{10}(t)) \times f_{10}(X_{11}(t)) \times f_{11}(X_{14}(t)) \times f_{12}(X_{15}(t)) \times F_2(t) + \\ F_3(t) + F_4(t) + F_5(t)) \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = (f_{13}(X_1(t)) \times F_1(t) + F_6(t)) - (f_{14}(X_{15}(t)) \times F_2(t) + F_4(t) + F_5(t)) \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = (f_{15}(X_1(t)) \times F_1(t) + F_6(t)) \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = (f_{16}(X_1(t)) \times F_1(t) + F_3(t) + F_6(t) - F_2(t)) \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = (F_1(t) + F_3(t) + F_6(t)) - (f_{17}(X_4(t)) \times f_{18}(X_{11}(t)) \times f_{19}(X_{12}(t)) \times \\ f_{20}(X_{14}(t)) \times F_2(t) + F_9(t)) \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = (f_{21}(X_5(t)) \times f_{22}(X_6(t)) \times f_{23}(X_{13}(t)) \times f_{24}(X_{15}(t)) \times F_1(t) + F_2(t) + \\ F_3(t) + F_4(t) + F_6(t) + F_7(t) + F_8(t)) \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = (f_{25}(X_5(t)) \times f_{26}(X_6(t)) \times f_{27}(X_{11}(t)) \times f_{28}(X_{13}(t)) \times f_{29}(X_{14}(t)) \times \\ f_{30}(X_{15}(t)) \times F_1(t) + F_2(t) + F_3(t) + F_4(t) + F_6(t) + F_7(t) + F_8(t)) \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = (f_{31}(X_3(t)) \times f_{32}(X_{13}(t)) \times F_1(t) + F_3(t) + F_6(t)) - (f_{33}(X_{10}(t)) \times \\ f_{34}(X_{11}(t)) \times f_{35}(X_{14}(t)) \times F_2(t)) \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} = (f_{35}(X_3(t)) \times f_{36}(X_9(t)) \times f_{37}(X_{15}(t)) \times F_2(t) + F_3(t) + F_4(t) + \\ F_5(t) + F_6(t) + F_7(t) + F_8(t)) \\ \frac{dX_{11}(t)}{dt} = (f_{38}(X_3(t)) \times f_{39}(X_{13}(t)) \times f_{40}(X_{14}(t)) \times F_2(t) + F_3(t) + F_4(t) + \\ F_6(t) + F_7(t) + F_8(t)) - (f_{41}(X_{15}(t)) \times F_5(t)) \\ \frac{dX_{12}(t)}{dt} = (f_{42}(X_{11}(t)) \times f_{43}(X_{13}(t)) \times f_{44}(X_{14}(t)) \times F_2(t) + F_3(t) + F_4(t) + \\ F_9(t)) - f_{45}(X_{15}(t)) \\ \frac{dX_{13}(t)}{dt} = (f_{46}(X_2(t)) \times f_{47}(X_3(t)) \times F_3(t)) \\ \frac{dX_{14}(t)}{dt} = (f_{48}(X_{11}(t)) \times f_{49}(X_{13}(t)) \times f_{50}(X_{14}(t)) \times F_2(t) + F_3(t) + \\ F_7(t) + F_8(t)) \\ \frac{dX_{15}(t)}{dt} = (f_{51}(X_2(t)) \times f_{52}(X_3(t)) \times f_{53}(X_{13}(t)) \times f_{54}(X_{14}(t)) \times F_2(t) + F_3(t) + \\ F_7(t) + F_8(t)) \end{array} \right. \quad (4)$$

В данной системе уравнений f_{ij} – это зависимости, численно характеризующие причинно-следственные связи между переменными модели. Как правило, они определяются с использованием статистической информации на этапе адаптации модели к особенностям функционирования конкретного нефтеперерабатывающего предприятия. Опыт использования моделей системной динамики показывает, что данные зависимости могут быть достаточно точно аппроксимированы полиномами невысоких степеней [20-28].

Система дифференциальных уравнений при выбранных ЛПР начальных условиях решается одним из численных методов, результаты решения на заданном временном интервале сравниваются с предельными значениями моделируемых переменных. Если происходит выход хотя бы одной

переменной $X_i(t)$, $i=1, \dots, 15$ в тот или иной момент времени за допустимые значения, то выдается перечень мероприятий, направленных на предотвращение нежелательного результата.

6. Заключение

Разработаны модель и методы поддержки принятия решений для анализа последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ на нефтеперерабатывающем предприятии, основанные на использовании системно-динамического подхода и теории причинно-следственных связей. Разработанное математическое обеспечение для системы управления нефтеперерабатывающего предприятия позволяет анализировать последствия атмосферных выбросов и рекомендовать действия по уменьшению ущерба.

Литература

1. Бруцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. – Киев: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
2. Аргучинцев В.К. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В.К. Аргучинцев., А.В. Аргучинцева. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – 255 с.
3. Beychok M.R. Fundamentals Of Stack Gas Dispersion (4th ed.), 2005. – 201 p.
4. De Visscher, Alex. Air Dispersion Modeling, foundations and applications (1st ed.). – Wiley, 2013. – 664 p.
5. El-Harbawi, M. Air quality modelling, simulation, and computational methods: A review // Environmental Reviews. 2013. – 21(3). – Pp. 149–179. DOI: 10.1139/er-2012-0056
6. Derman Emanuel. Model risk. Risk. – 1996. – Pp. 34–37.
7. Avellaneda M., Parás A. Pricing and hedging derivative securities in markets with uncertain volatilities // Applied Mathematical Finance. – 1995. – №2 (2). – Pp. 73–88. DOI:10.1080/13504869500000005
8. Ларичев О.И., Петровский А.В. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. – Т.21. – М.: ВИНТИ, 1987. – С. 131–164.
9. Сараев А.Д., Щербина О.А. Системный анализ и современные информационные технологии // Труды Крымской Академии наук. – Симферополь: СОНАТ, 2006. – С. 47–59.
10. Power D.J. A Brief History of Decision Support Systems – <http://DSSResources.COM/history/dsshhistory.html> (last access – May 29, 2023)
11. Javed, S.A., Mahmoudi, A. & Liu, S. Grey Absolute Decision Analysis (GADA) Method for Multiple Criteria Group Decision-Making Under Uncertainty // Int. J. Fuzzy Syst. – №22. – 2020. – Pp. 1073–1090. DOI: 10.1007/s40815-020-00827-8.
12. Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, NY., 1980. – 287 p.
13. Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Jusoh, A., & Md Nor, K. Multiple criteria decision-making techniques in transportation systems: a systematic review of the state of the art literature // Transport. – 2016. – №31(3). – Pp. 359–385. DOI: 10.3846/16484142.2015.1121517
14. Rezaei, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model // Omega. – 2016. – №64. – Pp. 126–130. DOI: 10.1016/J.OMEGA.2015.12.001
15. Геоинформатика. В 2 книгах / Кандалов Е., Кошкарёв А., Тикунов В [и др.]; Москва: Academia, 2010.
16. Prater, E.T. and Midgley, C. A new air dispersion modeling system is helping create more accurate industrial source models // Environmental Protection. – №3 (17). – 2008.
17. Brode, R.W., AERMOD Technical Forum, EPA R/S/L Modelers Workshop. – San Diego, California, 2006.
18. Turner, D.B. Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling (2nd ed.). – CRC Press, 1994.
19. M. H. Al-Jiboori, and A. F. Hassoon, Simulation Effect of Stability Classes on SO₂ Concentration in Daura Refinery and Neighboring Regions // Al-Mustansiriyah Journal of Science. – 2019. – №3 (30). – Pp. 1–8.
20. Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Кушников В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Шоломов К.И. Управление авиационно-транспортными системами на основе причинно-следственных деревьев событий // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2015. – № 6. – С. 13–17.
21. Кушников В.А., Яндыбаева Н.В. Модель Форрестера в управлении качеством образовательного процесса вуза // Прикладная информатика. – 2011. – №3 (33). – С. 65–73.
22. Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Яндыбаева Н.В. Математические модели для контроля, диагностики и прогнозирования состояния национальной безопасности России // Контроль. Диагностика. – 2016. – №3. – С. 43–51.
23. Кушников Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю. Модели и алгоритмы минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. – №57. – С. 158–190.

24. *Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф.* Математическая модель для определения массового и валового выброса атмосферных поллютантов промышленного предприятия // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – №4. – С. 134–140.
25. *Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю.* Модели минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий при неопределенности характеристик состояния окружающей среды // Экология промышленного производства. – 2015. – №4 (92). – С. 60–65.
26. *Kusheleva E., Rezchikov A., Kushnikov V., Ivaschenko V., Kushnikova E., Samartsev A.* Mathematical model for prediction of the main characteristics of emissions of chemically hazardous substances into the atmosphere // Studies in Systems, Decision and Control. – 2019. – Т. 199. – Pp. 594–607.
27. *Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Кушелева Е.В., Кушникова Е.В.* Моделирование последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу на основе аппарата системной динамики // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – №3 (177). – С. 40–47.
28. *Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Кушникова Е.В., Филимонюк Л.Ю., Барулина М.А.* Математическое моделирование определения степени загрязнения атмосферы при выбросах химических веществ // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – №2. – С. 17–25.