

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»  
(СГУ)

Кафедра математической кибернетики  
и компьютерных наук

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОСЛЕДСТВИЙ  
АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ  
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

аспиранта 4 курса  
направления 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника  
направленности «Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ»

Кушелевой Екатерины Вадимовны

Научный руководитель  
д.т.н., профессор

Кушников Вадим Алексеевич

Зав. кафедрой  
к.ф.-м.н.

Миронов Сергей Владимирович

Саратов 2019

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Выбросы химически опасных веществ на промышленных объектах могут стать причиной возникновения разрушительной техногенной катастрофы. В большинстве случаев они приводят к отравлению и гибели людей, а также к тяжелым экологическим последствиям. За последние десятилетия в России и мире произошел ряд таких химических катастроф на предприятиях, складах хранения ядовитых веществ, а также на дорогах при транспортировке химически опасного груза.

В связи с ростом промышленного производства увеличивается вероятность техногенных аварий, связанных с неконтролируемым выбросом химически опасных веществ в окружающую среду, что обуславливает актуальность прогнозирования возможных последствий химического заражения.

С учетом того, что большое количество промышленных объектов находится в черте города или в непосредственной близости от населенных пунктов, необходимо учитывать экологические условия жизни населения в городах. В крупных городах одним из основных источников атмосферных поллютантов является автомобильный транспорт. В связи с увеличением количества автотранспорта все более усугубляется проблема автомобильных заторов, растет их количество, продолжительность и протяженность. В результате длительного затора происходит массированный выброс поллютантов в атмосферу. Наиболее остро проблема ощущается в жилых массивах, размещенных на придорожных территориях, вблизи перекрестков и магистралей. Из-за постоянного затора люди, живущие или работающие вблизи автодороги, регулярно дышат воздухом с большим содержанием вредных веществ, что негативно воздействует на их дыхательные пути и весь организм в целом. При том, что сами люди чувствуют себя удовлетворительно и за медицинской помощью не обращаются. Эта часть населения становится более восприимчивой к негативным воздействиям

других химических веществ, последствия таких воздействий могут быть усугублены ослабленным состоянием людей. Эту часть населения необходимо учитывать при построении математической модели.

Теоретическое обоснование принципов функционирования систем экологического мониторинга и управления было осуществлено в работах таких отечественных и зарубежных ученых как Г.И.Марчук, Ю.Б.Гермейер, Ю.А.Израэль, М.Е.Берлянд, Г.Бригс, Ф.Гиффорд, Ф.Паскуилл и др. [5,7, 13-15, 21, 27].

В результате практического применения результатов этих исследований созданы и хорошо зарекомендовали себя на практике многие современные математические, аппаратные и программные средства экологического мониторинга и управления, например, такие как единая государственная система мониторинга окружающей среды Российской Федерации, системы экологического мониторинга США, Европейского Союза и т.д. [2, 17, 18, 20, 22-25].

Тем не менее, в настоящее время в специальной литературе практически отсутствуют сообщения о проблемно-ориентированных системах управления, осуществляющих поддержку принятия решений при прогнозировании основных характеристик последствий аварийных выбросов на промышленных объектах, находящихся в черте города.

Приведенные выше соображения обуславливают актуальность, экономическую целесообразность и практическую значимость данного исследования, предусматривающего разработку математических моделей, алгоритмов и комплексов программ для поддержки принятия решений при прогнозировании последствий выбросов химически опасных веществ на промышленном объекте.

Тема диссертации, внедрение ее основных результатов непосредственно связаны с таким приоритетным направлением развития науки и техники в Российской Федерации, как «Информационно - телекоммуникационные системы».

Кроме того, диссертационная работа соответствует темам основных научных исследований, проводимых в течение ряда лет на кафедрах «Математическая кибернетика и компьютерные науки» Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского и «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. Полученные результаты нашли также практическое применение в учебном процессе данных высших учебных заведений.

**Характеристика целей исследования.** Основная цель работы заключается в разработке проблемно-ориентированного математического, алгоритмического и программного обеспечения для поддержки принятия решений при прогнозировании последствий аварийных выбросов химически опасных веществ в атмосферу на промышленных предприятиях, находящихся в черте города, применение которого в составе автоматизированных систем управления производственного назначения позволит увеличить эффективность ликвидации последствий таких выбросов.

**Предметом исследования** являются основные характеристики последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу на промышленных предприятиях.

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории управления, теории графов, аппарата системной динамики, теории дифференциальных уравнений, математического программирования, имитационного моделирования, численные методы, а также методы проектирования информационных систем распределенной структуры.

#### **Научная новизна.**

1. Выполнено обоснование необходимости учета уровня загрязнения воздушной среды городов от автомобильных заторов как внешнего фактора, усугубляющего негативные последствия аварийных выбросов на промышленных предприятиях.

2. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать динамику распространения вредных веществ, попавших в атмосферу от автотранспортных заторов.

3. Разработан алгоритм для определения территорий, где регулярно наблюдаются повышенные концентрации вредных веществ, попавших в атмосферу в результате автомобильных заторов.

4. На основе формального аппарата системной динамики разработана математическая модель для прогнозирования основных характеристик выбросов химически опасных веществ на промышленных объектах.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость исследования заключается в разработке нового математического и алгоритмического обеспечения для проблемно-ориентированных систем управления промышленных предприятий, организаций экологического надзора, подразделений МЧС, отвечающих за ликвидацию последствий выбросов в атмосферу химически опасных веществ.

Практическая значимость работы связана с созданием программного обеспечения, используемого при прогнозировании последствий аварийных выбросов с целью принятия наиболее эффективных решений по их ликвидации. Разработанный программный продукт может быть использован при модернизации информационных систем прогнозирования последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу, а также в тренажерных системах для обучения оперативно-диспетчерского персонала МЧС.

**Достоверность** теоретических разработок и выводов подтверждается корректностью применения математического аппарата системной динамики, теории дифференциальных уравнений, численных методов, согласованностью результатов теоретических расчетов с данными, определенными в процессе практической апробации работы, а также натурными экспериментами с разработанным математическим и программным обеспечением.

## **Выносимые на защиту результаты**

1. Постановка задачи необходимости прогнозирования последствий атмосферных выбросов химически опасных веществ в атмосферу на промышленных объектах, находящихся в условиях городской среды.

2. Математическая модель для прогнозирования распространения атмосферных поллютантов от автотранспортных заторов.

3. Алгоритм для определения территорий, где регулярно наблюдаются повышенные концентрации вредных веществ, попавших в атмосферу в результате автомобильных заторов.

4. Математическая модель для прогнозирования основных характеристик выбросов химически опасных веществ на промышленных объектах.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались в 2017 - 2018 г.г. на ряде конференций и научных семинарах различного уровня: XIII Международной научно-практической конференции «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах» (Саратов, 2017); XIV Международной научно-практической конференции «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах» (Саратов, 2018); V Международной юбилейной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017)» (Саратов, 2017); XXX Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-30» (Саратов, 2017); XXXI Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-31» (Саратов, 2018); Международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии» (Саратов, 2018); на научных семинарах кафедры «Математическая кибернетика и компьютерные науки» Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского; на научно - практических семинарах лаборатории "Системные проблемы автоматизации и управления

в машиностроении" Института проблем точной механики и управления РАН.

**Публикации.** Основные результаты опубликованы в XIII научных работах, 4 из них изданы в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка использованной литературы; она содержит 52 страницы текста, 14 рисунков, 3 таблицы и список использованных источников из 32 наименований.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе приведено краткое описание промышленных объектов, использующих химически опасные вещества и особенности организации ликвидации последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу. Приведены соображения, обуславливающие актуальность и практическую значимость разработки математических моделей, алгоритмов и комплексов программ для поддержки принятия решений при прогнозировании последствий выбросов химически опасных веществ на промышленном объекте.

Кроме того, пояснена необходимость учета уровня загрязнения воздушной среды от автомобильных заторов как внешнего фактора, усугубляющего негативные последствия выбросов на промышленных предприятиях.

Во **второй** главе разработана математическая модель для прогнозирования распространения атмосферных поллютантов от автотранспортных заторов.

Решение поставленной задачи проводится в три этапа.

На первом этапе необходимо определить поле скорости ветра. С учетом предположения о безвихревом воздушном потоке, уравнение для определения поля скорости воздушного потока будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  - потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушного потока:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (2)$$

На втором этапе проводится определение количества источников вредных выбросов, их местонахождения и интенсивности. Выбирается исследуемый участок дороги с автомобильным затором, его длина и средняя загруженность. На основании этих данных рассчитывается количество автотранспортных средств.

На третьем этапе решается задача о переносе загрязняющих веществ в атмосфере. В качестве моделирующего уравнения используем уравнение массопереноса:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial c}{\partial z} - \alpha c + Q_s(t) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s), \quad (3)$$

где  $c$  – искомая концентрация токсичного вещества;  $x, y, z$  - координаты точки расчета по осям абсцисс, ординат и аппликата, соответственно;  $t$  - время;  $u, w, v$  - проекции вектора средней скорости перемещения вещества на оси абсцисс, ординат и аппликата соответственно;  $\alpha$  - коэффициент изменения концентрации вещества из-за химических превращений;  $k_x, k_y, k_z$  - составляющие коэффициента обмена по осям  $x, y, z$ , соответственно;  $Q_s$  – интенсивность выброса токсичного вещества;  $\delta(x - x_s)$  - дельта-функция Дирака;  $x_s, y_s, z_s$  – координаты источника эмиссии токсичного вещества.

В **третьей** главе разработана математическая модель для

прогнозирования основных характеристик выбросов химически опасных веществ на промышленных объектах.

При разработке математической модели в соответствии с ГОСТ Р 22.1.10-2002 в качестве основных характеристик последствий выброса химически опасных веществ на промышленном объекте были выбраны следующие параметры:  $X_1$  – время испарения химически опасных веществ в районе аварии с поверхности земли;  $X_2$  – время ликвидации последствий аварии на химически опасном объекте;  $X_3$  – площадь заражения в результате аварии;  $X_4$  – время подхода первичного и/или вторичного облака к населенным пунктам;  $X_5$  – количество пораженных от первичного облака, чел.;  $X_6$  – количество пораженных от вторичного облака, чел.;  $X_7$  – количество получивших амбулаторную помощь, чел.;  $X_8$  – количество размещенных в стационаре и реанимации, чел.;  $X_9$  – количество пораженной техники, ед.;  $X_{10}$  – количество объемов растворов для обеззараживания местности;  $X_{11}$  – количество сил и средств, необходимых для проведения аварийно-спасательных работ;  $X_{12}$  – эффективность системы оповещения, %.

Факторы внешней среды, влияющие на скорость изменения значений основных характеристик модели:  $F_1$  – общее количество выброшенных химически опасных веществ на объекте при аварии;  $F_2$  – количество персонала на химически опасном объекте;  $F_3$  – скорость ветра;  $F_4$  – температура воздуха;  $F_5$  – время до начала оповещения населения;  $F_6$  – численность населения, проживающего на зараженной территории;  $F_7$  – количество убежищ.

С учетом того, что большое количество промышленных объектов находится в черте города или в непосредственной близости от населенных пунктов, необходимо учитывать экологические условия жизни населения в городах.

Для этого вводится дополнительная характеристика  $X_{13}$  – количество людей, подвергавшихся регулярному воздействию выбросов от автомобильного транспорта, включая выбросы, связанные с заторами, и

внешний фактор  $F_8$  – размер территории, для которой в воздухе регулярно наблюдаются повышенные концентрации вредных веществ, попавших в атмосферу в результате работы моторов автомобилей, в т.ч. стоящих в заторах.

Расчетная схема данной модели основана на использовании системно-динамического подхода. На основе анализа взаимосвязей между исследуемыми характеристиками аварии на химически опасном объекте был построен ориентированный граф причинно-следственных связей (рис. 1).

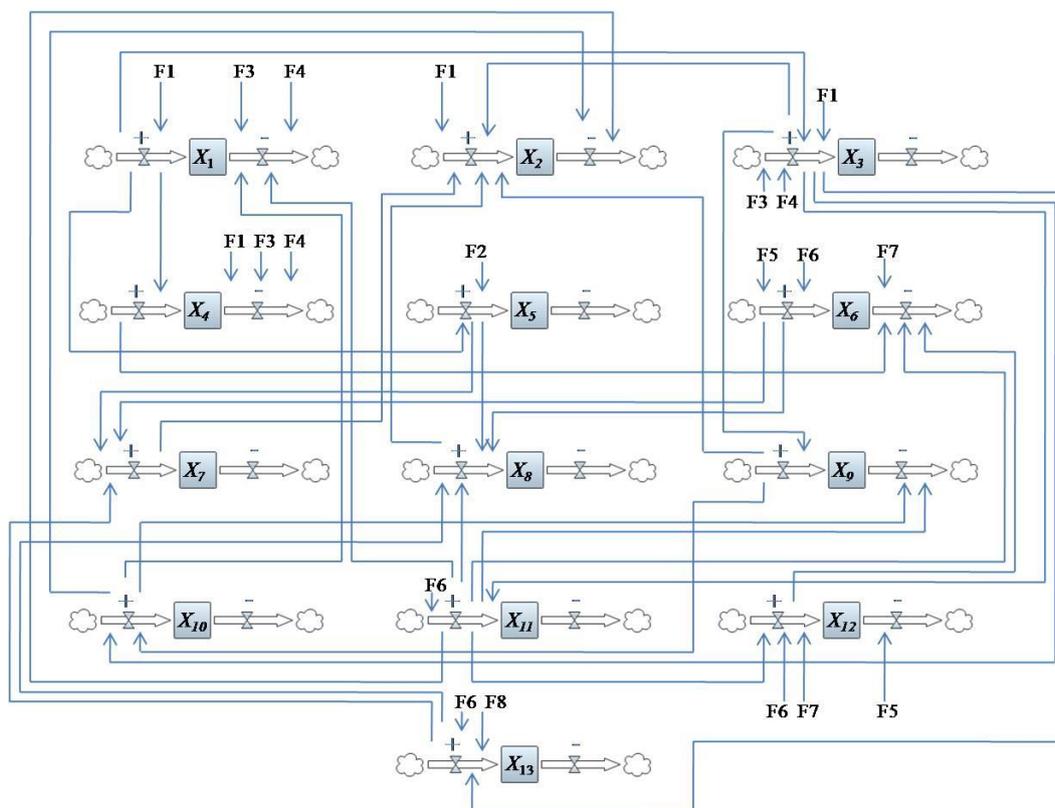


Рис. 1. Граф причинно-следственных связей между характеристиками аварии на химически опасном объекте.

Общий вид математической модели, используемой для прогнозирования последствий аварий на химически опасных объектах, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{1}{X_1^{\max}} (f_1^+(F_1) - f_1^-(X_{10}(t), X_{11}(t), F_3, F_4)), \\
\frac{dX_2(t)}{dt} = \frac{1}{X_2^{\max}} (f_2^+(X_3(t), X_7(t), X_8(t), X_9(t), F_1) - f_2^-(X_{10}(t), X_{11}(t))), \\
\frac{dX_3(t)}{dt} = \frac{1}{X_{31}^{\max}} (f_3^+(X_1(t), F_1, F_3, F_4)), \\
\frac{dX_4(t)}{dt} = \frac{1}{X_4^{\max}} (f_4^+(X_1(t)) - f_4^-(F_1, F_3, F_4)), \\
\frac{dX_5(t)}{dt} = \frac{1}{X_5^{\max}} (f_5^+(X_1(t), F_2)), \\
\frac{dX_6(t)}{dt} = \frac{1}{X_6^{\max}} (f_6^+(F_5, F_6) - f_6^-(X_4(t), X_{11}(t), X_{12}(t), F_7)), \\
\frac{dX_7(t)}{dt} = \frac{1}{X_7^{\max}} (f_7^+(X_5(t), X_6(t), X_{13}(t))), \\
\frac{dX_8(t)}{dt} = \frac{1}{X_8^{\max}} (f_8^+(X_5(t), X_6(t), X_{11}(t), X_{13}(t))), \\
\frac{dX_9(t)}{dt} = \frac{1}{X_9^{\max}} (f_9^+(X_3(t)) - f_9^-(X_{10}(t), X_{11}(t))), \\
\frac{dX_{10}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{10}^{\max}} (f_{10}^+(X_3(t), X_9(t))), \\
\frac{dX_{11}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{11}^{\max}} (f_{11}^+(X_3(t), F_6)), \\
\frac{dX_{12}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{12}^{\max}} (f_{12}^+(X_{11}(t), F_6, F_7) - f_{12}^-(F_5)), \\
\frac{dX_{13}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{13}^{\max}} (f_{13}^+(X_3(t), F_6, F_8)).
\end{array} \right. \quad (4)$$

Система уравнений (4) решается при начальных условиях  $t_0 = 0, X_i(t_0) = X_{i0}, i = \overline{1,13}$ .

В четвертой главе производится экспериментальная проверка разработанного математического обеспечения. Проверка адекватности модели осуществлялась посредством сравнения значений прогнозируемых характеристик, полученных в результате решения системы (4), с реальными данными выброса химически опасного вещества в атмосферу, произошедшем

на промышленном объекте одного из городов РФ. Среднее значение относительных погрешностей в узлах моделирования для каждой характеристики не превышает 13%. Это позволяет утверждать, что разработанная математическая модель является адекватной.

Процедура использования разработанного математического обеспечения при решении задачи уменьшения ущерба от атмосферных выбросов химического предприятия пояснена с помощью информационно-логической схемы.

### **Заключение**

Основным итогом работы является решение научной проблемы, связанной с разработкой специализированного математического обеспечения, включающего постановки задач, математические модели и алгоритмы для прогнозирования основных характеристик последствий выбросов на промышленных предприятиях химически опасных веществ в атмосферу с учетом загрязненности воздушных бассейнов больших городов от автомобильных заторов как внешнего фактора, влияющего на изменение указанных характеристик.

1. Выполнено обоснование необходимости учета уровня загрязнения воздушной среды городов от автомобильных заторов как внешнего фактора, усугубляющего негативные последствия аварийных выбросов на промышленных предприятиях.

2. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать динамику распространения вредных веществ, попавших в атмосферу от автотранспортных заторов.

3. На основе формального аппарата системной динамики разработана математическая модель для прогнозирования основных характеристик выбросов химически опасных веществ на промышленных объектах.

4. Произведена экспериментальная проверка разработанного математического обеспечения на примере реального выброса химически

опасного вещества в условиях городской среды.

5. Представлена информационно-логическая схема для процедуры использования разработанного математического обеспечения при решении задачи уменьшения ущерба от атмосферных выбросов химического предприятия.

### **Работы, опубликованные автором по указанной теме**

1. Кушелева Е.В. Прогнозирование уровня загрязнений территорий поллютантами на основе уравнения турбулентной диффузии // Сборник научных статей XIII Международной научной конференции «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах» - 2017. - С. 52-57.

2. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. Модель для прогнозирования уровня загрязнений территорий поллютантами на основе уравнения турбулентной диффузии // Сборник трудов Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» - 2017. - Т.7. С. 111-114.

3. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. Модель прогнозирования уровня химически опасных веществ в атмосфере при аварийных выбросах. // Сборник трудов V Международной юбилейной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации». - 2017. С. 452-456.

4. Кушелева Е.В., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А. Моделирование распространения атмосферных поллютантов от дорог с затрудненным движением // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2018. №1.

5. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. Модель для прогнозирования последствий аварии на химически опасном объекте // Сборник трудов Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ» - 2018. - Т. 3. С. 102-105.

6. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. Прогнозирование концентрации атмосферных поллютантов от автотранспортных заторов // Сборник трудов Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ» - 2018. - Т. 4. С. 18-21.

7. Кушелева Е.В., Кушников В.А., Резчиков А.Ф. Прогнозирование процесса распространения атмосферных поллютантов при заторах на автомобильных дорогах // Сборник материалов Международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии» - 2018. С. 232-235.

8. Кушелева Е.В., Кушников В.А., Резчиков А.Ф. Математическая модель для определения концентрации атмосферных поллютантов от точечных источников эмиссии // Сборник научных статей Международной научной конференции «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах» - 2018. С. 226-231.

9. Kusheleva E.V., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., Kushnikova E.V., Samartsev A.A. Mathematical model for prediction of the main characteristics of emissions of chemically hazardous substances into the atmosphere. Studies in Systems, Decision and Control 199, 594-607 (2019).

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. 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.

2. Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Богомолов А.С., Кушникова Е.В., Самарцев А.А., Хамутова М.В. Модель для прогнозирования распространения атмосферных поллютантов при автотранспортных заторах // Системы управления и

информационные технологии, №2(72), 2018. – С. 55-60.

3. 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.

4. Цвиркун А.Д., Кушелева Е.В., Резчиков А.Ф., Кушникова Е.В., Иващенко В.А., Кушников В.А. Математическая модель для прогнозирования последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу с учетом загрязнения городского воздуха автотранспортом // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. 2019. №1. С. 137-154.