

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 004.942

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЫБРОСОВ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ С УЧЕТОМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОГО ВОЗДУХА АВТОТРАНСПОРТОМ

Статья поступила в редакцию 13.02.2019, в окончательном варианте – 20.02.2019.

Цвиркун Анатолий Данилович, Институт проблем управления Российской академии наук, 117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65,

доктор технических наук, профессор, e-mail: tsvirkun@ipu.ru

Кушелева Екатерина Вадимовна, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, аспирант, e-mail: kushelvae@mail.ru

Резчиков Александр Федорович, Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, 410028, Российская Федерация, Саратов, ул. Рабочая, 24,

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, e-mail: iptmuran@san.ru

Кушникова Елена Вадимовна, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,

кандидат технических наук, e-mail: lkushnikova@gmail.com

Иващенко Владимир Андреевич, Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, 410028, Российская Федерация, Саратов, ул. Рабочая, 24,

доктор технических наук, профессор, e-mail: iptmuran@san.ru

Кушников Вадим Алексеевич, профессор, Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, 410028, Российская Федерация, Саратов, ул. Рабочая, 24,

доктор технических наук, e-mail: kushnikoff@yandex.ru

С ростом промышленного производства увеличивается вероятность техногенных аварий, связанных с неконтролируемыми выбросами химически опасных веществ в окружающую среду. Это обуславливает необходимость прогнозирования возможных последствий химического загрязнения среды, особенно воздуха. Поскольку значительное количество промышленных объектов находится в черте городов, то при оценке последствий таких выбросов необходимо учитывать уже существующий уровень загрязнения городских территорий вредными химическими веществами и соединениями. Они могут образовываться, например, в процессе функционирования автотранспорта. Все это делает актуальным разработку математического обеспечения для систем экологического контроля и мониторинга, позволяющего прогнозировать последствия выбросов химически опасных веществ в атмосферу с учетом регулярного загрязнения городского воздуха автотранспортом. Целью статьи является разработка математической модели, позволяющей на различных временных интервалах, с учетом параметров внешней среды и нелинейных взаимосвязей между прогнозируемыми переменными, количественно оценить последствия выбросов химически опасных веществ в атмосферу. Используемые методы: на основе математического аппарата системной динамики для описания исследуемого объекта построена система нелинейных дифференциальных уравнений, численное решение которой выполнено с помощью метода Рунге – Кутты 4-го порядка. Научная новизна статьи связана с разработкой комплексной математической модели для прогнозирования основных характеристик выбросов химически опасных веществ с учетом существующего загрязнения воздуха вблизи автомагистралей. Адекватность модели проверялась путем сравнения расчетных значений моделируемых характеристик с экспериментальными данными. Среднее значение относительных погрешностей в узлах моделирования для каждой характеристики не превышает 13 %, что подтверждает адекватность модели. Разработанное математическое обеспечение может быть использовано при модернизации информационных систем прогнозирования последствий выбросов химически опасных веществ, а также в тренажерных системах для обучения оперативно-диспетчерского персонала МЧС.

Ключевые слова: городская среда, химически опасные вещества, выбросы в атмосферу, распространение в атмосфере, последствия выбросов, загрязнение воздуха автотранспортом, здоровье населения, математическое моделирование, система дифференциальных уравнений

Графическая аннотация (Graphical annotation)



**MODEL FOR PREDICTING THE CONSEQUENCES OF AN ACCIDENT
WITH THE RELEASE OF CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES INTO THE ATMOSPHERE,
TAKING INTO ACCOUNT REGULAR AIR POLLUTION BY AUTOTRANSPORT**

The article was received by editorial board on 13.02.2019, in the final version – 20.02.2019.

Tsvirkun Anatolij D., Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: tsvirkun@ipu.ru

Kusheleva Ekaterina V., Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation,

post-graduate student, e-mail: kushelevae@mail.ru

Rezchikov Alexander F., Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov, 410028, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, e-mail: iptmuran@san.ru

Kushnikova Elena V., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov, Russian Federation, 410054,

Cand. Sci. (Engineering), e-mail: lkushnikova@gmail.com

Ivashhenko Vladimir A., Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov, 410028, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: iptmuran@san.ru

Kushnikov Vadim A., Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov, 410028, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: kushnikoff@yandex.ru

With the growth of industrial production increases the likelihood of man-made accidents associated with uncontrolled emissions of chemically hazardous substances into the environment. This necessitates the prediction of the possible effects of chemical contamination. Since a significant number of industrial facilities are located within the city limits, when assessing the effects of such emissions, it is necessary to take into account the already existing level of contamination of urban areas with harmful chemicals and compounds. They can be formed, for example, during the operation of a vehicle. All this makes the development of mathematical software for environmental monitoring and monitoring systems relevant, which makes it possible to predict the effects of emissions of chemically hazardous substances into the atmosphere, taking into account the regular pollution of urban air by road transport. The purpose of the article is to develop a mathematical model that allows for various time intervals, taking into account the parameters of the environment and non-linear relationships between the predicted variables, to quantify the effects of emissions of chemically dangerous substances into the atmosphere. Methods used: on the basis of the mathematical apparatus of system dynamics, a system of nonlinear differential equations was constructed to describe the object under study, the numerical solution of which was performed using the 4th order Runge – Kutta

method. The scientific novelty of the article is connected with the development of an integrated mathematical model for predicting the main characteristics of emissions of chemically hazardous substances, taking into account the existing air pollution near highways. The adequacy of the model was tested by comparing the calculated values of the simulated characteristics with experimental data. The average value of the relative errors in the modeling nodes for each characteristic does not exceed 13 %, which confirms the adequacy of the model. The developed software can be used for upgrading information systems for predicting the effects of emissions of chemically hazardous substances, as well as in simulator systems for training the operational dispatching personnel of the Emergencies Ministry.

Key words: urban environment, chemically dangerous substances, bursts in the atmosphere, distribution in the atmosphere, consequences of bursts, air pollution by motor transport, health of the population, mathematical simulation, system of differential equations

Введение. В связи с ростом промышленного производства во всем мире увеличивается вероятность возникновения техногенных аварий, связанных с неконтролируемым выбросом химически опасных веществ в окружающую среду. Такие аварии являются одним из возможных видов опасных техногенных катастроф. В большинстве случаев они приводят к отравлению, а иногда и гибели людей, к тяжелым экологическим последствиям.

Для повышения эффективности ликвидации последствий выбросов в атмосферу химически опасных веществ необходимо иметь возможность прогнозирования характеристик выбросов, влияющих на величину ущерба. Осуществление прогнозирования позволяет подготовиться к чрезвычайным ситуациям (ЧС), разработать планы необходимых действий, дает возможность смягчить последствия химических аварий, снизить риск тяжелых экологических последствий и потерь среди населения [7–9].

Теоретическое обоснование принципов функционирования систем экологического мониторинга и управления было осуществлено в работах таких отечественных и зарубежных ученых, как Г.И. Марчук [10], Ю.Б. Гермейер [4], Н.Н. Моисеев [11], М.Е. Берлянд [2], F.Gifford [21], F. Pasquill [27], D. Haugen [24] и др. Тем не менее в настоящее время в специальной литературе отсутствуют методологические указания и разработки систем управления, осуществляющих поддержку принятия решений, на основании прогнозирования основных характеристик последствий аварийных выбросов на промышленных объектах, находящихся в черте города.

Программы серии «Эколог» [12], получившие значительное распространение (например, при проведении проектных работ в сфере строительства), также не позволяют оценить изменение во времени основных характеристик последствий выброса химически опасных веществ на промышленном объекте, определенных в соответствии с ГОСТ Р 22.1.10-2002 [1] с учетом большого количества положительных и отрицательных, линейных и нелинейных обратных связей, существующих между характеристиками загрязнения окружающей среды.

С учетом того, что большое количество промышленных объектов находится в черте городов, необходимо учитывать экологическую загрязненность их воздушных бассейнов. Одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха в городах являются автотранспортные магистрали, и особенно заторы на них. Поэтому при разработке моделей необходимо учитывать, что часть населения регулярно находится вблизи или на автомобильных магистралях (в том числе по пути на работу и с работы); вдыхает загрязненный воздух, в том числе связанный с заторами на автомагистралях. В свою очередь это негативно влияет на здоровье людей и приводит к увеличению их восприимчивости к негативным воздействиям других химических веществ; снижению иммунитета к инфекционным заболеваниям; общему увеличению заболеваемости, в том числе и неинфекционного характера.

Исходя из этого, в статье предложена математическая модель, основанная на системной динамике [18]. Она позволяет на различных временных интервалах и с учетом параметров внешней среды определять моделируемые характеристики воздушной среды.

Математическая модель. При разработке математической модели в соответствии с ГОСТ Р 22.1.10-2002 [1] 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. В крупных городах одним из основных источников атмосферных загрязнителей является автомобильный транспорт. В связи с увеличением количества автотранспорта (при невозможности во многих случаях увеличения пропускной способности дорог) все более усугубляется проблема автомобильных заторов; растет их количество; продолжительность и протяженность; количество остановившихся единиц автотранспорта, у которых продолжают работать двигатели. В результате длительных заторов происходит массированный выброс загрязнителей в атмосферу. При этом особую опасность представляют выбросы от грузового автотранспорта (в том числе тяжелых грузовиков) и многоместных автобусов междугородного сообщения.

Наиболее остро проблема загрязнения воздуха автотранспортом ощущается в жилых массивах, размещенных на прилегающих к автомагистралям территориях; вблизи перекрестков автомагистралей. При этом зеленые насаждения вдоль автодорог не могут осуществлять «очистку» воздуха в осенне-зимний период, по крайней мере, в средней полосе и на севере России.

Из-за постоянных заторов люди, живущие или работающие вблизи автодорог, регулярно дышат воздухом с большим содержанием вредных веществ, включая двуокись азота, тетраэтилсвинец, угарный газ и пр. Это негативно воздействует на их дыхательные пути и весь организм в целом.

Отметим, что сами люди в силу привычки к загрязненному воздуху могут чувствовать себя удовлетворительно и за медицинской помощью не обращаться. Однако указанная часть населения городов становится более восприимчивой к негативным воздействиям других химических веществ, причем последствия таких воздействий могут быть усугублены ослабленным состоянием людей.

Указанную часть населения необходимо учитывать при построении математической модели. 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 том числе стоящих в заторах.

Расчетная схема данной модели основана на использовании системно-динамического подхода. Он получил значительное распространение при имитационном моделировании режимов функционирования сложных систем и анализе эффективности различных сценариев их развития [20, 22–23, 25–26, 28–32].

При использовании математического аппарата системной динамики для описания исследуемого объекта осуществляется построение системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = X_i^+(t) - X_i^-(t), i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $X_i^+(t)$, $X_i^-(t)$, $\overline{1, n}$ – непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения характеристики $X_i(t)$, $X_i^-(t) = f_i^-(F_1, F_2, \dots, F_m)$, $X_i^+(t) = f_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m)$; F_j , $j = \overline{1, m}$ – факторы, влияющие на скорость изменения значения характеристики [3].

На основе анализа взаимосвязей между исследуемыми характеристиками аварии на химически опасном объекте был построен ориентированный граф причинно-следственных связей (рис. 1).

При построении графа использовался набор знаков и правил, традиционно применяемых для графического описания моделей системной динамики, а сам рисунок был построен в среде программного обеспечения Anylogic 8.3.2, предназначенного для выполнения моделирования.

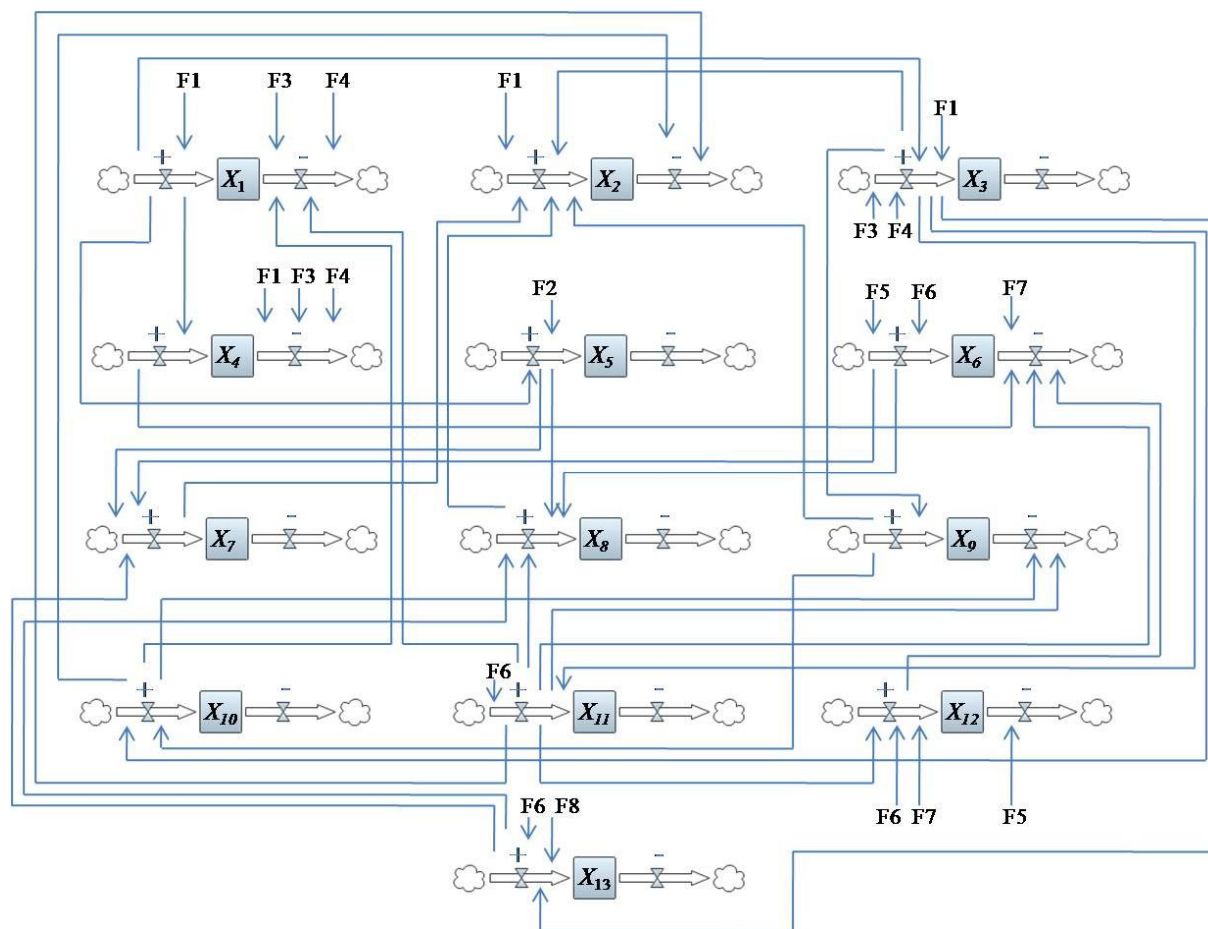


Рисунок 1 – Граф причинно-следственных связей между характеристиками аварии на химически опасном объекте

При разработке математической модели для каждой характеристики $X_i(t), i = \overline{1,13}$ необходимо построить уравнение вида (1). Например, для переменной X_3 дифференциальное уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{dX_3(t)}{dt} = X_3^+(t) + X_3^-(t) = f_3^+(X_1(t), F_1, F_3, F_4),$$

где f_3^+ – функциональная зависимость площади заражения от времени испарения химически опасных веществ в районе аварии с поверхности земли; общего количества выброшенных химически опасных веществ на объекте; скорости ветра; температуры воздуха.

Аналогично составляются уравнения и для других переменных.

С учетом вышеизложенного общий вид математической модели, используемой для прогнозирования последствий аварий на химически опасных объектах, имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
\frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{1}{X_1^{\max}} (f_1^+(F_1) - f_1^-(X_{10}(t), X_{11}(t), F_3, F_4)), \\
\frac{dX_2(t)}{dt} = \frac{1}{X_2^{\max}} (f_2^+(X_3(t), X_7(t), X_8(t), X_9(t), F_1) - f_2^-(X_{10}(t), X_{11}(t))), \\
\frac{dX_3(t)}{dt} = \frac{1}{X_{31}^{\max}} (f_3^+(X_1(t), F_1, F_3, F_4)), \\
\frac{dX_4(t)}{dt} = \frac{1}{X_4^{\max}} (f_4^+(X_1(t)) - f_4^-(F_1, F_3, F_4)), \\
\frac{dX_5(t)}{dt} = \frac{1}{X_5^{\max}} (f_5^+(X_1(t), F_2)), \\
\frac{dX_6(t)}{dt} = \frac{1}{X_6^{\max}} (f_6^+(F_5, F_6) - f_6^-(X_4(t), X_{11}(t), X_{12}(t), F_7)), \\
\frac{dX_7(t)}{dt} = \frac{1}{X_7^{\max}} (f_7^+(X_5(t), X_6(t), X_{13}(t))), \\
\frac{dX_8(t)}{dt} = \frac{1}{X_8^{\max}} (f_8^+(X_5(t), X_6(t), X_{11}(t), X_{13}(t))), \\
\frac{dX_9(t)}{dt} = \frac{1}{X_9^{\max}} (f_9^+(X_3(t)) - f_9^-(X_{10}(t), X_{11}(t))), \\
\frac{dX_{10}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{10}^{\max}} (f_{10}^+(X_3(t), X_9(t))), \\
\frac{dX_{11}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{11}^{\max}} (f_{11}^+(X_3(t), F_6)), \\
\frac{dX_{12}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{12}^{\max}} (f_{12}^+(X_{11}(t), F_6, F_7) - f_{12}^-(F_5)), \\
\frac{dX_{13}(t)}{dt} = \frac{1}{X_{13}^{\max}} (f_{13}^+(X_3(t), F_6, F_8))
\end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) решается при начальных условиях $t_0 = 0$, $X_i(t_0) = X_{i0}$, $i = \overline{1,13}$.

При проведении вычислительных экспериментов для решения (2) использовалась среда программного обеспечения Mathworks MATLAB R2017b, позволяющая реализовать расчетные схемы метода Рунге – Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага. Это обеспечило требуемую точность определения моделируемых характеристик. Функциональные зависимости $f_i^{+/-}$, $i = \overline{1,13}$ определяются в процессе адаптации модели к конкретному процессу выбросов химических веществ и строятся на основе статистических данных. При отсутствии статистически значимой информации предлагается пользоваться соответствующими зависимостями, определенными исходя из анализа накопленного опыта специалистов и физического смысла решаемой задачи.

Модельный пример. На промышленном объекте одного из городов РФ произошёл разлив 27 т. хлора [14]. Газовое облако при температуре воздуха $t = -1^\circ\text{C}$ и скорости ветра 1 м/с проникло на глубину до 7,5 км в жилой район с плотностью населения 2500 чел/км².

Очаг фактического заражения подразделялся на следующие секторы (табл. 1).

Таблица 1 – Секторы очага фактического загрязнения.

Степень загрязнения	Величина сектора, км ²	Кол-во пострадавших чел.
Слабозагрязненная территория	3,2	7900
Сектор с умеренным загрязнением	1,1	2737
Сектор со средней плотностью загрязнения	0,6	1436
Сектор с сильным загрязнением	0,2	429

Площадь очага фактического загрязнения составила 5 км², на этой площади проживали 12 500 жителей.

На рисунке 2 изображена примерная схема распространения хлора в воздушной среде в результате выброса.

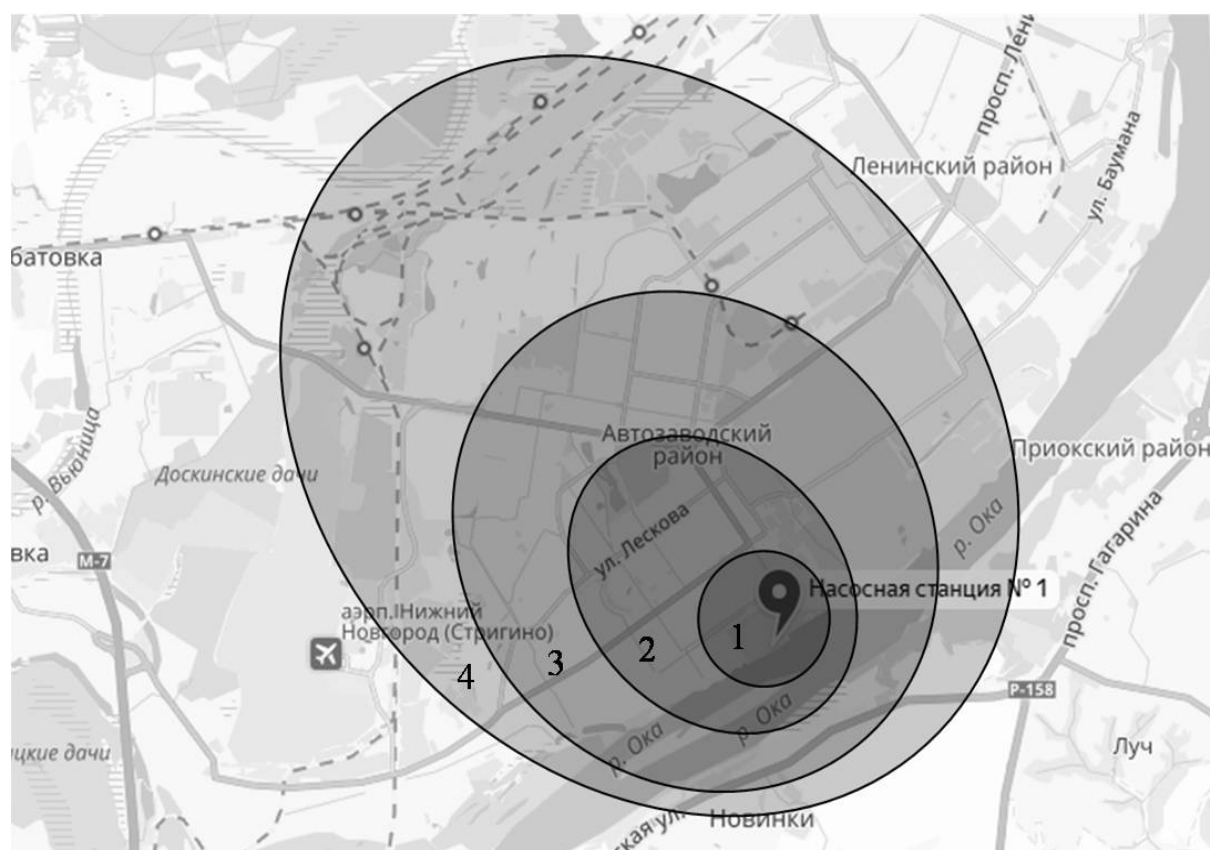


Рисунок 2 – Схема распространения хлора по территории города; 1, 2, 3, 4 – номера секторов очага загрязнения в соответствии с таблицей 1

Построение функций $f_i^{+/-}$, $i=1,13$. Функциональные зависимости $f_i^{+/-}$, $i=1,13$ строятся отдельно для каждого конкретного случая выброса в зависимости от специфики прогнозируемого объекта. В данной работе рассматривается построение указанных зависимостей для выбранного модельного примера.

В частности, функция $f_{10}^+(X_3(t), F_6)$, характеризующая скорость изменения переменной X_{10} , выбрана как прямо пропорциональная зависимости от площади зоны заражения $X_3(t)$ и численности населения в зоне заражения F_6 , что соответствует экспериментальным данным. Произведение факторов $X_3(t)$ и F_6 возводится в степень «0.5», что обеспечивает наиболее точное совпадение с реальными результатами. Таким образом, искомая зависимость имеет вид:

$$f_{10}^+ = k_{10}^+ \sqrt{X_3 F_6}.$$

Зависимости $f_i^{+/-}$, $i=1,13$ для предложенного примера выброса химически опасного вещества в атмосферу представлены в таблице 2.

Коэффициенты $k_i^{+/-}$, $i=1,13$ определяются на этапе адаптации модели к объекту исследования посредством вычислительного эксперимента.

Таблица 2 – Аналитический вид функций f_i^+ , f_i^- , используемых для расчета характеристик последствий выброса химически опасных веществ в атмосферу

f_1^+	$k_1^+ F_1^{0,8} k_1^+ = 0,03$	f_7^+	$k_7^+ (X_5(t) + X_6(t))^{0,6} X_{13}(t) k_7^+ = 0,7$
f_1^-	$k_1^- \frac{X_{10}(t)X_{11}(t)}{F_3 F_4} k_1^- = -0,05$	f_8^+	$k_8^+ (X_5(t) + X_6(t))^{0,7} X_{11}(t)X_{13}(t) k_8^+ = 0,25$
f_2^+	$k_2^+ X_3(t)(X_7(t) + X_8(t))X_9(t)F_1^{0,8} k_2^+ = 0,12$	f_9^+	$k_9^+ X_3(t) k_9^+ = 0,81$
f_2^-	$k_2^- X_{10}(t)X_{11}(t) k_2^- = -0,31$	f_9^-	$k_9^- X_{10}(t)X_{11}(t) k_9^- = 0,75$
f_3^+	$k_3^+ \frac{F_1^{0,8} F_3 F_4}{X_1(t)^{2,9}} k_3^+ = -2,2 \cdot 10^{-6}$	f_{10}^+	$k_{10}^+ (X_3(t)X_9(t))^{0,2} k_{10}^+ = 1,15$
f_4^+	$k_4^+ X_1(t) k_4^+ = 1,1$	f_{11}^+	$k_{11}^+ \sqrt{X_3(t)F_6} k_{11}^+ = 0,06$
f_4^-	$k_4^- F_1^{0,8} F_3 F_4 k_4^- = -0,07$	f_{12}^+	$k_{12}^+ \frac{X_{11}(t)F_7}{F_6} k_{12}^+ = 305,5$
f_5^+	$k_5^+ \frac{F_2}{X_1(t)^{2,1}} k_5^+ = 0,03$	f_{12}^-	$k_{12}^- \frac{1}{F_5} k_{12}^- = -0,003$
f_6^+	$k_6^+ F_3 F_6 k_6^+ = 0,05$	f_{13}^+	$k_{12}^- X_3(t)^{0,5} F_6 F_8 k_{13}^+ = 0,025$
f_6^-	$k_6^- \frac{X_4(t)}{X_{11}(t)X_{12}(t)F_7} k_6^- = 0,08$		

Расчет фактора F_8 . Для расчета фактора F_8 необходимо определить площадь территории, где регулярно наблюдаются повышенные концентрации вредных веществ, попавших в атмосферу в результате работы моторов автотранспортных средств. При этом мы акцент делаем на рассмотрении машин с работающими двигателями, которые стоят в заторах. Причина – именно в этом случае загрязнение воздуха оказывается наиболее сильным, в том числе из-за высокой концентрации «источников загрязнения». При этом далее предполагается учет только единиц автотранспорта с бензиновыми и дизельными двигателями. Двигателями на метане оснащено пока относительно мало единиц автотранспорта, а электромобили на российских дорогах пока практически не встречаются.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать математическую модель, представленную в [6].

Моделирование проводится в два этапа.

На первом этапе необходимо определить количество, местоположения и интенсивность источников эмиссии вредных веществ, т.е. автотранспортных средств, стоящих в заторе с работающими двигателями.

Выбирается исследуемый участок дороги с автомобильным затором, его длина и средняя загруженность. На основании этих данных рассчитывается количество автотранспортных средств.

Сначала определяется максимально возможное количество транспорта. Для этого исследуемый участок делится на блоки, состоящие из автомобилей и расстояний, необходимых для соблюдения необходимой дистанции между автотранспортными средствами (рис. 3).

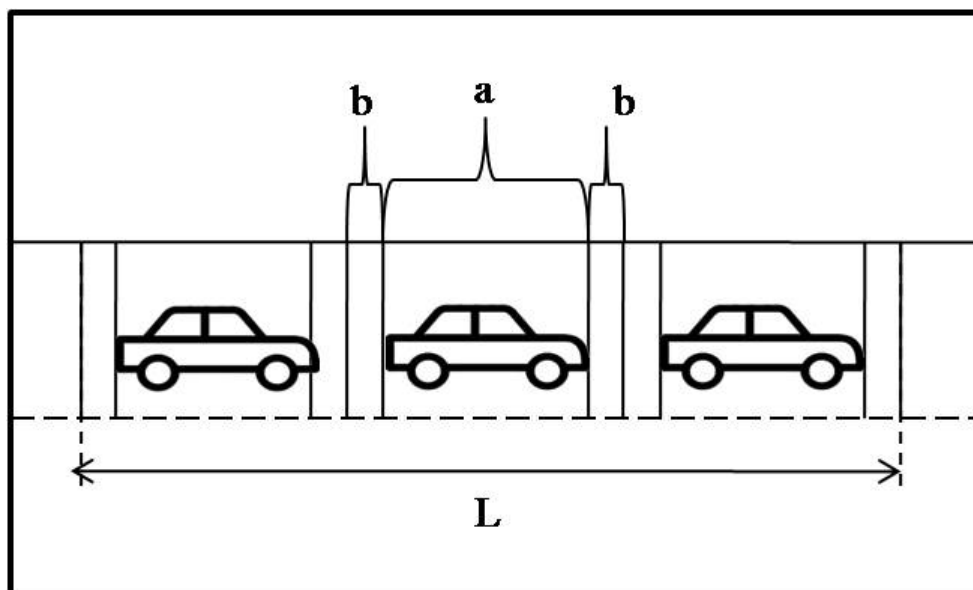


Рисунок 3 – Разделение участка дороги на блоки: L – длина выбранного участка дороги (м); a – средняя длина авто-транспортного средства (м); b – половина необходимого интервала между автомобилями (м)

Максимальное количество автомобилей на исследуемом участке $K_{\max}$ можно рассчитать по формуле:

$$K_{\max} = L / (a + 2b).$$

Зная значение загруженности Z рассматриваемого участка дороги экологически вредным авто-транспортом, можем определить количество машин-загрязнителей $K_{\text{авт}}$ по формуле:

$$K_{\text{авт}} = ZK_{\max} / 100.$$

Местонахождение загрязняющего атмосферу транспорта на дороге определяется распределением дискретной случайной величины. Так выявляется положение точечных статичных источников эмиссии загрязнений (рис. 4).

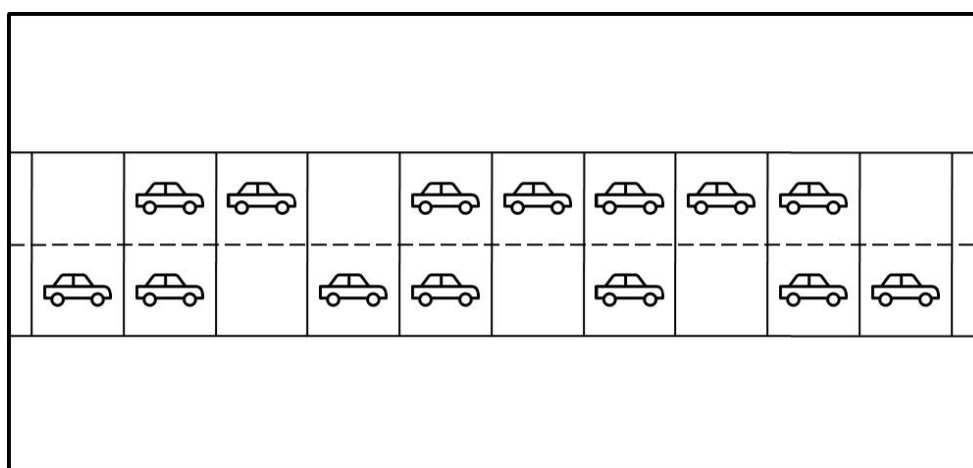


Рисунок 4 – Пример расположения автотранспорта, загрязняющего атмосферу, на участке дороги. $K_{\max} = 20$; $Z = 70\%$; $K_{\text{авт}} = 14$.

Доля единиц грузового транспорта и многоместных автобусов в потоке городского автотранспорта зависит от многих факторов: площади и величины населения города, степени его индустриального развития, туристической привлекательности, наличия развитой сети автобусного сообщения и многих других. Она может быть определена, например, в результате статистических исследований интенсивности движения различных видов городского автотранспорта, включая личные автомашины граждан. В этом случае при проведении расчетов можно использовать средневзвешенные значения мощностей выбросов легкового и грузового транспорта, а также многоместных автобусов.

Кроме того, зная интенсивности движения легковых, грузовых автомобилей, автобусов, автопоездов в физических единицах, можно привести грузовой транспорт к легковому через коэффициенты приведения, пользуясь следующей формулой:

$$N_{\text{тр.п}} = N_{\text{л}} + N_{\text{г}} \cdot K_{\text{пр.г}} + N_{\text{а}} \cdot K_{\text{пр.а}} + N_{\text{п}} \cdot K_{\text{пр.п}},$$

где $N_{\text{л}}$, $N_{\text{г}}$, $N_{\text{а}}$, $N_{\text{п}}$ – соответственно интенсивности движения легковых, грузовых автомобилей, автобусов, автопоездов в физических единицах; $K_{\text{пр.г}}$, $K_{\text{пр.а}}$, $K_{\text{пр.п}}$ – коэффициенты приведения для грузовых автомобилей, автобусов, автопоездов (легковой автомобиль – 1; грузовые до 2 т – 1,5; автопоезда до 12 т – 3,5; автобусы – 2,5; троллейбусы – 3,0 [16]).

Необходимо принимать во внимание наличие на дорогах электротранспорта, например, троллейбусов, которые, в отличие от автотранспорта, не загрязняют воздух, но способствуют возникновению заторов.

На втором этапе решения задачи определяется концентрация поллютантов от автотранспорта в контролируемых точках. В качестве моделирующего уравнения используем уравнение массопереноса [2]:

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

где c – искомая концентрация токсичного вещества; x , y , z – координаты точки расчета по осям абсцисс, ординат и аппликата соответственно; t – время; u , v , w – проекции вектора средней скорости перемещения вещества на оси абсцисс, ординат и аппликата соответственно; α – 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.

Уравнение (3) должно быть дополнено начальным и тремя граничными условиями по каждой из пространственных координат:

$$\begin{aligned} c(t = 0, x, y, z) &= \theta(x, y, z), \\ c &\rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty, \\ c &\rightarrow 0 \text{ при } |y| \rightarrow \infty, \\ c &\rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Для численного решения уравнения (3) используется явная разностная схема 1-го порядка по времени [13, 15, 17], аппроксимирующая уравнение (3) в точке $c(t^n, x_i, y_j, z_k)$ в виде:

$$\begin{aligned} \frac{c_{i,j,k}^{n+1} - c_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{c_{i,j,k}^n - c_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} \left(u_{i,j,k} - \frac{dk_x}{dx} \right) + \frac{c_{i,j,k}^n - c_{i,j-1,k}^n}{\Delta y} \left(v_{i,j,k} - \frac{dk_y}{dy} \right) + \\ + \frac{c_{i,j,k}^n - c_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \left(w_{i,j,k} - \frac{dk_z}{dz} \right) = k_x \frac{c_{i+1,j,k}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ + k_y \frac{c_{i,j+1,k}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + k_z \frac{c_{i,j,k+1}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} - \alpha c_{i,j,k}^n + \\ + Q_s(n) \delta(x_i - x_s) \delta(y_j - y_s) \delta(z_k - z_s). \end{aligned} \quad (4)$$

Это дает расчетное соотношение для $c_{i,j,k}^{n+1}$ в виде:

$$\begin{aligned} c_{i,j,k}^{n+1} = (k_x \frac{c_{i+1,j,k}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + k_y \frac{c_{i,j+1,k}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ + k_z \frac{c_{i,j,k+1}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} - \alpha c_{i,j,k}^n + Q_s(n) \delta(x_i - x_s) \delta(y_j - y_s) \delta(z_k - z_s) - \\ - \frac{c_{i,j,k}^n - c_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} \left(u_{i,j,k} - \frac{dk_x}{dx} \right) - \frac{c_{i,j,k}^n - c_{i,j-1,k}^n}{\Delta y} \left(v_{i,j,k} - \frac{dk_y}{dy} \right) - \\ - \frac{c_{i,j,k}^n - c_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \left(w_{i,j,k} - \frac{dk_z}{dz} \right) \Delta t + c_{i,j,k}^n. \end{aligned}$$

Явная конечно-разностная схема (4) является условно устойчивой в отношении шага по времени. Условие ее устойчивости приведено в [5]. При проведении вычислительных экспериментов реализация разностной схемы, как и на первом этапе решения задачи, была осуществлена в среде программного обеспечения Mathworks MATLAB R2017b.

Для определения направления ветра используются данные о «розе ветров» соответствующей местности.

Например, при регулярном автомобильном заторе протяженностью 0,3 км и «розе ветров», изображенной на рисунке 5, прогнозируемая территория, на которой наблюдаются регулярные повышения концентрации NO_2 , представлена на рисунке 6.

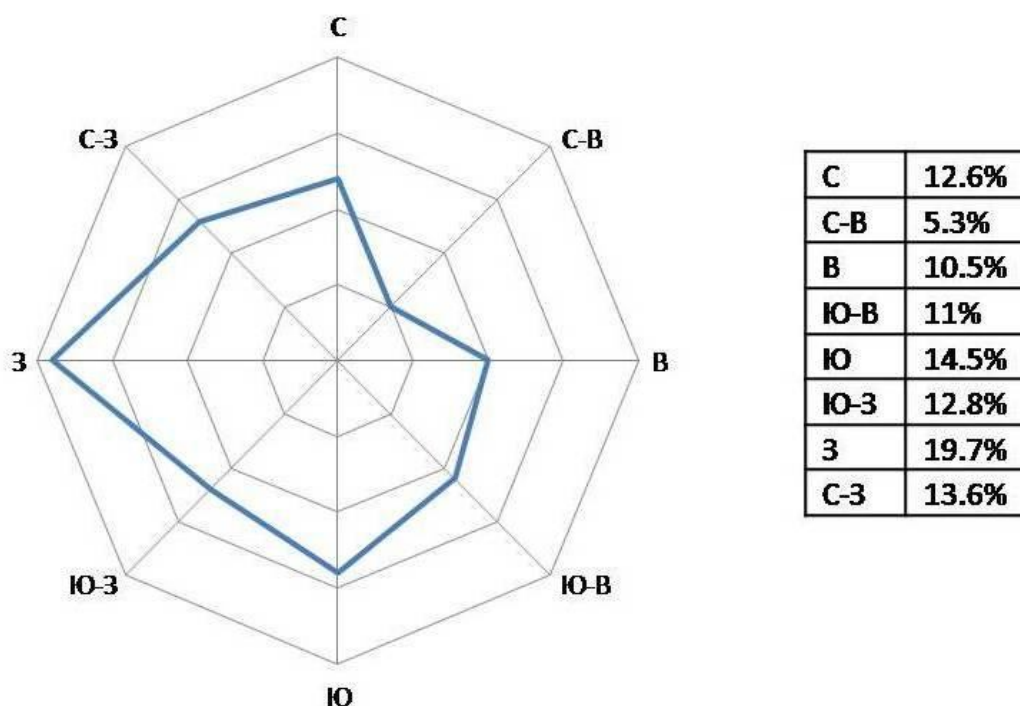


Рисунок 5 – Роза ветров по месту возникновения аварийной ситуации

На основании предложенной модели можно спрогнозировать площадь территории, где регулярно наблюдается повышение концентрации вредных веществ в воздухе.

С учетом проведенных расчетов, для представленного модельного примера размер территории, пораженной в результате выброса вредных веществ на промышленном объекте, где вследствие автомобильных заторов наблюдаются регулярные повышения концентрации атмосферных загрязнителей, составляет примерно 1 км^2 , а значит, величина $F_8 \approx 1 \text{ км}^2$.

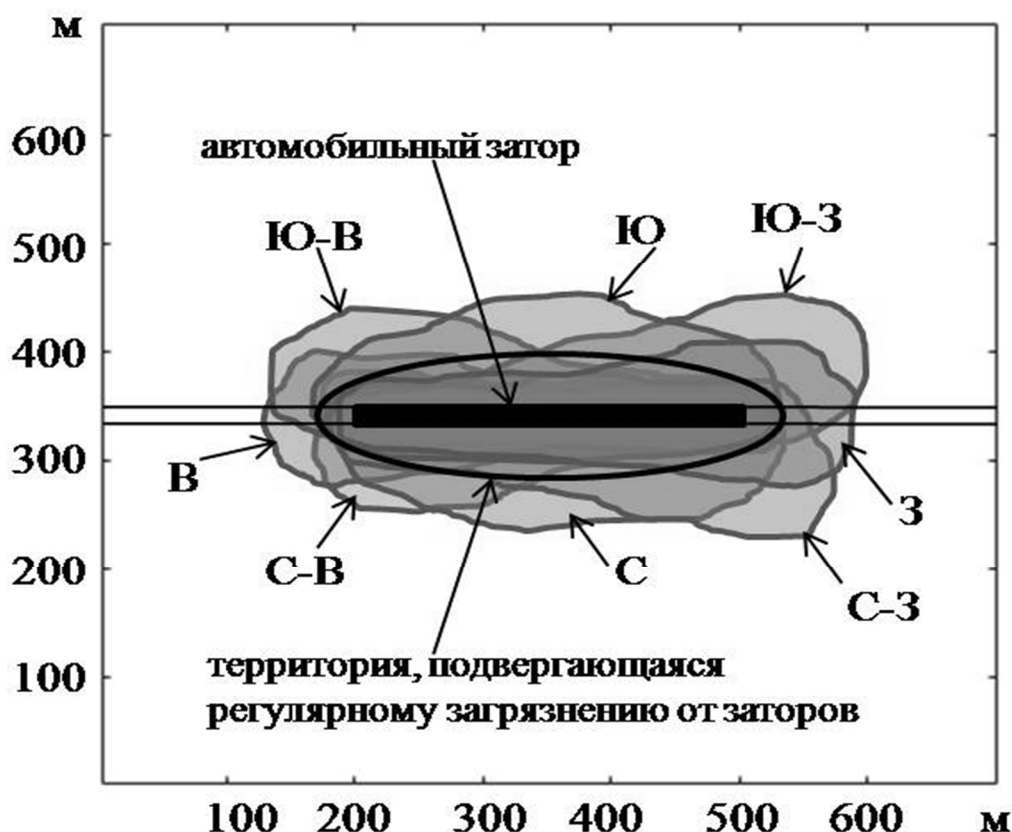


Рисунок 6 – Территория, на которой наблюдаются регулярные повышения концентрации NO_2 (модельный пример)

Расчет основных прогнозируемых характеристик. Значения основных прогнозируемых характеристик $X_i(t), i = \overline{1,13}$ выброса химически опасного вещества в результате аварийной ситуации на промышленном объекте определяются путем численного решения системы уравнений (2).

На рисунке 7 представлены графики с результатами численного решения системы (2), нормированными относительно максимальных значений моделируемых характеристик по формулам:

$$X_i^N(t) = \frac{X_i(t)}{X_i^{\max}}.$$

В частности, анализ зависимости $X_3^N(t)$ позволяет сделать вывод, что существенный рост территории загрязнения наблюдается в первый час после аварии, что подтверждается данными модельного примера.

Проверка адекватности модели. Проверка адекватности модели осуществлялась посредством сравнения значений прогнозируемых характеристик, полученных в результате решения системы (2), с реальными данными выброса химически опасного вещества в атмосферу, произошедшего на промышленном объекте одного из городов РФ.

На рисунке 8 выполнено сравнение характеристик $X_3^N(t)$, $X_6^N(t)$ и $X_8^N(t)$, определенных по модели (2), с реальными статистическими данными модельного примера, интерполированными многочленами Лагранжа $Y_3(t)$, $Y_6(t)$ и $Y_8(t)$.

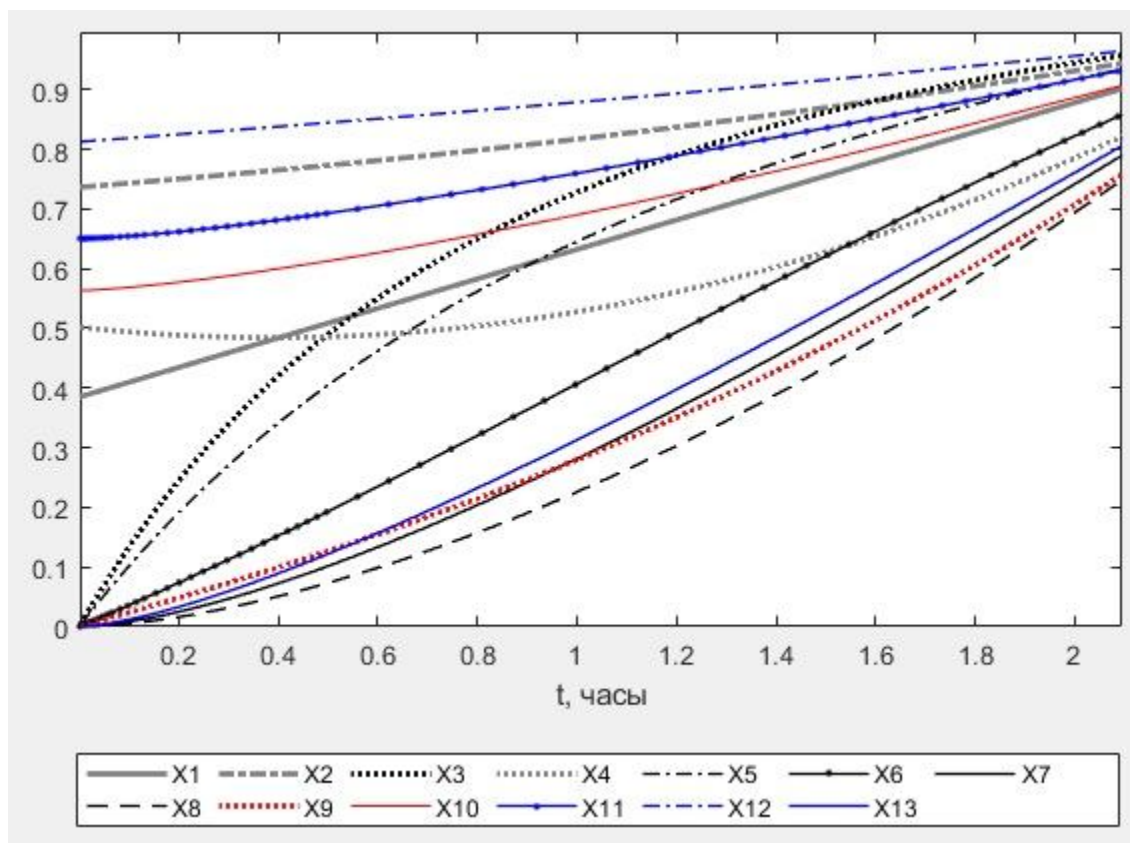


Рис. 7. Основные характеристики последствий аварийного выброса химически опасного вещества на промышленном объекте (расшифровки обозначений характеристик приведены в том разделе, где описана математическая модель)

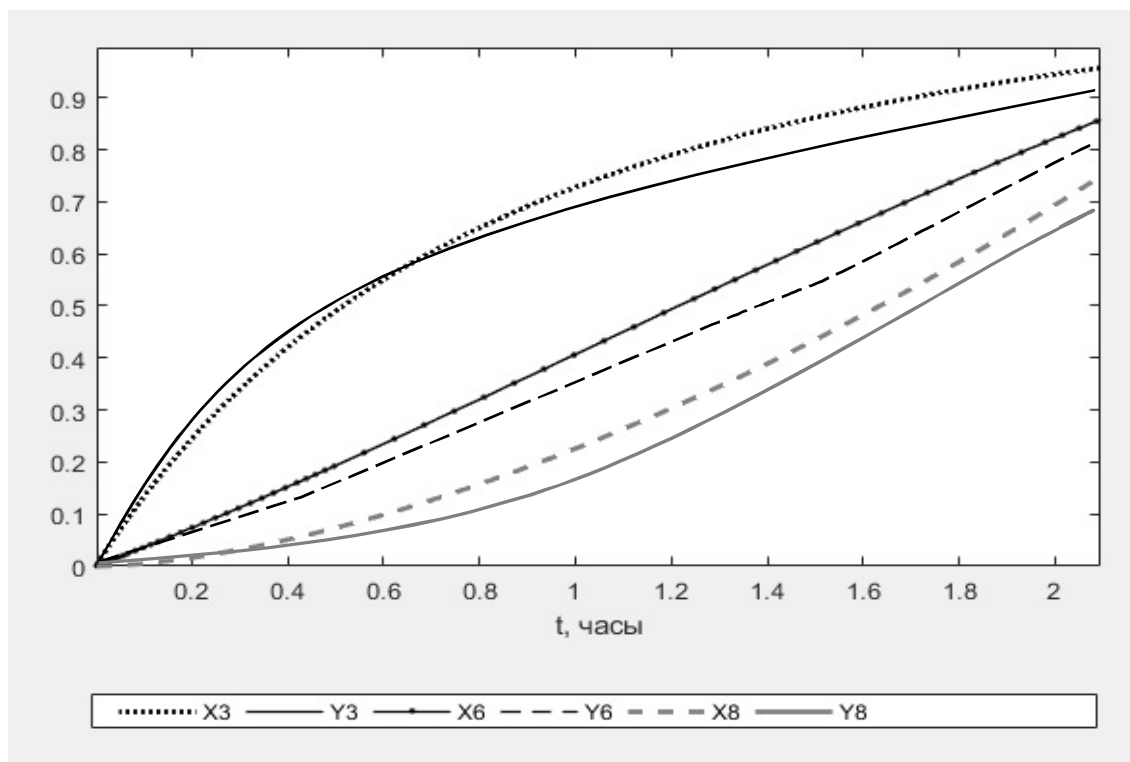


Рис. 8. Сравнение расчетных значений $X_3^N(t)$, $X_6^N(t)$ и $X_8^N(t)$ с реальными данными аварийной ситуации

Анализ значений, полученных для $X_i^N(t)$, $i = \overline{1,13}$, показывает, что характеристики, рассчитанные в результате применения разработанной модели (2), незначительно отличаются от их реальных значений.

Среднее значение относительных погрешностей в узлах моделирования для каждой характеристики не превышает 13 %. Это позволяет утверждать, что разработанная математическая модель является адекватной.

Для проведения вычислительных экспериментов с использованием математической модели для прогнозирования последствий выбросов химически опасных веществ в атмосферу с учетом загрязнения городского воздуха автотранспортом на языке C# был разработан комплекс прикладных программ, включающий следующие основные модули:

- ввод информации;
- решение уравнений системной динамики с использованием построения аналитических функций

$f_i^{+/-}$, $i = \overline{1,13}$;

- определение загрязненности атмосферы автомобильным транспортом;
- визуализация полученных результатов и др.

Использование данного программного продукта позволило значительно уменьшить время проведения вычислительных экспериментов за счет удобного графического интерфейса пользователя и применения современных технологий программирования.

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

Информационно-логическая схема решения задачи.

Химическое предприятие. Процедура решения данной задачи на временных интервалах [минимально возможный; дни] представлена на рисунке 9 в виде информационно-логической схемы (ИЛС).

Схема характеризует основные этапы автоматизированного решения задачи сокращения ущерба от атмосферных выбросов химического предприятия, производственный процесс которого предусматривает получение, хранение и переработку ядовитых и потенциально опасных веществ.

На рисунке 9 приняты следующие обозначения: 1, 2, ..., 10 – технологическое оборудование первой, второй, ..., десятой группы [7]; 11 – сбор информации о производственных процессах, поступающей от датчиков и устройств локальной автоматики; 12 – запись информации в базу данных и базу знаний; 13 – экспертная оценка потенциальной опасности ситуации, связанной с выбросом атмосферных загрязнителей; 14 – идентификация степени опасности производственной ситуации, связанной с выбросом загрязнителей; 15 – ситуация является аварийной?; 16 – сообщение о возникновении штатной производственной ситуации, требующей вмешательства диспетчера; 17 – занесение информации о штатной производственной ситуации в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 18 – произошел ли атмосферный выброс высокоопасных и чрезвычайно опасных ядовитых веществ?; 19 – определение максимального размера зоны поражения и концентрации ядовитых веществ (проводится с использованием заранее полученных результатов моделирования процесса подъема и распространения ядовитых веществ от различного технологического оборудования); 20 – определение и реализация мероприятий по ограничению зоны поражения и эвакуации персонала; 21 – информирование службы МЧС; 22 – сообщение руководству предприятия о выбросе ядовитых веществ; 23 – запись информации о происшедшем в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 24 – произошел выброс в атмосферу потенциально опасных веществ?; 25 – определение максимального размера зоны поражения по результатам математического моделирования процесса подъема и распространения атмосферных загрязнителей; 26 – определение концентрации потенциально опасных веществ в зоне поражения с учетом уже существующего загрязнения этой территории; 27 – информирование руководства предприятия об атмосферном выбросе потенциально опасных веществ; 28 – запись информации о происшедшем выбросе потенциально опасных веществ в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 29, 30 – руководство процессом ликвидации последствий атмосферного выброса потенциально опасных и ядовитых веществ, соответственно; 31 – запись информации о происшедшем выбросе ядовитых веществ в базу данных; 32, 35 – экспертная оценка степени тяжести возникшей ситуации, связанной с атмосферным выбросом ядовитых или потенциально опасных веществ соответственно; 33 – информация о метеосостоянии в момент возникновения выброса и существующего загрязнения контролируемой территории; 34 – сведения об аналогичных происшествиях, хранимых в базе данных предприятия; 35 – выбор из базы данных предприятия информации о происшедшем выбросе ядовитых веществ; 36 – определение массы ядовитого вещества, поступившего в атмосферу; 37 – определение концентрации ядовитого вещества в зоне поражения с учетом существующего загрязнения контролируемой территории; 38 – определение высоты подъема загрязнителя; 39 – определение зоны распространения загрязнителя; 40 – определение продолжительности атмосферного выброса; 41 – определение ущерба от повышения заболеваемости населения по критерию Cf_1 ; 42 – определение потерь сельского хозяйства по критерию Cf_2 ; 43 – определение ущерба от изменения окружающей природной среды по критерию Cf_3 ; 44 – определение ущерба из-за ухудшения качества жизни по критерию Cf_4 ; 45 – определение

ущерба предприятия по критерию Cf_5 ; 46 – выбор коэффициентов свертки $\mu_i \geq 0, i = \overline{1,5}$, $\sum_{i=1}^5 \mu_i = 1$ вектор-

ной целевой функции решаемой задачи; 47 – формирование скалярной целевой функции $Cf_S = \sum_{i=1}^5 \mu_i Cf_i$, после

свертки скалярных критериев; 48 – оценка эффективности деятельности персонала; 49, 51 – информирование руководства предприятия и службы МЧС объектового уровня о расчетной оценке величины ущерба и эффективности деятельности персонала, соответственно; 52 – занесение информации о величине ущерба, причиненного в результате атмосферного выброса ядовитого вещества, в базу данных предприятия. Блоки 52–67 информационно-логической схемы характеризуют процедуру определения ущерба от выброса в атмосферу потенциально опасных веществ, они аналогичны блокам 36–51, характеризующим процедуру определения ущерба от выброса ядовитых веществ. Выполнение блоков 41–47 осуществляется с использованием математического обеспечения, позволяющего уменьшить ущерб от атмосферных выбросов промышленных предприятий в условиях неопределенности состояния окружающей среды [9, 13–15]. При этом делается допущение, что уменьшение ущерба приведет к улучшению основных статистических показателей, характеризующих загрязнение атмосферы и рассчитанных для различного осреднения по времени и пространству, таких как: максимальные концентрации примесей: разовых, измеренных за 20 минут, среднесуточных или среднемесячных (мг/м^3 или мкг/м^3 ; доли ПДК); средние концентрации примесей (мг/м^3 или мкг/м^3 ; доли ПДК); повторяемость концентраций примеси выше 1 ПДК, %; повторяемость концентраций примеси выше 5 ПДК, %, и др. [19].

Из рисунка 9 следует, что задача сокращения ущерба от атмосферных выбросов химического предприятия решается на временных интервалах «минимально возможный» и «несколько дней».

На первом из этих интервалов осуществляется идентификация степени опасности возникшей производственной ситуации, связанной с атмосферным выбросом загрязнителей. Определяется максимальный размер зоны загрязнения ядовитыми или потенциально опасными веществами, проводятся мероприятия по ее ограничению и эвакуации персонала. Информация о происшедшем доводится до руководства предприятия и службы МЧС объектового уровня, а также заносится в журнал сменного диспетчера на электронном носителе.

На втором временном интервале производится оценка ущерба от атмосферного выброса загрязнителей, соответствующая информация заносится в базу данных информационной системы, поступает руководству предприятия и, по согласованию с ним, доводится до сведения всех заинтересованных сторонних организаций.

Все это обеспечивает повышение оперативности и качества управленческих решений, принимаемых оперативно-диспетчерским персоналом предприятий при оценке эффективности различных сценариев ликвидации последствий аварийных атмосферных выбросов и уменьшения ущерба от их возникновения.

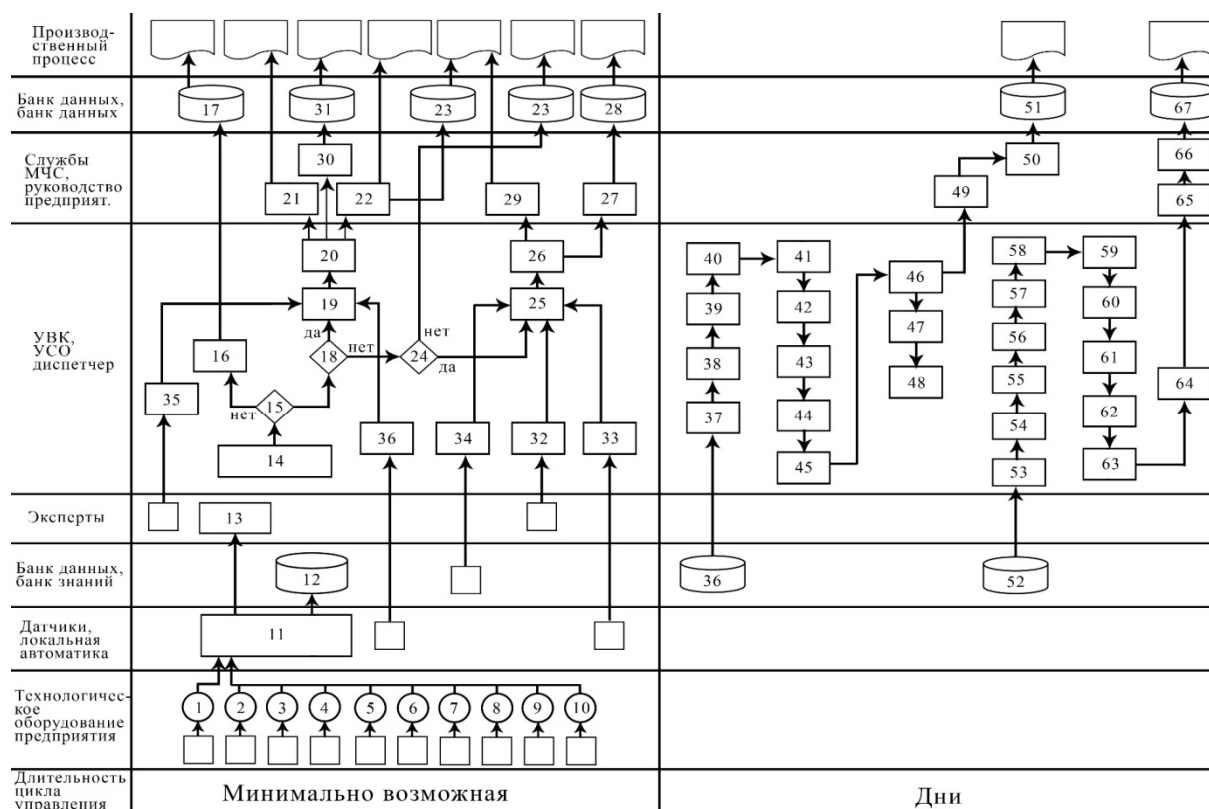


Рисунок 9 – Информационно-логическая схема решения задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов химического предприятия на временном интервале [минимально возможный; дни]

Заключение. На основе аппарата системной динамики и уравнений массопереноса разработана математическая модель для прогнозирования основных характеристик аварийных выбросов в атмосферу химически опасных веществ с учетом регулярного загрязнения воздуха от автотранспортных заторов.

Проведено сравнение прогнозируемых характеристик с реальными данными выброса, произошедшего в одной из областей РФ, подтвердившее адекватность предложенной модели.

Разработанное математическое обеспечение может быть использовано при модернизации существующих информационных систем экологического контроля и управления, а также в тренажерных системах, применяемых для обучения оперативно-диспетчерского персонала МЧС.

Библиографический список

1. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг химически опасных объектов. Общие требования ГОСТ Р 22.1.10-2002 : принят постановлением Госстандарта РФ от 25.10.2002 № 394. – Режим доступа: <http://internet-law.ru/gosts/gost/6399>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.07.2018).
2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
3. Бродский Ю. И. Лекции по математическому и имитационному моделированию / Ю. И. Бродский. – Москва – Берлин : Директ-Медиа, 2015. – С. 240.
4. Гермейер Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами / Ю. Б. Гермейер. – М. : Наука, 1976. – 327 с.
5. Кушелева Е. В. Математическое моделирование определения степени загрязнения атмосферы при выбросах химических веществ / Е. В. Кушелева, А. Ф. Резчиков, В. А. Кушников, В. А. Иващенко, А. С. Богомолов, Е. В. Кушникова, Л. Ю. Филимонюк, М. А. Барулина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 2. – С. 17–25.
6. Кушелева Е. В. Модель для прогнозирования распространения атмосферных поллютантов при автотранспортных заторах / Е. В. Кушелева, А. Ф. Резчиков, В. А. Кушников, В. А. Иващенко, Л. Ю. Филимонюк, А. С. Богомолов, Е. В. Кушникова, А. А. Самарцев, М. В. Хамутова // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 55–60.
7. Кушникова Е. В. Модели и алгоритмы минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий / Е. В. Кушникова, А. Ф. Резчиков, В. А. Иващенко, Л. Ю. Филимонюк // Управление большими системами. – Москва : ИПУ РАН, 2015. – Вып. 57. – С. 158–190.
8. Кушникова Е. В. Имитационное моделирование загрязнения территорий выбросами промышленных предприятий / Е. В. Кушникова, О. А. Торопова // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах : материалы Всероссийской научной конференции. – Саратов, 2012. – С. 20–23.
9. Кушникова Е. В. Модели и алгоритмы определения ущерба от воздействия атмосферных поллютантов на здоровье населения / Е. В. Кушникова // Компьютерные науки и информационные технологии : материалы Международной научной конференции. – Саратов, 2016. – С. 225–227.
10. Марчук Г. И. Введение в методы вычислительной математики : курс лекций / Г. И. Марчук. – Новосибирск, 1971. – 238 с.
11. Моисеев Н. Н. Человек и биосфера: Опыт системного анализа и эксперименты с моделями / Н. Н. Моисеев, В. В. Александров, А. М. Тарко. – Москва : Наука, 1985. – 271 с.
12. Обзорная статья по программам серии «Эколог». – Режим доступа: <https://integral.ru/program.html>. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 19.12.2018).
13. Пененко В. В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / В. В. Пененко, А. Е. Алоян. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1985. – 256 с.
14. Портал медицинских лекций. – Режим доступа: <https://medlec.org/lek4-32130.html>. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 17.08.2018).
15. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1971.
16. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов / Э. А. Сафронов. – Москва : АСВ, 2005. – 272 с.
17. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды / Р. Скорер. – Москва : Мир, 1980. – 560 с.
18. Форрестер Д. Мировая динамика / Д. Форрестер ; пер. с англ. А. Ворошука. – Москва : АСТ ; Санкт-Петербург : Terra fantastica, 2003. – 379 с.
19. Экология. – Режим доступа: <https://ru-ecology.info/term/27303/>. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 21.12.2018).
20. Ghaffarzadegan N. Dell's SupportAssist customer adoption model: enhancing the next generation of data-intensive support services / N. Ghaffarzadegan, A. A. Rad, R. Xu, S. E. Middlebrooks, S. Mostafavi, M. Shepherd, L. Chambers, T. Boyum // System Dynamics Review. – 2017. – № 33 (3–4). – P. 219–253.
21. Gifford F. Modeling urban air Pollution / F. Gifford, S. Hanna // Atm. Env. – 1973. – № 1. – P. 131–136.
22. de Gooyert V., Größler A. On the differences between theoretical and applied system dynamics modeling / V. de Gooyert, A. Größler // System Dynamics Review. – 2019. – Vol. 34. – P. 575–583.
23. Gryning S. Sort-range experiments in unstable conditions over inhomogeneous terrain / S. Gryning. – Tellus, 1978. – Vol. 30. – P. 392–404.
24. Haugen D. Lectures on air pollution and environmental impact analysis / D. Haugen. – Boston : AMS, 1975. – 296 p.
25. Jalali M. S. Cybersecurity in hospitals: a systematic, organizational perspective / M. S. Jalali, J. P. Kaiser // Journal of Medical Internet Research. – 2018. – № 20 (5). – P. 10059.
26. Kusheleva E. Mathematical Model for Prediction of the Main Characteristics of Emissions of Chemically Hazardous Substances into the Atmosphere / E. Kusheleva, A. Rezchikov, V. Kushnikov, V. Ivaschenko, E. Kushnikova, A. Samartsev // Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – 2019. – Vol. 199. – P. 594–607.
27. Pasquill F. Atmospheric diffusion / F. Pasquill. – London : Van Nostr. Co. Ltd., 1962. – 298 p.
28. Ragland K. W. Forecast ambient air concentration from point sources using the Gaussian plume model / K. W. Ragland // Atm. Env. – 1976. – Vol. 10, № 5. – P. 371–374.
29. Rahmandad H. Connecting strategy and system dynamics: an example and lessons learned / H. Rahmandad //

System Dynamics Review. – 2015. – № 31 (3). – P. 149–172.

30. Rahmandad H. Capability erosion dynamics / H. Rahmandad, N. P. Repenning // Strategic Management Journal. – 2016. – № 37 (4). – P. 649–672.

31. Sekaran U. Research methods for business: a skill-building approach / U. Sekaran, R. Bougie. – Chichester : Wiley, 2016. – 7th ed.

32. Shavelson R. J. An approach to testing and modeling competence / R. J. Shavelson // Modeling and Measuring Competencies in Higher Education: Tasks and Challenges. – Frankfurt : Springer, 2013. – P. 29–43.

References

1. State Standard 22.1.10-2002. Safety in emergency situations. Monitoring of chemically dangerous objects. General requirements. Available at: <http://internet-law.ru/gosts/gost/6399> (accessed 10.07.2018).

2. Berland M. E. Prognoz i regulirovanie zagryazneniy atmosfery [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985.

3. Brodskiy Yu. I. *Leksii po matematicheskomu i imitatsionnomu modelirovaniyu* [Lectures on mathematical and simulation modeling]. Moscow – Berlin, Direkt-Media, 2015. 240 p.

4. Germeier Yu. B. *Igry s neprotivopolozhnyimi interesami* [Games with opposing interests]. Moscow, Science, 1976. 327 p.

5. Kuseheleva E. V., Rezhnikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Kushnikova E. V., Filimonuk L. Yu., Barulina M. A. Matematicheskoe modelirovanie opredeleniya stepeni zagryazneniya atmosfery pri vybrosakh khimicheskikh veshchestv [Mathematical modeling of the determination of the degree of atmosphere pollution during emissions of chemical substances]. *Vestnik Astrakanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering, and Informatics], 2018, no. 2, pp. 17–25.

6. Kuseheleva E. V., Rezhnikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Filimonuk L. Yu., Bogomolov A. S., Kushnikova E. V., Samarcev A. A., Xamutova M. V. Model dlya prognozirovaniya rasprostraneniya atmosferykh pollyutantov pri avtotransportnykh zatorakh [Model for predicting the distribution of atmospheric pollutants at motor transport batteries]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Management Systems and Information Technology], 2018, no. 2, pp. 55–60.

7. Kushnikova E. V., Rezhnikov A. F., Ivashchenko V. A., Filimonuk L. Yu. Modeli i algoritmy minimizatsii ushcherba ot atmosferykh vybrosov promyshlennykh predpriyatiy [Models and algorithms for minimizing damage from atmospheric emissions of industrial enterprises]. *Upravlenie bolshimi sistemami* [Large System Management], 2015, vol. 57, pp. 158–190.

8. Kushnikova E. V., Toropova O. A. Imitatsionnoe modelirovanie zagryazneniya territoriy vybrosami promyshlennykh predpriyatiy [Imitation modeling of territory pollution by emissions of industrial enterprises]. *Problemy upravleniya v socialno-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh : materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Management problems in socio-economic and technical systems : Materials of the All-Russian Scientific Conference]. Saratov, 2012, pp. 20–23.

9. Kushnikova E. V. Modeli i algoritmy opredeleniya ushcherba ot vozdeystviya atmosferykh pollyutantov na zdorove naseleniya [Models and algorithms for determining damage from the impact of atmospheric pollutants on population health]. *Kompyuternye nauki i informatsionnye tekhnologii : materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Computer Science and Information Technologies : Proceedings of the International Scientific Conference]. Saratov, 2016. pp. 225–227.

10. Marchuk G. I. *Vvedeniye v metody vychislitel'noy matematiki: kurs lektsiy* [Introduction to the methods of computational mathematics: a course of lectures]. Novosibirsk, 1971. 238 p.

11. Moiseev N. N., Aleksandrov V. V., Tarko A. M. *Chelovek i biosfera: Opyt sistemnogo analiza i eksperimenty s modelyami* [Man and the Biosphere: Experience of Systems. analysis and experiments with models]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 271 p.

12. Obzornaya statya po programmam serii “Ekolog” [Review article on the program series “Ecologist”]. Available at: <https://integral.ru/program.html> (accessed 19.12.2018).

13. Penenko V. V., Aloyan A. E. Modeli i metody dlya zadach okhrany okruzhayushchey sredy [Models and methods for environmental protection tasks]. Moscow, Nauka Publ., 1985.

14. *Portal meditsinskikh lektsiy* [Portal of medical lectures]. Available at: <https://medlec.org/lek4-32130.html> (accessed 17.08.2018).

15. Samarskiy A. A. *Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem* [Introduction to the theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1971.

16. Safronov E. A. *Transportnye sistemy gorodov i regionov* [Transport systems of cities and regions]. Moscow, ASV Publ., 2005. 272 p.

17. Skoror R. *Aerogidrodinamika okruzhayushchey sredy* [Aerohydrodynamics of the environment]. Moscow, Mir, 1980.

18. Forrester D. *Mirovaya dinamika* [World Dynamics], Moscow, AST Publ. ; Saint Petersburg, Terra fantastica, 2003. 379 p.

19. *Ekologiya* [Ecology]. Available at: <https://ru-ecology.info/term/27303/> (accessed 21.12.2018).

20. Ghaffarzadegan N., Rad A. A., Xu R., Middlebrooks S. E., Mostafavi S., Shepherd M., Chambers L., Boyum T. Dell's Support Assist customer adoption model: enhancing the next generation of data-intensive support services. *System Dynamics Review*, 2017, no. 33 (3–4), pp. 219–253.

21. Gifford F., Hanna S. Modeling urban air pollution. *Atm. Env.*, 1973, no. 1, p. 131–136.

22. de Gooyert V., Größler A. On the differences between theoretical and applied system dynamics modeling. *System Dynamics Review*, 2019, vol. 34, p. 575–583.

23. Gryning S. *Sort-range experiments in unstable conditions over inhomogeneous terrain*. Tellus, 1978, vol. 30, pp. 392–404.

24. Haugen D. *Lectures on air pollution and environmental impact analysis*. Boston, AMS, 1975. 296 p.
25. Jalali M. S., Kaiser J. P. Cybersecurity in hospitals: a systematic, organizational perspective. *Journal of Medical Internet Research*, 2018, no. 20 (5), p. 10059.
26. Kusheleva E., Rezhikov 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. *Recent Research in Control Engineering and Decision Making*, 2019, vol. 199, pp. 594–607.
27. Pasquill F. *Atmospheric diffusion*. London, Van Nostr. Co. Ltd., 1962. 298 p.
28. Ragland K. W. Forecast ambient air concentration from point sources using the Gaussian plume model. *Atm. Env.*, 1976, vol. 10, no. 5, pp. 371–374.
29. Rahmandad H. Connecting strategy and system dynamics: an example and les-sons learned. *System Dynamics Review*, 2015, no. 31 (3), pp. 149–172.
30. Rahmandad H., Repenning N. P. Capability erosion dynamics. *Strategic Management Journal*, 2016, no. 37 (4), pp. 649–672.
31. Sekaran U., Bougie R. *Research methods for business: a skill-building approach*. 7th ed. Chichester, Wiley, 2016.
32. Shavelson R. J. An approach to testing and modeling competence. *Modeling and Measuring Competencies in Higher Education: Tasks and Challenges*. Frankfurt, Springer, 2013, pp. 29–43.

УДК 004.42, 004. 021

КЭШ-ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫЧИСЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ НА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ¹

Статья поступила в редакцию 10.03.2019, в окончательной версии 07.04.2019.

Егунов Виталий Алексеевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, e-mail: vegunov@mail.ru

Рассматривается вопрос приведения матрицы к Хессенберговой форме в рамках задачи вычисления собственных значений на параллельных вычислительных системах с общей памятью, являющихся наиболее распространенным и доступным типом параллельных вычислительных систем. В качестве базового преобразования используется преобразование отражения Хаусхолдера. В статье анализируется решение задачи приведения матрицы к Хессенберговой форме на целевых вычислительных архитектурах. При этом особое внимание уделяется оптимизации алгоритмов с точки зрения эффективного использования кэш-памяти. Приводятся авторские алгоритмы решения поставленной задачи, представляющие собой оптимизированные варианты классического преобразования Хаусхолдера. Использование данных алгоритмов позволяет существенно снизить время выполнения программы. Сделанные выводы подтверждаются результатами проведенных вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: собственные числа, собственные значения, собственное разложение, преобразование отражения, преобразование Хаусхолдера, многоядерные процессоры, многопроцессорные системы, неоднородные параллельные вычислительные системы, эффективность программ, ускорение работы программ, кэш-память, системы с общей памятью

CACHE-OPTIMIZATION OF SOLVING EIGENVALUES PROBLEM FOR PARALLEL COMPUTING SYSTEMS

The article was received by editorial board on 10.03.2019, in the final version – 07.04.2019.

Egunov Vitaly A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation
Cand. Sci. (Engineering), e-mail: vegunov@mail.ru

The reduction of the matrix to Hessenberg form in the framework of the problem of calculating eigenvalues on parallel computing systems with shared memory is considered. Parallel computing systems with shared memory are the most common and affordable type of parallel computing systems. As the base conversion use the conversion reflections of Householder. The article analyzes the solution of the problem of reducing the matrix to Hessenberg form on the target computing architectures, with special attention paid to the optimization of algorithms in terms of efficient use of cache memory. The author's algorithms for solving the problem, which are optimized versions of the classical householder transformation, are presented. The use of these algorithms can significantly reduce the execution time of the program. The conclusions are confirmed by the results of computational experiments.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-47-340010 p_a.