

Научная статья  
УДК 502.504:628.54  
doi: 10.46684/2687-1033.2023.1.62-72

## Прогнозирование мер обеспечения экологической безопасности транспортных и коммунальных систем техносферных территорий

Э.С. Цховребов<sup>1</sup>, А.Н. Гордиенко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий) (НИИ МЧС России); г. Москва, Россия

<sup>1</sup> rebrovstanislav@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9481-3832>

<sup>2</sup> angordienko@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5179-1082>

### АННОТАЦИЯ

Цель работы — сформировать подходы к прогнозированию мер обеспечения экологической безопасности транспортных и коммунальных комплексов техносферных территорий посредством оптимизации системы региональных операторов по обращению с отходами. Для реализации поставленной цели решены следующие научно-прикладные задачи: систематизированы разработки ученых и специалистов в изучаемой предметной области; проведен системный анализ действующей модели регионального оператора обращения с твердыми коммунальными отходами с обоснованием ее низкой эффективности; на основе теории динамического анализа стохастических систем с неопределенными параметрами разработана модель многофункционального оператора по обращению с ресурсной составляющей образующихся отходов жизнеобеспечения техносферных территорий; с применением теорий анализа многоконтурных технологических систем, теории нечетких множеств и нечетких (мягких) вычислений осуществлено моделирование состояний, параметров многоконтурной системы технологического преобразования материально-сырьевых ресурсов, направленной на достижение экологической безопасности транспортных и коммунальных объектов.

Результаты данного исследования используются в процессе формирования новой отходоперерабатывающей инфраструктуры в рамках принятых на федеральном уровне отраслевых документов стратегического планирования промышленно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года.

**Ключевые слова:** транспортные и коммунальные системы; жизнеобеспечение; техносферные территории; обращение с отходами; экологическая безопасность; многоконтурные системы; нечеткие множества; ресурсосбережение; вторсырье

**Для цитирования:** Цховребов Э.С., Гордиенко А.Н. Прогнозирование мер обеспечения экологической безопасности транспортных и коммунальных систем техносферных территорий // Техник транспорта: образование и практика. 2023. Т. 4. Вып. 1. С. 62–72. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2023.1.62-72>.

Original article

## Forecasting of measures to ensure environmental safety of transport and utility systems of technosphere territories

Eduard S. Tshovrebov<sup>1</sup>, Alexey N. Gordienko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Russian Emergencies Ministry (Federal Center for Science and High Technologies) (NII EMERCOM of Russia); 7 Davydkovskaya st., Moscow, 121352, Russian Federation

<sup>1</sup> rebrovstanislav@rambler.ru

<sup>2</sup> angordienko@mail.ru

### ABSTRACT

The purpose of the work is to form approaches to forecasting measures to ensure environmental safety of transport and utility complexes of technosphere territories by optimizing the system of regional waste management operators. To achieve this goal, the following scientific and applied tasks were solved in the work: the devel-

© Э.С. Цховребов, А.Н. Гордиенко, 2023

opments of scientists and specialists in the subject area under study were systematized; a system analysis of the current model of a regional operator for solid municipal waste management was carried out with justification of its low efficiency; based on the theory of dynamic analysis of stochastic systems with uncertain parameters, a model of a multifunctional operator for handling the resource component was developed generated waste of life support of technosphere territories; using the theories of analysis of multi-contour technological systems, the theory of fuzzy sets and fuzzy (soft) calculations, the modeling of states, parameters of a multi-contour system of technological transformation of material and raw materials resources aimed at achieving environmental safety of transport and utility facilities was carried out. The results of the research of this work are used in the process of forming a new waste processing infrastructure within the framework of the industry documents adopted at the federal level of strategic planning of industrial and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030.

**Keywords:** transport and utility systems; life support; technosphere territories; waste management; environmental safety; multi-circuit systems; fuzzy sets; resource conservation; forecasting

**For citation:** Tshovrebov E.S., Gordienko A.N. Forecasting of measures to ensure environmental safety of transport and utility systems of technosphere territories. *Transport technician: education and practice*. 2023;4(1):62-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2023.1.62-72>.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды отходами производства и потребления, как основная угроза благоприятным условиям жизнедеятельности населения, выступает актуальной экологической проблемой современности. Оказывающее негативное воздействие на природную среду функционирование транспортных, коммунальных, иных систем жизнеобеспечения техносферных территорий требует принятия безотлагательных, взвешенных, научно обоснованных решений, направленных на обеспечение экологической безопасности таких систем [1–5].

Важно отметить, как транспортный, так и коммунальный комплекс образуют множество однотипных отходов: твердые коммунальные отходы (ТКО) и им подобные; крупногабаритный мусор (КГМ) строительства, ремонта, демонтажа объектов; отходы электротехнического и электронного оборудования (ОЭЭО); эксплуатации, ремонта автотранспорта и ряда других. При этом учет, организация сбора, вывоза, размещение и иные действия с такими опасными техносферными объектами осуществляется операторами их обращения в настоящее время только лишь с ТКО.

К тому же вопросы централизованного системного управления обращения с отходами фактически выпали из зоны и ответственности государства, а так называемые вертикальные, слабо управляемые схемы деятельности вокруг отдельных прибыльных и вместе с тем экологически опасных действий с некоторыми видами отходов продолжают наносить значительный вред окружающей среде и жизненно важным интересам населения России [6–10].

Вышеперечисленные актуальные нерешенные проблемы современности предопределили цели, задачи, направленность настоящего исследования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для проведения исследования стали: нормативная база; методические рекомендации в области обращения с отходами; опубликованные труды ученых; собственные результаты исследований автора в сфере охраны окружающей среды и экологической безопасности территорий, применения теорий исследования многоконтурных, стохастических систем, нечетких множеств и мягких вычислений в изучаемой предметной области.

Стратегия и методы исследования коррелируются с принятыми в мировом сообществе принципами: Zero waste (ноль отходов); RRR (предотвращение образования отходов, повторное использование, переработка во вторичные ресурсы); Green economy («зеленая» экономика); Circular economy (экономика замкнутого цикла) [11–14], опираются на ряд результатов исследований в области программ и проектов ресурсосберегающих систем, обеспечения охраны окружающей среды и экологической безопасности [15, 16].

Методика исследования базируется на методах: обобщения, систематизации, классификации, композиции, интеграции.

Математический аппарат исследований настоящей работы включает методы графоаналитического анализа многоконтурных систем, динамического анализа стохастических систем с неопределенными параметрами [17, 18], мягких вычислений, теории нечетких множеств и нечеткой логики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стратегия создания механизма экологически безопасного жизнеобеспечения техносферных территорий отличается от научных позиций известных исследователей авторским подходом к методам построения и оценке результатов работы ресурсовосстановительной организационно-технической системы обращения с отходами. Означенный подход реализован при формировании модели управляющего регулятора системы в новой организационно-правовой форме многофункционального регионального оператора по экологически безопасному обращению ресурсной составляющей отходов жизнеобеспечения, обосновании структуры, функциональных параметров и характеристик предлагаемой системы.

Представлены разработанные автором математические модели стохастических систем обращения ресурсных компонентов с многоконтурными технологическими циклами, множественными переменными параметрами с учетом воздействия внешних условий и факторов. Построение конфигурации регулятора динамической системы дискретного и непрерывного действия реализуется на основе принципа Беллмана, определяющего управление как функцию состояния регулируемого объекта и внешней среды, обеспечивающей в данном случае прогнозируемые ресурсосберегающие характеристики экологически безопасного жизнеобеспечения путем математического описания с помощью вектора состояния.

Первая модель отображает действующую систему обращения с ТКО в рамках реализации территориальной схемы, механизм которой приводит в действие регулятор в форме регионального оператора обращения с ТКО. Абстрактное отображение функциональной схемы такой системы представлено на рис. 1.

Под вектором состояния объекта управления принят набор переменных, информация о кото-

рых в текущий момент времени позволяет при известных внешних воздействиях прогнозировать состояние, поведение, показатели, динамические свойства системы жизнеобеспечения во времени, перестраивать и развивать механизм управления, нормирования, технического регулирования, позволяя достичь поставленной цели — обеспечения экологической безопасности техносферной территории при наличии технической возможности, экономической целесообразности получения ценных вторичных ресурсов (ВР) из собираемых ТКО.

Исследуемый объект характеризуется векторами: а) входных переменных (образующихся опасных отходов)  $O \in R^n$ ; б) экологического состояния комплекса жизнеобеспечения (в отношении которого на основании территориальной схемы обращения с отходами осуществляет деятельность региональный оператор обращения с ТКО), формируемого антропогенным воздействием всех видов образующихся отходов  $S \in R^m$ ; в) управляющих воздействий на процессы обращения с ТКО  $F \in R^{TKO}$ ; г) регулируемых выходных переменных в виде ВР, извлекаемых из ТКО  $P_{TKO} \in R^{TKO}$ ; внешняя среда — вектором состояния экологической безопасности  $e$  и выходными переменными  $P$ , определяющимися факторами, условиями и ограничениями внешней среды  $E$ .

В исследуемой модели в отношении объекта управления действует регулятор с неполной информацией [ $O_{TKO} < Oo$ ], при которой спектр анализируемых входных и выходных переменных ограничен, а в системе измеряется только часть переменных состояния или их локальная линейная комбинация. Число измеряемых переменных модели оценивается меньше числа переменных вектора экологических состояний объекта, так как обращение происходит только с ТКО без учета количества, уровня воздействия на природную среду множества иных отходов, образующихся в ходе жизнеобеспечения (ремонтно-строительного

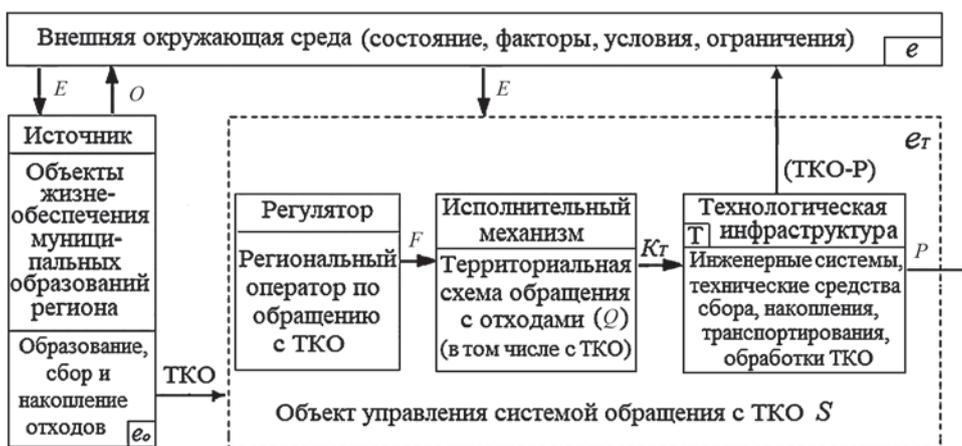


Рис. 1. Функциональная модель действующего регулятора обращения с ТКО

производства, электронного и электротехнического оборудования, крупногабаритного мусора и ряда других) с их специфическими опасными свойствами. Внешняя среда также охарактеризована неполной информацией: число анализируемых факторов опасного воздействия меньше состава переменных вектора состояния окружающей среды. Не в полной мере определены и качественные параметры выходного целевого показателя  $P$ . Его количественное достижение не может быть реализовано из-за низкого уровня качества и безопасности входного потока в силу отсутствия эффективной системы раздельного сбора, локальной обработки в источниках образования. В результате вектор разницы входных и выходных потоков ( $O_{\text{ТКО}} - P_{\text{ТКО}}$ ) имеет приближение к вектору задающих воздействий (уровень извлечения ВР остается на низком уровне).

Решение задачи при означенных граничных условиях предложено осуществить посредством формирования матрицы линейных стационарных обратных связей технологических процессов  $S$  трансформации потоков  $K_1$  и матрицы прямых связей  $Q$ , реализующей в системе материально-сырьевого цикла преобразование регулируемых переменных опасных состояний входящих потоков ТКО в заданные показатели количества и качества выходных потоков  $P$  с учетом внешних факторов и условий, нормативных экологических ограничений по переменным вектора состояния внешней среды  $e$ . Применяя принцип Беллмана в формате исследования стохастических систем с неопределенными или нечеткими параметрами и характеристиками [17, 18], математическая модель обобщенного пропорционального регулятора достижения прогнозируемых динамических свойств (экологическая безопасность) и целевых эколого-ресурсных показателей описана в виде линейной функции векторов состояния объекта и внешней среды.

В рассматриваемом случае отсутствие полной, достоверной, объективной информации о потоках и их составе, целевых показателях не дают возможности сформировать матрицы стационарных линейных прямых и обратных связей оценки параметров работы регулятора обращения с ТКО. Указанная система управления в виде незамкнутого фрагмента материально-сырьевого баланса с исполнительным механизмом в виде преимущественно смешанного сбора, накопления, транспортирования, локальной обработки только ТКО реализует схему преобразований входящих потоков:  $\text{ТКО} \rightarrow (\text{ВР} + \text{отходы})$ , в результате которой большая часть полезных ресурсов поступает на размещение в природную среду. В результате прогноз достижения заданных динамических свойств не может быть адекватно представлен моделью регу-

лирующих воздействий регионального оператора обращения с ТКО ни в виде функции переменных состояния, ни в качестве функции оценок вектора состояния объекта жизнеобеспечения, не стремящегося к вектору экологической безопасности всей системы.

Предлагаемая альтернативная модель — впервые разработанная конфигурация пропорционально-интегрального регулятора со встроенной моделью исполнительного механизма в виде организационно-технической системы в комплекс жизнеобеспечения, описание которого задается линейной автономной моделью, имеет следующие отличительные особенности:

а) управление и регулирование обращения со всеми видами закончившей срок эксплуатации продукции, образующейся в процессе жизнеобеспечения;

б) наличие и использование полной информации о количестве, состоянии, свойствах, характеристиках обрабатываемых в замкнутой системе ресурсах, сырье, продукции, степени их воздействия на окружающую среду;

в) объектом регулирования системы являются ВР с исключением отходов как элемента сырьевого баланса и опасного состояния антропогенных объектов;

г) интеграция ресурсно-экологических и технико-экономических показателей в единой системе оценки функционирования ресурсовосстановительной системы;

д) интеграция исполнительного механизма организационно-технической системы и технологической инфраструктуры в инженерно-технический комплекс жизнеобеспечения городского округа и экономическую деятельность региона.

Абстрактное отображение в обобщенном виде функциональной схемы инновационной системы управления и регулирования экологически безопасным жизнеобеспечением посредством введения принципиально нового регулятора — многофункционального регионального оператора приведено на рис. 2.

Взаимодействие регулятора, исполнительного механизма, объекта управления формализовано следующим образом. Комплекс жизнеобеспечения образует антропогенные объекты в виде завершившей срок эксплуатации строительной и иной продукции  $O$ , потенциально обладающих опасными свойствами в случае их квалификации и обращения как с опасными отходами. Регулятор (региональный оператор), реализующий новый технологический подход «ресурсный цикл продукции в экологически безопасном процессе ее обращения»:

- осуществляет сбор, мониторинг текущей информации ( $Q_{\text{ож}}$ ,  $Q_{\text{го}}$ ,  $Q_{\text{р}}$ ) о состоянии, поведении объекта управления, его инженерно-техниче-

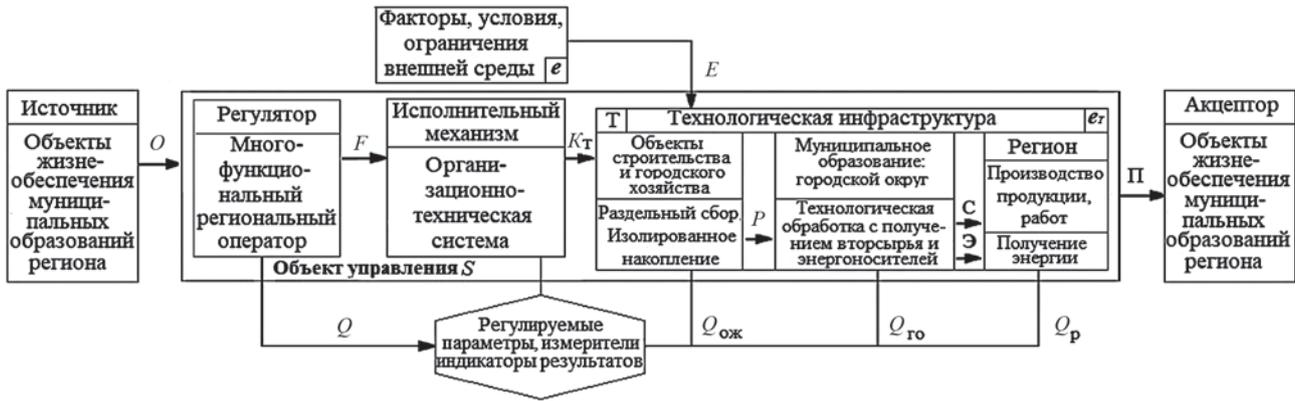


Рис. 2. Функциональная схема системы управления экологически безопасным жизнеобеспечением в рамках разработанной модели регионального оператора

ских системах во времени; входных, текущих, выходных параметрах ( $O, P, C, \Pi$ ); внешних факторах ( $E$ );

- генерирует на базе преобразования, системного анализа информации, означенные в дескриптивной модели управляющие, регулирующие, иные воздействия  $F$ , поступающие на исполнительный механизм в виде ресурсовосстановительной организационно-технической системы, реализующей посредством технологических преобразований  $K_T$  трансформационные процессы «использованная продукция – вторичные ресурсы ( $P$ ) – вторичное сырье ( $C$ ), энергоносители ( $\mathcal{E}$ ) – продукция, работы, энергия» на базе действующей и/или развития трехуровневой технологической инфраструктуры  $T$  (объект – городской округ – регион);
- обеспечивает состояние экологической безопасности ( $D$ ) жизнеобеспечения, приводя работу трехуровневой инженерно-технической инфраструктуры, параметров ее работы к прогнозным заданным значениям, определяемым сформированной новой системой технико-эколого-ресурсных индикаторов  $\bar{Q}$ .

С учетом законов сохранения, свойств целостности и замкнутости системы (предупреждения попадания отходов в природную среду), принято, что количество входящих потоков  $O$  и выходящих  $\Pi$  совпадает при наличии  $k$  экологически безопасных переходных состояний технологического преобразования сырьевых потоков, не создающих для окружающей среды дополнительного негативного воздействия. Тогда результирующий вектор экологического состояния комплекса жизнеобеспечения  $S \in R^k$  с встроенной технологической системой  $T$  при нулевом количестве обрабатываемых отходов имеет размерность  $k$ , совпадающую с размерностью векторов задающих воздействий  $O \in R^k$  и регулируемых выходных переменных  $\Pi \in R^k$ , т.е. каждый последующий этап обращения трансфор-

мирует антропогенные объекты в виде конечной безопасной продукции предыдущего этапа технологических преобразований. В отличие от действующей модели обращения ТКО, в качестве первоначального потока будут выступать не опасные отходы, а множество выделенной их ресурсной составляющей  $P \in R^o$ .

Предполагается, что определенный уровень экологической опасности может представлять технологическая инфраструктура  $T$  (в первую очередь, объекты энергетической утилизации и размещения «хвостов сортировки»), характеризуемая вектором изменения экологического состояния  $e_T$  и не утилизируемые смешанные остатки (преимущественно — горючие)  $\mathcal{E}$ , образующиеся на стадиях преобразования ресурсов. Этот процесс отображается вектором экологического состояния переменных обратных технологических потоков, потенциально обладающих экологической опасностью в процессе энергетической утилизации или размещения ( $\mathcal{E} = \Pi - C = O - C$ ). В исследуемом формате составной вектор экологического состояния комплекса жизнеобеспечения  $S$  и вектор состояния экологической безопасности территории  $e$ , как неотъемлемой составляющей внешней окружающей среды городского округа, региона, формируются следующим образом:

$$e = \begin{bmatrix} C \\ P \end{bmatrix} \text{ при } C \in R^{k-o}; P \in R^o \ e \in R^k$$

$$S = \begin{bmatrix} \mathcal{E} \\ e_T \end{bmatrix} \text{ при } S \in R^k; e_T \in R^{k-T};$$

$$\mathcal{E} \in R^T.$$

Для рассматриваемой замкнутой системы отображение векторов со знаком «+» принято по направлению реализации технологических процессов преобразования материально-сырьевых ресурсов от входного к выходному потоку и со зна-

ком «–» для обратного рециркулируемого в виде не перерабатываемых во вторсырье энергоресурсов Э, а также эмиссий загрязняющих веществ (сбросов, выбросов), образующихся в результате работы технологической инфраструктуры. Их направление противоположно основному потоку преобразования материально-сырьевых ресурсов, обуславливая построение матриц прямых и обратных связей.

В соответствии с принципом Беллмана, уравнение формирования управляющих воздействий многофункциональным региональным оператором (в виде обобщенного пропорционально-интегрального регулятора) со встроенной моделью исполнительного механизма по конечному состоянию экологической безопасности комплекса жизнеобеспечения имеет следующий вид:

$$F = \bar{k}_1 P + k_0 C - \bar{k}_1 e_T - k_T \Xi = [k_1, k_0] \begin{bmatrix} C \\ P \end{bmatrix} - [k_1, k_T] \begin{bmatrix} \Xi \\ e_T \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Применяя обозначения векторов:  $Q = [k_1, \bar{k}_0]$  и  $K(T) = [k_1, \bar{k}_T]$ , уравнение формирования управляющих воздействий, представлено выражением:

$$F = -K_T S + Qe, \quad (2)$$

где  $Q = [\bar{k}_1, k_0]$  — матрица преобразования опасных свойств и состояний входящих потоков использованной строительной и иной продукции в безопасные и полезные, позволяющие использовать ресурсный потенциал в качестве вторичного сырья;  $K_T = [k_{T1}, k_T]$  — матрица технологических преобразований потоков;  $K_T S$  — результирующая матрица экологической опасности технологических процессов перерабатывающей инфраструктуры по линейным стационарным обратным связям не утилизируемых в качестве вторичного сырья остатков;  $Qe$  — результирующая матрица прямых связей, реализующих трансформацию отходов в безопасное вторичное сырье, обеспечивая экологическую безопасность населенных пунктов от негативного воздействия отходов.

Выражение (2) характеризует баланс экологически безопасного состояния территории между эколого-ресурсным эффектом со знаком «+» и экологическим вредом со знаком «–», смещение которого достигается регулятором предлагаемой ресурсо-восстановительной организационно-технической системы.

Особенности и новизна предлагаемых научно-практических решений определены упомянутыми выше принципами нового превентивного технологического подхода к реализации системы экологической безопасности жизнеобеспечения, основополагающими из которых являются идентификация и последующие действия на всех этапах обраче-

ния с завершившей срок эксплуатации, бывшей в употреблении продукции (начиная со стадии зарождения) — не как с опасными отходами, а в качестве ценных вторичных ресурсов.

В отличие от известных научных позиций моделирования *конечного* результата в форме качественных и количественных параметров *выходных потоков* по заданным измеряемым входным и при наличии полной информации о технических средствах, аппаратах, устройствах преобразования рециркулируемых прямых/обратных потоков, в работе решена задача *моделирования* состава, порядка формирования, параметрических показателей *технологических процессов* и операций при наличии информации о входных потоках (ресурсной составляющей отходов, ее опасных, иных характеристиках) и конечных результатах (нормативных и стандартизованных технико-эксплуатационных свойствах, качестве, безопасности вторичного сырья, обеспечивающих возможность его использования для производства продукции, работ). Соответственно изменяется и алгоритм проведения исследования, предусматривающий на первом этапе системный анализ, количественную и качественную оценку параметров входных потоков в плане технической возможности, экологической, санитарно-гигиенической допустимости, экономической целесообразности повторного использования, на втором — установление прогнозных требуемых значений конечных, а затем при наличии граничных условий с учетом воздействия внешних факторов и ограничений моделирование параметрических характеристик технологических трансформационных процессов материально-сырьевого потока.

Построение матриц линейных связей цикла технологического преобразования материально-сырьевых ресурсов, для которого известны совокупность технологических операций, характеризующих их параметров, структура технологических связей, в рамках означенных теорий, реализуется на базе формирования и анализа матриц, соответствующих вектору переменных выходных потоков с качественными нормативными, стандартизованными технико-эксплуатационными свойствами, а также матриц, соответствующих вектору известных переменных входных потоков ресурсной составляющей:

$$KT_{ij} = Pc/Pr, \quad (3)$$

где  $KT_{ij}$  — матрица преобразований входных потоков  $j = (1...r)$  в выходные посредством  $i$ -х технологических операций множества  $(T)$ ;  $T_i$  — технико-эксплуатационные параметры  $i$ -й операции инженерно-технической инфраструктуры отдельного сбора, накопления, обработки, утилизации (в том

числе энергетической) ресурсной составляющей;  $Pc$  — матрица, соответствующая вектору переменных выходных потоков продукции из вторичного сырья;  $Pr$  — матрица, соответствующая вектору переменных входных потоков ресурсной составляющей  $j = (1...r)$  для  $i$ -го технологического процесса.

С учетом совокупности замкнутых многоконтурных технологических подсистем обращения прямых и обратных материально-сырьевых потоков, каждый из которых является результатом преобразования предыдущего, результирующая матрица, соответствующая вектору переменных выходных потоков экологически безопасной продукции из вторичного сырья определена выражением:

$$Pc = K_i(T_{CH})K(T_{OB})_i K(T_{V})_i Pr, \quad (4)$$

где  $K(T_{CH})_i$  — матрица преобразований входных потоков (По) по каждому объекту жизнеобеспечения и  $i$ -й операции раздельного сбора, накопления (CH), параметры которого известны, — в потоки  $P$ , поступающие на технологическую обработку (OB);  $TCH_i$  — технико-эксплуатационные параметры  $i$ -й операции, инженерных систем и технических средств раздельного сбора, накопления (емкость, исходя из объемов и спектра ресурсной составляющей, сроки накопления, периодичность вывоза);  $K(T_{OB})_i$  — матрица преобразований потоков  $P$  по каждой операции технологической обработки в потоки вторичного сырья  $C$  на утилизацию;  $T_{OB}_i$  — технико-эксплуатационные параметры  $i$ -й операции обработки ВР;  $K(T_{V})_i$  — матрица преобразований потоков вторичного сырья  $C$  и альтернативных источников энергии Э на утилизацию (включая энергетическую);  $T_{V}_i$  — технико-эксплуатационные параметры  $i$ -й операции перерабатывающей инфраструктуры (РК — рекуперация, РГ — регенерация, РЦ — рециклинг, ЭУВ и ЭУС — энергетическая утилизация высоко- и среднетемпературная).

Разработка математической модели каждого  $i$ -го процесса технологической инфраструктуры с построением матриц технологических преобразований потоков и определение значений координат вектора переменных выходных потоков ресурсвосстановительной системы могут быть реализованы только при известных значениях координат вектора переменных входных потоков каждого  $j$ -го элемента. Это предопределило необходимость классификации ресурсной составляющей множества  $O$ . Формирование матриц, соответствующих вектору переменных входных потоков, впервые осуществлено на основе типологизации по ряду выделенных признаков ресурсной составляющей завершившей срок эксплуатации, использованной строительной и иной продукции (условия образования, происхождение, материальный состав, сло-

жившиеся направления повторного применения). Классификация ВР по вышеназванным признакам приведена на рис. 3 (ВМР — зеленым цветом; ВЭР: высокотемпературная термическая утилизация — красным, среднетемпературная — розовым; в качестве рекультиванта — черным).

Принимая во внимание характер поставленных в работе задач, для которых не существует строгих подходов, позволяющих получить однозначный результат за оптимальное, в динамичных, нечетко выраженных условиях, время подготовки принятия проектных, организационно-технических и управленческих решений, методология исследования базируется на теории мягких вычислений с применением неточных и математически не строго обусловленных методов алгоритмизации, реализующих поэтапное достижение научных целей.

Предлагаемый методический подход позволяет реализовать приспособление, локализацию методов выбора проектно-технических решений в условиях динамичных во времени, нестационарных в пространстве технологических процессов преобразования материально-сырьевых ресурсов, учитывая фактор неточности начальных и граничных условий, показателей движения потоков.

В рамках теории нечетких множеств и мягких вычислений задача экспертной оценки поддержки принятия наилучшего в сложившихся условиях в данный момент времени организационно-технического решения по обращению с конкретной группой ВР состоит в том, чтобы при наличии нечетких оценок  $\{0; 1\}$  определить принадлежность каждого из ВР множеству установленных в документах по стандартизации технологических процессов трансформации ресурсной составляющей в конечную продукцию, образующих технологический цикл прогнозируемой ресурсвосстановительной организационно-технической системы жизнеобеспечения. Однако на практике не представляется возможным однозначное определение принадлежности элементов к одному и тому же множеству. В этих случаях нечеткий параметр  $K_T(r)$  не оценивается конкретными численными значениями, а изменяется на отрезке  $[0; 1]$ , т.е.  $K_T(r)$  характеризует не только принадлежность ресурсной составляющей  $r$  заданному множеству  $T$ , но и выражает степень ее принадлежности этому множеству. Таким образом, вводимая как способ задания и оценки соотношения множеств  $P$  и  $T$  характеристическая функция множества  $T$  представляет собой функцию  $K_T(r)$ , заданную на универсальном множестве  $P$ , принимающую значение «1» на элементах множества  $P$ , принадлежащих  $T$ , и значение «0» на элементах, ему не принадлежащих.

Принадлежность входящих элементов — видов ресурсной составляющей  $r \in P$  заданным множествам технологических процессов преобразования

| КАТЕГОРИИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ   |   |   |  |  |   |  |  |
|--|---|---|--|--|---|--|--|
| Минеральные (М)  | Бумажно-картонные (Б)   | Текстильные натуральные (Т)   | Древесные (Д)  | Синтетические полимеры на органической основе (ОСП)            | Полимерные (П)  | Металлические (МЕТ)                          | Смешанные загрязненные (С)                                       |
| Отходы строительства, реконструкции, ремонта, ликвидации (сноса), содержания объектов недвижимости |   |   |  |  |   |  |  |
| Бетона, железобетона (минеральная составляющая)  | Упаковочной бумаги незагрязненные                                 | Веревочно-канатных изделий из натуральных волокон незагрязненных                    | Древесные кусковые, обрезь натуральной чистой древесины                  | Линолеума ПВХ на тканевой основе, ковровина                    | Резиносодержащие, линолеума на резиновой основе (релина)                | Черных металлов (кусковые, опилки, стружка)  | Мусор мелкий строительный несортированный                        |
| Лом, бой кирпича, кирпичной кладки   | Упаковочного картона незагрязненные                               | Спецодежда из натуральных волокон использованная незагрязненная                     | Пыль древесная от шлифовки, стружка, опилки натуральной чистой древесины | ДСП, ДВП, МДФ, ОСИ, клееной древесины, фанеры, ламината        | Полиэтилена, полипропилена, полистирола, ПВХ, поликарбоната             | Цветных металлов (кусковые, опилки, стружка) | Кровельных и изоляционных остатков и обрезков материалов в смеси |
| Асфальта, асфальтобетона   | Упаковочного гофрокартона незагрязненные                          | Использованная спецодежда из натуральных волокон, пригодная для изготовления ветоши | Древесные при демонтаже временных дорожных покрытий                      | Пленко-синтетического картона                                  | Твердые и жидкие остатки клеев, растворителей, ЛКМ на полимерной основе | Фольги из алюминия                           | Смет с территории предприятия                                    |
| Затвердевшего раствора цемента   | Обойной, пачечной, др. видов бумаги                               | Изделий из натуральных волокон, пригодных для изготовления ветоши                   | Опалубки деревянной  | Рубероида, пергамина, толи                                     | Пенопласта. Жесткого пенополиуретана. Полиуретановой пленки, пены       | Лом алюминиевых банок из-под напитков        | Мусор и смет производственных помещений                          |
| Песка, гравия, щебня незагрязненных  | Использованные учебные книги, каталоги, прочая печатная продукция | Обрезки, обрывки льняных, х/б, шерстяных и прочих смешанных натуральных тканей      | Тары деревянной  | Древесные от сноса и разборки зданий                           | ОЭЭО (полимерная часть)   | ОЭЭО (металлическая составляющая)            | Синтетическая спецодежда, защитные средства, ветошь загрязненные |
| Керамики   | Использованные мешки бумажные без пропитки и покрытий             | Использованные матрасы, одеяла, подушки из натуральных волокон                      | Корчевания пней, щепы, коры  | Асбокартона, асбестовой бумаги                                 | ПЭТФ  | АБС-пластика                                 | Тара, упаковка, инструменты обработанные загрязненные            |
| Известе-, мелосодержащие   | Бумаги и картона от делопроизводства                              | Обрезь валяльно-войлочной продукции   | Сучьев, ветвей, зелень древесная   | Клеевой ленты, бумажных мешков, обоев с пропиткой и покрытиями | Стекловолокна, стеклопластика, стекловолога, оргстекла                  | Стальной сварочной проволоки и электродов    | Мусор от офисных и бытовых помещений организаций                 |
| Строительного грунта незагрязненного   |   |   |  |  | Битумно-полимерных материалов и изделий                                 | Железобетона (арматура стальная)             |  |
| Асбесто-содержащие   |   |   |  |  |   |  |  |
| Гипсо-содержащие   |   |   |  |  |   |  |  |
| Стекланный бой   |   |   |  |  |   |  |  |

Рис. 3. Блок-схема классификации материального состава, происхождения и направлений применения ресурсной составляющей использованной строительной и иной продукции

ресурсов на конкретной стадии технологического цикла  $T$  (распределение по множествам  $T_{об}$ ,  $T_{ср}$ ,  $T_y$ ), выражаемая характеристической функцией  $K_T(r)$ , отображена в виде:

$$K_T(r) = \begin{cases} 1, & \text{если } r \in T \\ (r \in P) & \\ 0, & \text{если } r \notin T \end{cases} \quad (5)$$

В общем виде образующие нечеткие множества матрицы преобразований входных потоков посредством  $i$ -х технологических операций обработки приведены на рис. 4 (1 означает наличие процесса трансформации данной группы ВР; 0 — отсутствие). При этом в процессе расчета математической модели с применением нечетких (мягких) вычислений для каждой  $i$ -й операции преобразования  $j$ -го вида ВР выделенных групп формируется отдельная прямоугольная матрица.

Наличие сформированных матриц входных и выходных потоков дает возможность установить конфигурацию процессов технологического преобразования сырьевых ресурсов внутри ресурсообеспечивающей системы.

В обобщенном виде задача моделирования процесса преобразований потоков ресурсной составляющей на стадии технологической обработки на многофункциональных сортировочных комплексах графически решена посредством построения параметрического потокового графа (рис. 5), служащего прототипом аналоговой имитационной модели системы. Вершины графа соответствуют

|          | РЗ | ОЧ | СП | СР | ДЗ | МО | СШ | ОБ | ВД | СК | Др | Из | Рз | Гр | Рд | Пп | Бр | Пр |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| $M_M$    | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| $M_c$    | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  |
| $D_r$    | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| $B_r$    | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| $T_r$    | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  |
| $P_r$    | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| $O_{СП}$ | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| $M_{ET}$ | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  |

Рис. 4. Матрица преобразований входных потоков в результате технологической обработки: РЗ — разборка; ОЧ — очистка; СП — сепарация; СР — сортировка; ДЗ — дезинфекция; МО — мойка; СШ — сушка; ОБ — облагораживание; ВД — выдержка; СК — складирование; Др — дробление; Из — измельчение; Рз — резка; Гр — гранулирование; Рд — разделка; Пп — переплав; Бр — брикетирование; Пр — прессование

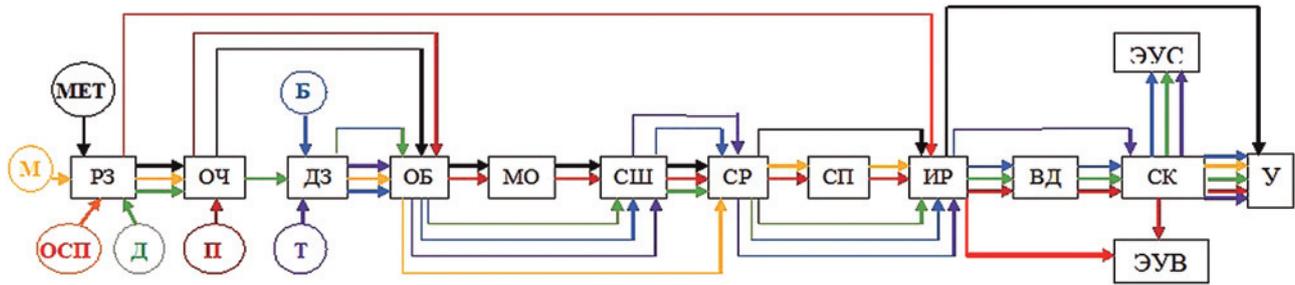


Рис. 5. Параметрический потоковый граф технологического цикла обработки ВР



Рис. 6. Последовательная функциональная схема преобразования ресурсной составляющей

множеству технологических операций, отображающие движение ресурсов дуги обладают одинаковой параметричностью.

Процесс определения параметрических характеристик технологического преобразования входных потоков ресурсной составляющей базируется на разработанной конфигурации функциональной схемы трансформации антропогенных объектов в рамках модели регулятора ресурсовосстановительной системы экологически безопасного жизнеобеспечения (рис. 6).

Представленная функциональная схема технологического преобразования ресурсной составляющей взята за основу при создании приведенной

модели многофункционального оператора по обращению с отходами комплекса жизнеобеспечения муниципальных образований и регионов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе впервые разработанного технологического подхода к предотвращению экологической опасности объектов жизнеобеспечения «ресурсный цикл продукции в экологически безопасном процессе ее обращения» сформированы новые принципы, методы технической адаптации инженерных систем, процессов обращения мате-

риально-сырьевых ресурсов в региональную перерабатывающую технологическую инфраструктуру, позволяя реализовать системный подход к обеспечению экологической безопасности техносферных территорий за счет развития ресурсовосстановительных процессов при функционировании объектов строительства и городского хозяйства.

Математическая модель ресурсовосстановительной многоуровневой системы экологически безопасного жизнеобеспечения «объект – муниципальное образование – регион» в качестве организационно-технического регулятора может быть реализована при формировании нового механизма функционирования региональных операторов

обращения не с ТКО, а с вторичным сырьем, получаемым из всего спектра бывшей в употреблении продукции и используемой повторно для нужд комплекса жизнеобеспечения с расширением сферы технико-экономической деятельности и полномочий региональных операторов.

Впервые разработанная структурно-функциональная модель организационно-технической системы и технологической инфраструктуры сбора, обработки, повторного использования вторичных ресурсов получила применение при обосновании Минпромторгом России прогноза и планировании развития сети отходоперерабатывающих объектов на перспективу до 2030 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зубрев Н.И. Теория и практика переработки отходов на железнодорожном транспорте: учебное пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 294 с.
2. Цховребов Э.С., Лебин А.Н., Белоусов В.Г. Новейшая история развития природоохранной деятельности в России // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2012. Т. 18. № 2. С. 192–196.
3. Цховребов Э.С., Яйли Е.А., Церенова М.П., Юрьев К.В. Обеспечение экологической безопасности при проектировании объектов недвижимости и проведении строительных работ: монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 360 с.
4. Римшин В.И. Вторичные ресурсы: переработка и использование // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2018. № 2. С. 98–99.
5. Чертес К.Л., Шестаков Н.И. Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1135–1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146
6. Калужный Б.О. Экономика замкнутого цикла – новая парадигма // Твердые бытовые отходы. 2018. № 4 (142). С. 8–9.
7. Цховребов Э.С., Садова С.В. Экономические и правовые вопросы оценки экологического ущерба (вреда) // Вестник РАЕН. 2014. Т. 14. № 2. С. 57–59.
8. Трапезников С.И. ВМР – это не отходы // Твердые бытовые отходы. 2019. № 1. С. 53–55.
9. Цховребов Э.С. Правовые аспекты обеспечения экологической безопасности // ЭКОС. 2008. № 3. С. 13–19.
10. Цховребов Э.С. Эколого-экономические аспекты обращения строительных материалов // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2013. Т. 19. № 3. С. 10–14.
11. Elgizawy S., El-Haggag S., Nassar K. Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study // Procedia Engineering. 2016. Vol. 145. Pp. 1306–1313. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.168
12. Domenech T., Bahn-Walkowiak B. Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons from the EU and the Member States // Ecological Economics. 2019. Vol. 155. Pp. 7–19. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.11.001
13. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // Resources, Conservation and Recycling. 2017. Vol. 127. Pp. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
14. Hart J., Adams K., Giesekam J., Tingley D.D., Pomponi F. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment // Procedia CIRP. 2019. Vol. 80. Pp. 619–624. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.015
15. Goldstein B., Rasmussen F.N. LCA of Buildings and the Built Environment // Life Cycle Assessment. 2018. Pp. 695–722. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3\_28
16. Slesarev M., Makarova A. Environmental safety of construction as a factor of graphoanalytical modeling of product parameters // Revista Inclusiones. 2020. Vol. 7. Pp. 477–488.
17. Григорьев В.В., Быстров С.В., Бойков В.И., Болтунов Г.И., Коровьяков А.Н., Мансурова О.К. и др. Проектирование регуляторов для стохастических систем и объектов с неопределенными параметрами. СПб.: ИТМО, 2013. 172 с.
18. Grigoriev V.V., Mansurova O.K. Qualitative exponential stability and instability of dynamical systems // IFAC Proceedings Volumes. 2001. Vol. 34. Issue 6. Pp. 899–902. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)35294-1
19. Гладышев Н.Г. Теория и исследования рециклинга в техноприродных кластерах обращения с отходами // Экология и промышленность России. 2011. № 3. С. 42–44.
20. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л. Алгоритм анализа многоконтурной химико-технологической системы // Автоматика и телемеханика. 1971. № 11. С. 129–140.

## REFERENCES

- Zubrev N.I. *Theory and practice of waste processing on a railway transport: textbook*. Moscow, FGBOU «UMTS of education on a railway transport», 2013;294. (In Russ.).
- Tshovrebov E.S., Lebin, A.N., Belousov, V.G. The newest history of development of nature protection activity in Russia. *Bulletin of N.A. Nekrasov Kostroma State University*. 2012;18(2):192-196. (In Russ.).
- Tskhovrebov E.S., Yaili E.A., Cerenova M., Yriev C. *Maintenance of ecological safety at designing of objects of the real estate and carrying out of civil work: monography*. St. Petersburg, RGGMU, 2013;360. (In Russ.).
- Rimshin V.I. Secondary resources: processing and use. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Materials. Constructions. Technologies»*. 2018;2:98-99. (In Russ.).
- Chertes K.L., Shestakov N.I. Modern biopositive technologies of waste processing in the utilities and construction industries. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020;15(8):1135-1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146 (In Russ.).
- Kalyuzhny B.O. Economy of the closed cycle – a new dilemma. *Municipal Solid Waste*. 2018;4(142):8-9. (In Russ.).
- Tshovrebov E.S., Sadova S.V. Economic and legal questions of an estimation of an ecological damage (harm). *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2014;2:57-59 (In Russ.).
- Trapeznikov S.I. Secondary material resources are not a waste. *Municipal Solid Waste*. 2019;1:53-55. (In Russ.).
- Tshovrebov E.S. Legal aspects of maintenance of ecological safety. *ECOS*. 2008;3:13-19. (In Russ.).
- Tskhovrebov E.S. Ecological-economic aspects of building materials reference. *The Bulletin of the Kostroma University of N.A. Nekrasov*. 2013;19(3):10-14. (In Russ.).
- Elgizawy S., El-Haggar S., Nassar K. Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study. *Procedia Engineering*. 2016;145:1306-1313. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.168
- Domenech T., Bahn-Walkowiak B. Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons from the EU and the Member States. *Ecological Economics*. 2019;155:7-19. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.11.001
- Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017;127:221-232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- Hart J., Adams K., Giesekam J., Tingley D.D., Pomponi F. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. *Procedia CIRP*. 2019;80:619-624. DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.015
- Goldstein B., Rasmussen F.N. LCA of Buildings and the Built Environment. *Life Cycle Assessment*. 2018;695-722. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3\_28
- Slesarev M., Makarova A. Environmental safety of construction as a factor of graphoanalytical modeling of product parameters. *Revista Inclusiones*. 2020;7:477-488.
- Grigoriev V.V., Bystrov S.V., Boykov V.I., Boltunov G.I., Koryakov A.N., Mansurova O.K. et al. *Designing Regulators for Stochastic Systems and Objects with Uncertain Parameters*. St. Petersburg, ITMO, 2013;172. (In Russ.).
- Grigoriev V.V., Mansurova O.K. Qualitative exponential stability and instability of dynamical systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 2001;34(6):899-902. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)35294-1
- Gladyshev N.G. Theory and investigations of recycling in techno-natural clusters of waste handling. *Ecology and Industry of Russia*. 2011;3:42-44. (In Russ.).
- Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Perov V.L. Algorithm of analysis of multiloop chemical-technological system. *Avtomatika i Telemekhanika*. 1971;11:129-140. (In Russ.).

## Об авторе

**Эдуард Станиславович Цховребов** — кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник; **Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий) (НИИ МЧС России)**; 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7; SPIN-код: 3464-2975, РИНЦ ID: 470064, Scopus: 57192385083, ORCID: 0000-0002-9481-3832; rebrovstanislav@rambler.ru.

**Алексей Николаевич Гордиенко** — начальник Центра; **Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий) (НИИ МЧС России)**; 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7; ORCID: 0000-0001-5179-1082; angordienko@mail.ru.

## Bionotes

**Eduard S. Tskhovrebov** — Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor; **All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Russian Emergencies Ministry (Federal Center for Science and High Technologies) (НИИ EMERCOM of Russia)**; 7 Davydkovskaya st., Moscow, 121352, Russian Federation; SPIN-code: 3464-2975, ID RSCI: 470064, Scopus: 57192385083, ORCID: 0000-0002-9481-3832, <https://orcid.org/0000-0002-9481-3832>; rebrovstanislav@rambler.ru.

**Alexey N. Gordienko** — Head of the Center; **All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Russian Emergencies Ministry (Federal Center for Science and High Technologies) (НИИ EMERCOM of Russia)**; 7 Davydkovskaya st., Moscow, 121352, Russian Federation; angordienko@mail.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.05.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 30.10.2022.  
The article was submitted 15.05.2022; approved after reviewing 28.07.2022; accepted for publication 30.10.2022.