

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ, ТЕХНИКЕ, ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (33)

2020

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

- Толстых Т. О., Гамидуллаева Л. А., Шмелева Н. В.*
МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРТФЕЛЯ
ПРОЕКТОВ В ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОСИСТЕМЕ5
- Бадеева Е. А., Машикина А. А., Нагаева А. Н.*
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
НАЛОГОВОГО МОНИТОРИНГА В РОССИИ24
- Толстых Т. О., Агаева А. М.*
ЭКОСИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ
В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ37
- Попова Е. А., Бижанова Е. М., Зинченко С. В.*
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫХОДА МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
НА МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЫНОК ЗЕРНА50
- Коваленко Е. Г., Пронина Ю. Ю., Князькина А. А.*
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИОРИТЕТОВ ИНВЕСТИРОВАНИЯ
В РАЗВИТИЕ СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЙ
ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ68

РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Крамм М. Н.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОДОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА
НА ПОВЕРХНОСТИ ЭПИКАРДА 78

Тукмаков Д. А.

КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ
ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ В ПРИМЕНЕНИИ
К ИССЛЕДОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
И ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ 86

Тарасов Д. А., Липов А. В., Ирышков А. М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ГИБКОЙ НИТИ 98

Колесников И. Н., Финогеев А. Г.

ПРОАКТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ
ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ 111

Полякова Е. А., Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И.,

Бадеев А. В., Славкин И. Е.

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 126

MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS, TECHNOLOGY, NATURE AND SOCIETY

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1 (33)

2020

CONTENT

SECTION 1. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN ECONOMICS AND MANAGEMENT

- Tolstykh T. O., Gamidullaeva L. A., Shmeleva N. V.*
METHODOLOGICAL ASPECTS OF PROJECT PORTFOLIO
FORMATION IN THE INNOVATION ECOSYSTEM.....5
- Badeeva E. A., Mashkina A. A., Nagaeva A. N.*
MODERN TRENDS AND PROSPECTS
FOR THE DEVELOPMENT
OF TAX MONITORING IN RUSSIA24
- Tolstykh T. O., Agaeva A. M.*
ECOSYSTEM MODEL OF ENTERPRISE DEVELOPMENT
IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION.....37
- Popova E. A., Bizhanova E. M., Zinchenko S. V.*
DEVELOPMENT OF THE METHOD OF SMALL-SIZED
ENTERPRISE' ENTRY ON THE CEREALS MARKET50
- Kovalenko E. G., Pronina Y. Y., Knyazkina A. A.*
MODELLING OF PRIORITIES OF INVESTMENT
INTO DEVELOPMENT OF RURAL TERRITORIES
OF THE PENZA REGION68

SECTION 2. MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

Kramm M. N.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SELECTING
THE ELECTRODES NUMBER ON RESULTS
OF RECONSTRUCTION OF ELECTRICAL POTENTIAL
DISTRIBUTION ON THE EPICARD SURFACE 78

Tukmakov D. A.

FINITE DIFFERENCE DYNAMICS MODEL
OF A HOMOGENEOUS MIXTURE IN APPLICATION
TO THE STUDY OF THE LARGE INTENSITY
OF THE SHOCK WAVE IN A HYDROGEN-AIR ENVIRONMENT 86

Tarasov D. A., Lipov A. V., Irishkov A. M.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF PLASTIC DEFORMATIONS IN MODELING
THE STRESS-STRAIN STATE OF A FLEXIBLE FILAMENT 98

Kolesnikov I. N., Finogeev A. G.

PROACTIVE EVENT MONITORING
BASED ON PREDICTIVE TIME SERIES ANALYSIS 111

Polyakova E. A., Badeeva E. A., Murashkina T. I.,

Badeev A. V., Slavkin I. E.

INFLUENCE OF OPTICAL FIBER BENDS ON METROLOGICAL
AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS
OF FIBER-OPTIC MEASURING TRANSDUCERS..... 126

РАЗДЕЛ 1

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ЭКОНОМИКЕ И УПРАВЛЕНИИ

УДК 332.14

DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-1

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ В ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Т. О. Толстых, Л. А. Гамидуллаева, Н. В. Шмелева

METHODOLOGICAL ASPECTS OF PROJECT PORTFOLIO FORMATION IN THE INNOVATION ECOSYSTEM

T. O. Tolstykh, L. A. Gamidullaeva, N. V. Shmeleva

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Предпринята попытка развития методологии формирования и оценки инновационных экосистем в решении проблемы оценки потенциала проектов предприятий-участников на примере инновационной экосистемы в промышленности. *Методы.* В качестве методологической основы исследования выбран системный подход. Основным методом выступил метод нечетких множеств. *Результаты и выводы.* Предложен новый подход к формированию портфеля проектов инновационной экосистемы, разработанный с использованием теории нечетких множеств, позволяющий учитывать особенности каждого из этапов жизненного цикла инновационных проектов, входящих в экосистему. Использование концепции жизненного цикла при проектировании экосистем позволяет выстраивать эффективные стратегии на каждой стадии развития с учетом свойственных данной стадии проблем, поставленных целей с задействованием всех имеющихся в распоряжении ресурсов.

Ключевые слова: экосистема, инновационная экосистема, промышленная экосистема, эффективность, инновационные проекты, жизненный цикл, отбор проектов.

Abstract. *Subject and goals.* This article attempts to develop a methodology for the formation and assessment of industrial ecosystems in terms of solving the problem of assessing the potential of projects and their selection. *Methods.* As a methodological base, a systematic approach to the analysis of the role of actors in the formation of the industrial ecosystem from the point of view of the law of self-organization was chosen. The main research method was the fuzzy set method. *Results and conclusions.* The authors proposed a new approach to the formation of a portfolio of innovative projects of an industrial ecosystem based on an assessment of the potentials of projects included in the ecosystem, developed using the theory of fuzzy sets, which allows taking into account the features of the stages of the life cycle of individual innovative ecosystem projects. It is the use of the life cycle concept in the design of industrial ecosystems that allows us to build effective strategies at each stage of development, taking into account the problems and goals inherent in this stage, using all available resources.

Keywords: ecosystem, innovation ecosystem, industrial ecosystem, efficiency, innovative projects, life cycle, project selection.

Введение

Очевиден тот факт, что экономика России стагнирует на протяжении последних восьми лет под влиянием множества факторов, среди которых современные демографические тенденции и политика Центрального банка РФ. В таких условиях без инновационных технологических прорывов преодолеть стагнацию практически невозможно. Согласно мнению А. Г. Аганбегяна, одними из ключевых драйверов технологического развития экономики являются инвестиции в производство [1]. Российской экономике необходим форсированный экономический рост, который можно обеспечить посредством ускоренного инновационного развития производственной сферы [2]. Инновации оказывают структурирующее воздействие на производство и продукцию, изменяют привычные бизнес-модели, являясь драйвером развития промышленности. При этом процесс реализации инновационных проектов является результатом тесных взаимодействий между различными субъектами экономической деятельности и находится в прямой зависимости от сложившейся сетевой среды, создающей благоприятные условия для налаживания взаимодействия экономических агентов с другими участниками инновационных процессов [3–5].

В манифесте Давосского форума 2020, опубликованного К. Швабом, говорится о том, что нынешний капитализм – это капитализм стейкхолдеров: «Цель компании – вовлечь все заинтересованные стороны в совместный и устойчивый процесс создания стоимости. Создавая ее, компания служит интересам не только своих акционеров, но и всех стейкхолдеров – сотрудников, клиентов, поставщиков, местных сообществ и общества в целом» [6]. В. А. Карпинская справедливо отмечает, что «в условиях ускорения процессов экономической интеграции на микро-, мезо- и макроуровне, усложнения форм организации бизнеса, возникновения новых форм сотрудничества компаний и новых способов совместного создания ими добавленной стоимости многие организационные границы в экономике становятся все более размытыми и динамичными» [7]. Эти обстоятельства актуализируют различного рода коллаборативные модели создания инноваций на уровне сетевых структур, образующих экосистемы устойчивых взаимодействий [8–10]. Основоположителем экосистемного подхода в экономике является Дж. Мур [8], предложивший под бизнес-экосистемами понимать кластер взаимодействующих субъектов (различных фирм, университетов, научных парков, общественности и государства), которые сосуществуют в общей среде и развиваются вместе. В подавляющем большинстве появившихся работ в этой области прямо или косвенно проводится аналогия с природными экосистемами как сообществом живых организмов в сочетании с неживыми компонентами их среды, где предполагается, что приставка «эко» означает связь с окружающей средой, а «система» означает функцию как совокупность связанных частей, которые функционируют как единое целое [9]. Природные экосистемы могут быть любого размера, но обычно охватывают определенное ограниченное географическое пространство. В экономическом смысле экосистема состоит из экзогенно заданных компонентов, окружающей среды и агентов, которые эндогенно действуют вместе как система, связанная с получением выгод от взаимосвязи [10]. Экосистемы объединяют и интегрируют интересы начинающих или конкурирующих между собой предприятий, которые предла-

гают различные продукты и услуги. Можно с уверенностью утверждать, что экосистемы постепенно становятся новыми акторами экономики и, соответственно, объектом экономического анализа. Как известно, существуют «бизнес-экосистемы» [8], «инновационные экосистемы» [11], «цифровые экосистемы» [12], «университетские экосистемы» [13, 14], «финансовые экосистемы» [14, 15], «предпринимательские экосистемы» [16]. В целом теория инновационной экосистемы является продолжением плеяды экономических исследований по инновационным системам, основы которых были заложены Б. Лундваллом, Р. Нельсоном и К. Фрименом [17–19], отличаясь при этом повышенным вниманием исследователей к динамичным сетевым взаимодействиям в процессе создания инноваций. По мнению Н. В. Смородинской, экосистемный подход делает акцент на взаимодействиях участников (коллаборации), которые обеспечивают генерацию и распространение знаний с последующей трансформацией в инновации [20]. Основу инновационной экосистемы образуют формальные и неформальные институты, которые влияют на процессы взаимодействия субъектов в процессе инновационной деятельности и обеспечивают получение синергетических эффектов [3, 5].

Параллельно начала развиваться и теория промышленных (индустриальных) экосистем [21–24]. Например, в работе [21] разработаны теоретические основы для оценки структуры, функционирования и эволюции региональной промышленной экосистемы, которые интегрируют основные положения промышленной экологии, экономической географии и теории сложных систем. Автор подчеркивает все многообразие естественных функций экосистем, экономических транзакций, экономической политики и социальных взаимодействий, в рамках которых развивается межфирменное сотрудничество в регионе.

При всем многообразии подобных исследований теория развития экосистем все еще находится на стадии методологического становления.

В контексте нашего исследования необходимо подчеркнуть важность таких характеристик экосистемы, как взаимодополняемость и координация предприятий различных отраслей, объединенных по принципу совместной специализации. В свою очередь, совместная специализация означает, что «условием присоединения какого-либо участника в экосистеме должен быть определенный объем его инвестиций, не являющихся полностью заменяемым» [7]. Как справедливо отмечено в [25, с. 34], «ключевым элементом экосистемы является инновационный проект, так как важнейшим показателем ее эффективности является успешность реализуемых инновационных проектов». Остальные элементы необходимы для генерации, поддержания и развития этих проектов. Следовательно, инновационную экосистему можно представить «в виде области роста инновационного проекта, который зарождается в данной системе и затем последовательно проходит все стадии своего развития» [25, с. 34]. Особую сложность составляет реализация непрерывного отбора инновационных проектов, обеспечивающих получение положительных синергетических эффектов от взаимодействия участников и позволяющих формировать эффективные устойчивые экосистемы. Отбор проектов предполагает оценку их потенциала и должен проходить в неразрывной связке с целями и особенностями развития всей экосистемы.

В статье авторами предпринята попытка развития методологии формирования и оценки экосистем в решении проблемы оценки потенциала инновационных проектов на примере инновационной экосистемы в промышленности. Использование концепции жизненного цикла при проектировании экосистем позволит выстраивать эффективные стратегии на каждой стадии развития с учетом свойственных данной стадии проблем, поставленных целей с задействованием всех имеющихся в распоряжении ресурсов.

Методология и методы исследования

Исследуя экосистему, которая может объединять в качестве акторов экономические субъекты на микро-, мезо- и макроуровнях с целью инициации и разработки инновационных проектов на принципах совместного использования интеллектуальных, технологических и материальных ресурсов, целесообразно рассмотреть и концепцию жизненного цикла применительно к экосистеме. Тогда классификацию проектов, реализуемых в экосистемах, можно представить в виде двух проекций:

- уровень экосистемы;
- сложность структуры экосистемы, которая будет зависеть от количества акторов, их масштаба и потенциала.

Например, проекты трансфера технологий, рециклинга, аддитивного производства, проектирования новых технологий и материалов имеют сложную структуру и могут быть реализованы на региональном, национальном и международном уровнях. Проекты, связанные с кросс-отраслевой кооперацией, энергоэффективностью, цифровым моделированием, созданием интеллектуальной собственности, реализуются на мезоуровне. В свою очередь, на микроуровне целесообразно реализовывать инжиниринговые и образовательные проекты.

Учитывая, что стратегия формирования экосистемы нацелена в конечном итоге на повышение эффективности реализации процессов разработки, внедрения и продвижения инновационных проектов, авторами предлагается исследовать жизненный цикл проектов в экосистеме (рис. 1).

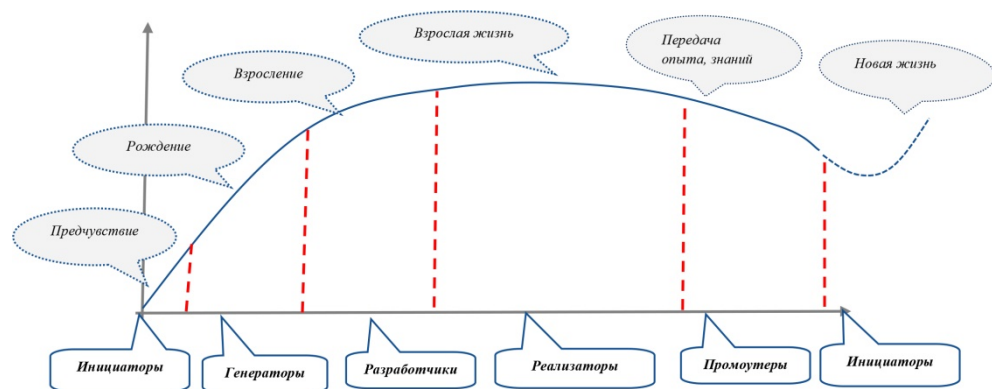


Рис. 1. Жизненный цикл проекта в экосистеме

Жизненный цикл любого проекта включает, как правило, четыре стадии: инициация, разработка, реализация и контроль. Стадий проектов экоси-

системы больше уже потому, что такие проекты включают в себя процессы генерирования знаний, разработки и конструирования, обучения, переливы знаний между акторами, переливы знаний между экосистемами. При этом жизненные циклы экосистем могут различаться от уровней (микро-, макро- и мезо-), а стадии различаться по составу акторов-участников. На рис. 1 представлено шесть возможных стадий жизненного цикла проекта промышленной экосистемы.

К таким стадиям можно отнести следующие:

1. Предчувствие. На этой стадии у акторов-инициаторов возникает осознание необходимости изменений. Такими акторами могут стать крупные промышленные комплексы, которым необходимы процессы трансформации, а также университеты, генерирующие и аккумулирующие отечественный и мировой опыт.

2. Рождение. Это стадия конструирования, логической и технологической проработки, описания идеи. Акторами-генераторами этой стадии могут быть инжиниринговые центры, технопарки, венчурные компании, исследовательские структуры, стартапы, консалтинговые компании, финансовые институты. Университеты выступают на этой стадии акторами-интеграторами, определяющими тех, кто в состоянии создать ту или иную идею.

3. Взросление. На этой стадии формируются команды для реализации проекта. К акторам предыдущей стадии дополнительно подключаются промышленные предприятия.

4. Взрослая жизнь. Эта стадия непосредственной реализации проекта. Акторами-реализаторами выступают промышленные предприятия, внедряющие инновационные проекты, и акторы, участвующие непосредственно в разработке этих проектов.

5. Передача опыта и знаний. Одна из основных задач экосистемы – перелив знаний. Акторами этой стадии являются университеты, промышленные предприятия, маркетинговые компании.

6. Новая жизнь. Новые вызовы требуют изменений и трансформаций. Эта стадия предполагает преобразование опыта реализации прошлых проектов в новые проекты.

Для оценки экосистемы как единой системы, реализующей портфель инновационных проектов (рис. 2), авторы предлагают использовать модель жизненного цикла, состоящую из четырех стадий, которые могут быть не только последовательными, но и перекрываться во времени друг другом.

Дадим краткую характеристику каждой из этих стадий.

1. Стадия разработки концепции. На данной стадии производится анализ альтернатив развития, разрабатываются первоначальные системные требования, а также потенциальные проектные решения. Итогом является построение архитектуры системы.

2. Стадия становления экосистемы. Предполагает непосредственное проектирование самой системы, которая нацелена на решение обозначенных на предыдущем этапе задач. На данной стадии разрабатывается прототип экосистемы, отвечающий всем необходимым требованиям; формируются ее структуры; определяются границы экосистемы и разрабатывается траектория (стратегия) развития каждого актора системы; оценивается состояние экосистемы на базе интегральных характеристик сетевых взаимодействий.

3. *Стадия функционирования.* Как правило, это самый длинный этап жизненного цикла экосистемы, в течение которого реализуются мероприятия, направленные на поддержание и повышение эффективности функционирования экосистемы. Осуществляются поиск оптимальной конфигурации системы для адаптации к внешним и внутренним изменениям, управление процессами, связанными с обеспечением жизнеспособности системы.

4. *Стадия сукцессии.* Подразумевает последовательную замену одного актора другим под воздействием внешних и внутренних факторов. При устойчивом развитии экосистемы сукцессия заканчивается формированием устойчивой стадии жизненного цикла. Акторы продолжают развиваться в рамках экосистемы. Паттерны жизненного цикла выделяют в зависимости от распределения различных рисков по стадиям цикла.

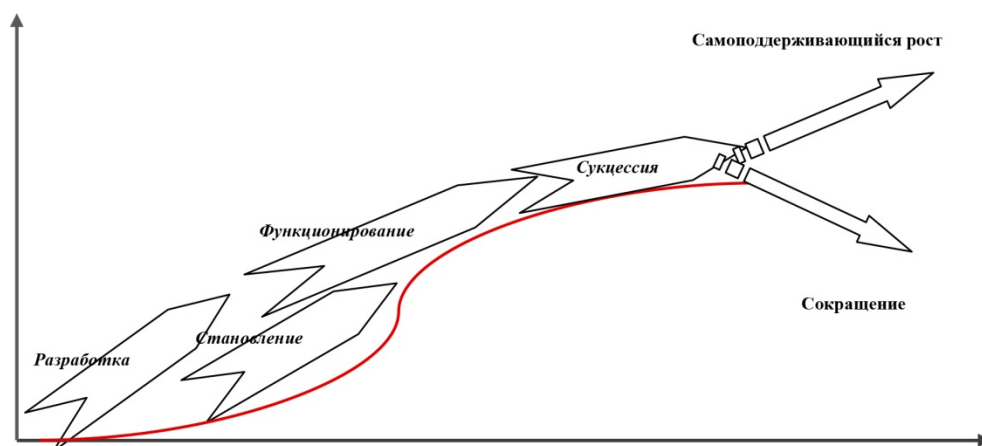


Рис. 2. Жизненный цикл экосистемы, реализующей портфель инновационных проектов

Каждый актор экосистемы развивается в соответствии со своим жизненным циклом, где последовательно происходит смена стадий развития. В жизненном цикле акторов важно выделить две основные фазы:

- 1) актор потребляет значительные ресурсы для своего становления и развития;
- 2) при достижении предела роста ресурсы направляются на трансформацию.

Методика формирования портфеля инновационных проектов экосистемы

Новые знания представляют собой энергию, которая обеспечивает самоорганизацию экосистемы. В наступательном варианте знания – это возможность экосистемы инициировать и реализовывать новые проекты. Знание-емкость экосистемы зависит как от акторов, входящих в нее, так и от проектов, ею реализуемых.

Методика формирования знаниеемкого портфеля проектов состоит из четырех этапов:

- I. Оценка потенциалов проектов, входящих в экосистему.
- II. Оценка результативности проектов.

III. Анализ полученных оценок.

IV. Принятие управленческого решения по возможности включения рассматриваемых проектов и акторов в другие экосистемы.

Этапы I и II выполняются по одному алгоритму. Изложим алгоритм первого этапа. Он предусматривает последовательное выполнение пяти шагов.

Шаг 1. Определим классификатор для оценки потенциала некоторого проекта, представляющий собой разновидность «серой» шкалы Поспелова [26], которая является полярной шкалой, где происходит плавный переход от свойства A^+ к свойству A^- . Эта шкала должна удовлетворять определенным условиям: а) свойства A^+ и A^- должны быть взаимно компенсируемыми; б) существует нейтральная точка A_0 , в которой свойства A^+ и A^- реализуются в одинаковой степени.

Шаг 2. Сформируем совокупность показателей, характеризующих потенциал результативности проекта. Каждому проекту при этом присваивается соответствующий ранг, который обозначим через переменную X_i ($i=1, \dots, n$), где n – число показателей [27, с. 92].

Шаг 3. Оценим влияние показателя на значение потенциала с применением лингвистической переменной. Введем лингвистическую переменную b_i = «значение показателя X_i ». Универсальным множеством для переменной b_i является отрезок $[1, m]$, где m – число оцениваемых объектов. Считаем, что каждая лингвистическая переменная имеет трапециевидную функцию принадлежности.

Шаг 4. Определим терм-множество из пяти элементов, т.е. $B = \{B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}, B_{i4}, B_{i5}\}$, при этом можно использовать следующие значения термов в зависимости от значений рангов по анализируемому показателю (например, в пропорции 1:2:4:2:1), где B_{i1} – очень низкий уровень показателя X_i ; B_{i2} – низкий уровень показателя X_i ; B_{i3} – средний уровень показателя X_i ; B_{i4} – высокий уровень показателя X_i ; B_{i5} – очень высокий уровень показателя X_i .

Шаг 5. Перейдем от показателей, характеризующих потенциал $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\}$, непосредственно к лингвистическим переменным $G = \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$.

Сформулируем правило перехода от оценок показателей к лингвистическим переменным. С этой целью определяем вес (r_i) показателя по степени вклада в потенциал. Существует два способа определения веса: а) по правилу Фишберна в случае, когда имеем упорядоченность весов, б) принимаем показатели с равным весом в случае, когда показатели равно предпочтительные или система предпочтений отсутствует.

Тогда правило перехода от значений показателей к весам термов лингвистической переменной g принимает следующий вид:

$$p_k = \sum_{i=1}^n r_i \mu_{ki}, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (1)$$

Рассчитав наблюдаемые веса каждого термина лингвистической переменной G_i , определяем значения самой переменной g по следующей формуле:

$$g = \sum_{k=1}^5 p_k \bar{g}_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (2)$$

где $\bar{g}_k$ – середина промежутка, который является носителем термина $G_k \in (a_{k1}, a_{k4}]$ [27, с. 92–93].

Оценка потенциала проекта зависит от заказчика проекта, которым может выступать другой актор или несколько акторов сразу.

В том случае, когда необходимо оцениваемые проекты ранжировать (оценивать) по определенной значимой (критической) группе или нескольким значимым (критическим) для заказчика группам параметров (далее – критические параметры) для принятия принципиального решения, необходимо их вначале идентифицировать. Потом оценить по ним, задавая строгие ограничения, и отбросить те акторы (если их несколько), которые в принципе им не соответствуют. Для них оценка по остальным параметрам не имеет смысла. Например, выделяем критические группы оценки потенциала проекта: технологический, предпринимательский, интеллектуальный потенциалы. Если по какому-нибудь параметру из этих групп оценка актора не соответствует строгому ограничению заказчика, то такой потенциал проекта оценивается как недопустимый. Обобщенный критерий оптимизации в виде функции желательности Харрингтона принимает значение, равное 0, что соответствует по шкале функции желательности (табл. 1) «очень плохо». Данный случай в принципе является частным по отношению к первому варианту, поэтому не имеет принципиальных отличий в оценке.

Таблица 1

Шкала желательности Харрингтона [28]

Эмпирическая система предпочтений (желательность)	Числовая система предпочтений (система психологических параметров)
Очень хорошо	1,00–0,80
Хорошо	0,80–0,63
Удовлетворительно	0,63–0,37
Плохо	0,37–0,20
Очень плохо	0,20–0,00

Рассмотрим методику оценки потенциала проекта и ее основные этапы.

1. Первоначально необходимо задать ограничения и (или) желательные уровни по всем указанным частным параметрам оценки каждой группы показателей. При этом предполагается, что все параметры оценки, указанные в табл. 1, имеют значения количественные со своими единицами измерений или качественные в виде экспертной оценки (баллы).

2. По тем параметрам оценки, по которым заданы строгие ограничения, т.е. установлены строгие пороги (max, min; max и min), необходимо установить допустимость. Если по какому-либо строгому параметру потенциал проекта является недопустимым, то такой проект является неэффектив-

ным или непригодным для данной экосистемы. На этом оценка потенциала актора (если она одна) заканчивается.

3. Если по всем строгим параметрам проект является допустимым, то необходимо приступить к процедуре перевода всех заданных параметров различной физической сущности как количественных, так и качественных в шкалу желательности Харрингтона (см. табл. 1).

4. Если ограничения, заданные по параметрам (индикаторам) оценки, представлены как одностороннее ограничение (либо $\min$, либо $\max$), то для определения функций желательности (d_{ij}) этих параметров используются следующие формулы Харрингтона:

$$d_{ij} = e^{-e^{-y'_{ij}}}; \quad (3)$$

$$y'_{ij} = \frac{(y_{\max} - y_{ij})}{y_{\max}}; \quad (4)$$

$$y'_{ij} = \frac{(y_{ij} - y_{\min})}{y_{\min}}, \quad (5)$$

где d_{ij} – частная функция желательности с односторонним ограничением для i -го параметра j -го проекта; $y_{\max}$, $y_{\min}$ – верхний и нижний пределы одностороннего ограничения по i -му частному параметру; y'_{ij} – кодированное (нормированное) значение i -го частного параметра j -го проекта, переводимого в шкалу желательности.

5. Если ограничения, заданные по параметрам (индикаторам) оценки, представлены как двустороннее ограничение, что, возможно, имеет место для некоторых параметров (и $\min$, и $\max$), то для определения функций желательности (d_{ij}) этих параметров используется следующая формула Харрингтона:

$$d_{ij} = e^{-|y'_{ij}|^n}, \quad (6)$$

где y'_{ij} – кодированное (нормированное) значение i -го частного параметра j -го проекта, переводимого в шкалу желательности; n – показатель степени, устанавливаемый и имеющий свое значение для каждого частного параметра, имеющего двустороннее ограничение, в зависимости от требований заказчика.

Кодированное (нормированное) значение i -го частного параметра j -го проекта, переводимого в шкалу желательности, определяется в этом случае по формуле

$$y' = \frac{(2y - (y_{\max} + y_{\min}))}{(y_{\max} - y_{\min})}. \quad (7)$$

В итоге получатся данные, которые могут быть представлены в виде табл. 2 при оценке нескольких проектов (A), где n – количество параметров оценки, а m – число оцениваемых проектов.

Форма для оценки проектов по модели Харрингтона

Параметры $i = 1, n$ $A, j = 1, m$	Параметр 1			Параметр 2			Параметр 3			Параметр i			Параметр n		
	y_1	y'_1	d_1	y_2	y'_2	d_2	y_3	y'_3	d_3	y_i	y'_i	d_i	y_n	y'_n	d_n
$A1$	...	...	d_{11}	...	...	d_{21}	...	...	d_{31}	...	...	d_{i1}	...	...	d_{n1}
$A2$	...	...	d_{12}	...	...	d_{22}	...	...	d_{32}	...	...	d_{i2}	...	...	d_{n2}
$A3$	...	...	d_{13}	...	...	d_{23}	...	...	d_{33}	...	...	d_{i3}	...	...	d_{n3}
Aj	...	...	d_{1j}	...	...	d_{2j}	...	...	d_{3j}	...	...	d_{ij}	...	...	d_{nj}
Am	...	...	d_{1m}	...	...	d_{2m}	...	...	d_{3m}	...	...	d_{im}	...	...	d_{nm}

6. Обобщенная функция желательности Харрингтона (критерия оптимизации) j -го актора определяется как среднегеометрическое частных желательностей по формуле

$$D_j = \sqrt[n]{d_{1j} \cdot d_{2j} \cdot d_{3j} \cdot \dots \cdot d_{ij} \cdot \dots \cdot d_{nj}}. \quad (8)$$

Среднегеометрическое позволяет отбросить любого участника, не соответствующего хотя бы одному параметру, по которому задано строгое ограничение.

По критерию $D_j \rightarrow 1$ устанавливаем наилучшие проекты с оптимальным потенциалом. Чем ближе к единице оценка потенциала проекта, тем лучше этот участник для экосистемы с позиции оценки всех составляющих элементов потенциала. Полученные остальные оценки альтернативных проектов сопоставляются с предпочтениями шкалы желательности (см. табл. 1) и могут быть использованы как альтернативные варианты (при оценках «удовлетворительно», «хорошо», «очень хорошо»).

Система критериев оценки проектов экосистемы в промышленности

Исходной предпосылкой при разработке критериальных показателей для оценки проектов экосистемы является позиционирование экосистемы в качестве системы связанных друг с другом проектов, оценка которых должна осуществляться с использованием количественных и качественных показателей, позволяющих производить диагностику экосистемы посредством укрупненных параметров. К числу таких параметров предлагаем отнести следующие:

1. Укрупненный количественный параметр оценки результатов интеллектуальной деятельности ($\Xi_{ид}$). Этот показатель характеризует интеллектуальный потенциал проекта (табл. 3).
2. Укрупненный количественный параметр оценки значимости проекта определяет «возможность перерождения» проекта.
3. Укрупненный количественный параметр оценки экономической эффективности проектов на основе денежных потоков позволяет определить финансовый потенциал проекта.

Таблица 3

Группы оценки потенциала проекта на стадиях жизненного цикла (ЖЦ)

Потенциал проекта / Стадии ЖЦ	Потенциал проекта				
	P1	P2	P3	P4	P5
Предчувствие	Новизна	Актуальность	Интеллектуальность	Финансовый	Технологический
Рождение	Креативность	Востребованность	Интеллектуальность	Финансовый	Технологический
Взросление	Организационный	Проработанность идеи	Интеллектуальность	Финансовый	Технологический
Взрослая жизнь	Проработанность идеи	Управленческий	Кадровый	Финансовый	Технологический
Передача опыта	Востребованность	Оригинальность	Результативность	Эффективность	Управленческая активность
Новая жизнь	Возможность перерождения	Креативность	Интеллектуальность	Финансовый	Технологический

Результирующий количественный показатель оценки проекта (Ξ_n) рекомендуется определять как среднегеометрическую трех составляющих: количество созданных результатов интеллектуальной деятельности; темп прироста добавленной стоимости; денежный поток от интеллектуальной деятельности.

Для перевода количественных показателей в баллы может быть использована функция желательности Харрингтона, устанавливающая соответствие между числовой и эмпирической системами предпочтений.

С целью проведения диагностики состояния экосистемы по качественным параметрам необходимо разработать карты экспертных оценок (табл. 4).

Таблица 4

Карта экспертных оценок анализируемых укрупненных параметров состояния экосистемы (составлена авторами)

Показатели потенциала проектов	Градации параметров в соответствии со шкалой желательности Харрингтона				
	(1,00)	(0,8)	(0,63)	(0,37)	(0,2)
1	2	3	4	5	6
Креативность	Высокий уровень творческой, созидательной, новаторской деятельности при реализации проекта. Создание качественно новых продуктов и услуг, отличающихся неповторимостью, оригинальностью и уникальностью	...	...	...	Утилитарность – создание материальных и нематериальных ценностей, управление ценностями, осуществляемое в соответствии с уже существующими технологиями, а также общепринятыми правилами, нормами и принципами

1	2	3	4	5	6
Технологический потенциал	Высокий технологический потенциал, который обеспечивается совокупностью располагаемых, привлекаемых и мобилизуемых материально-технических и организационно-управленческих ресурсов и возможностей для достижения поставленных целей научно-технологического развития	...	...	...	Технологический потенциал отсутствует.
Проработанность идеи	Идея проработана, учтены различные элементы – компоненты проблемы – и сведены в единое целое	...	...	...	Идея неэффективна для решения поставленных задач

Таким образом, дана оценка качественных показателей, характеризующих потенциал проекта. Для оценки качественных показателей потенциала может быть рекомендована шкала, приведенная в табл. 5. Чтобы обеспечить взаимосвязь стратегии акторов с общей стратегией развития экосистемы, предлагается декомпозировать цели и ключевые показатели эффективности (КПИ).

Таблица 5

Шкала оценки качественных показателей потенциала проекта
(составлена авторами на основе [26])

Шкала оценки	Описание		
1	2		
0	Низкий уровень креативности проекта. Используются уже существующие технологии, установленные нормы, правила, подходы	Идея не проработана, так как неэффективна для решения поставленных задач	Технологический потенциал отсутствует
+1	Невысокий уровень. Новые методы проектной деятельности позволяют адаптироваться к изменяющимся внешним условиям, но внутренние резервы оптимально не используются	Идея проработана недостаточно, отсутствует взаимосвязь с результирующими показателями проекта	Производительность технологической структуры производства соответствует среднеотраслевому показателю

1	2		
+2	Способность отказываться от стереотипных способов проектной деятельности	Идея апробирована, получены результаты, но они ниже запланированных	Своевременное технологическое обновление основных средств, направленное на ресурсосбережение
+3	Способность генерировать оригинальные идеи для решения новых проблем	Способность идеи побуждать к нахождению новых решений	Уровень асинхронного изменения технологической структуры
+4	Создание качественно новых продуктов и услуг, отличающихся неповторимостью, оригинальностью и уникальностью	Идея формирует новый подход к проблеме, соответственно, и новый способ ее решения. Существует возможность модификации самой идеи	Соотношение уровня новых и старых технологий
+5	Высокий уровень творческой, созидательной, новаторской деятельности при реализации проекта	Идея проработана, учтены различные элементы – компоненты проблемы и сведены в единое целое	Применяются вновь созданные передовые технологии, расширяется технологическое и продуктовое разнообразие

Перечень качественных показателей, характеризующих потенциал проекта, на каждой стадии жизненного цикла определяется экспертным путем.

После получения экспертных оценок в баллах определяются кодированные значения контрольных точек (y_{ij}) с учетом нижнего и верхнего пределов допустимости значения ($y_{\min} = 0$, $y_{\max} = 5$) по методике желательности Харрингтона (см. формулы (4), (5)). Затем рассчитывается кодированное значение каждого качественного параметра по формуле (6). Потенциал (P) качественных показателей на каждой стадии жизненного цикла проекта определяется как среднегеометрическое кодированных значений (y_{ij} ; d_i). Итоговый потенциал проекта считаем как среднеарифметическое между потенциалами показателей как качественных, так и количественных ($\Sigma P_i/n$).

Чем ближе к единице оценка потенциала проекта, тем лучше этот участник для экосистемы с позиции всех составляющих элементов потенциала. Значение показателей потенциала проекта в интервале от 0 до 1 соответствует уровню на шкале Харрингтона «очень плохо» (0,2 – 0); от 1 до 2 – «плохо» (0,37 – 0,20); от 2 до 3 – «удовлетворительно» (0,63 – 0,37); от 3 до 4 – «хорошо» (0,80 – 0,63); от 4 до 5 – «очень хорошо» (1,00 – 0,80).

Данная методика оценки потенциала проектов позволяет принимать управленческие решения по дальнейшим действиям акторов экосистемы относительно развития проектов.

Апробация методики на примере проекта, реализуемого научными центрами и лабораториями Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Один из реализуемых на данный момент проектов называется «Разработка технологий цифрового производства для промышленного машино- и судостроения».

Проведем оценку потенциала данного проекта экосистемы. Экспертным путем установлено, что проект находится на стадии ЖЦ «Новая жизнь».

Для оценки потенциала проекта используются следующие количественные показатели: проработанность идеи (P1), финансовый потенциал (P3), интеллектуальность (P4), представленные в табл. 6. В свою очередь к качественным показателям относятся креативность (P2) и технологический потенциал (P5). Результаты расчетов количественных показателей потенциала проекта представлены в табл. 7, 8. Результаты расчета качественных показателей с использованием формул (6)–(8) представлены в табл. 8.

Таблица 6

Оценка проекта по разработке технологий цифрового производства для промышленного машино- и судостроения

Показатели	Этапы ЖЦ проекта					
	Предчувствие	Рождение	Взросление	Взрослая жизнь	Передача опыта	Новая жизнь
Результаты интеллектуальной деятельности, ед.	2	4	7	8	9	8
Темп прироста добавленной стоимости, %	4	11	12	14	18	17
Денежный поток от интеллектуальной деятельности, млн руб.	–148	164	215	254	271	265

Для перевода количественного значения результатов интеллектуальной деятельности в баллы по безразмерной десятибалльной шкале применена функция желательности Харрингтона ($d = 0,8$).

Затем были рассчитаны кодированные значения контрольных точек (y_{ij}) и кодированное значение искомого параметра:

$$y'(1) = -\ln \ln(1 / 0,37) = 0,00576,$$

$$y'(10) = -\ln \ln(1 / 0,8) = 1,4999.$$

Уравнение $y' = ay + b$ выступает в качестве механизма перевода y в y' .

Окончательно уравнение примет вид $y' = 0,16576y - 0,16025$.

Таблица 7

Интерпретация стандартных отметок на шкале Харрингтона

Этапы жизненного цикла проекта	Результаты интеллектуальной деятельности		Темп прироста добавленной стоимости		Денежный поток от интеллектуальной деятельности		Обобщенная функция желательности Харрингтона (D)
	y_{ij}	d_1	y_{ij}	d_2	y_{ij}	d_3	
Новая жизнь	1,486	0,797	1,251	0,751	1,331	0,768	0,77

Таблица 8

Определение потенциала проекта на стадии ЖЦ «Новая жизнь»

Потенциал проекта	Тип показателей	y_{ij}	d_1	Значение параметров потенциала проекта
P_1	Количественный	1,251	0,751	0,94
P_2	Качественный	1,120	0,527	0,59
P_3	Количественный	1,486	0,797	1,18
P_4	Количественный	1,331	0,768	1,02
P_5	Качественный	1,223	0,662	0,81

Аналогичным образом выполнена оценка параметра «Темп прироста добавленной стоимости». Окончательное уравнение примет вид $y' = 8,3y - 0,16024$.

Для параметра «денежный поток от интеллектуальной деятельности» было задано минимальное значение 0, а максимальное 300 млн руб. Окончательно уравнение примет вид $y' = 0,005y + 0,00576$.

Итоговая средняя оценка по трем параметрам рассчитывается по формуле (8).

Таким образом, в результате проведенных расчетов по проекту «Разработка технологий цифрового производства для промышленного машино- и судостроения», находящегося на стадии жизненного цикла «Новая жизнь», установлено, что итоговый потенциал составил $P_{\text{пл}} = 0,91$. По шкале Харрингтона проект относится к категории «очень хорошо», следовательно, со стороны актора не требуются корректирующие действия по отношению к данному проекту.

Выводы

В сегодняшних условиях появляется возможность проектирования экосистем в различных сферах и отраслях экономики. Крайне важным аспектом, который следует учитывать при их проектировании, является формирование оптимального портфеля инновационных проектов, каждый из которых делает предприятия более конкурентоспособными на внутреннем и мировом рынках. В данной статье представлен новый подход к оценке эффективности промышленных экосистем, разработанный с использованием теории нечетких множеств, позволяющий учитывать особенности этапов жизненного цикла отдельных инновационных проектов экосистемы. Использование концепции жизненного цикла при проектировании экосистем позволяет выстраивать эффективные стратегии на каждой стадии развития с учетом свойственных данной стадии проблем, поставленных целей и с задействованием всех имеющихся в распоряжении ресурсов.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ № 20-010-00470, № 18-010-00204.

Библиографический список

1. Аганбегян, А. Г. Инвестиции в основной капитал и вложения в человеческий капитал – два взаимосвязанных источника социально-экономического роста / А. Г. Аганбегян // Проблемы прогнозирования. – 2017. – № 4. – С. 17–20.

2. Чернецов, В. И. Модернизация экономики как императив инновационного развития России / В. И. Чернецов, Л. А. Гамидуллаева // Экономика и управление. – 2014. – № 1 (99). – С. 45–52.
3. Гамидуллаева, Л. А. Институты в развитии инновационных систем / Л. А. Гамидуллаева // Journal of Economic Regulation. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 93–103.
4. Гамидуллаева, Л. А. Формирование базовой модели инновационной системы: проблемы и решения / Л. А. Гамидуллаева // Экономическое возрождение России. – 2015. – № 3 (45). – С. 161–163.
5. Vasin, S. M. Increasing the efficiency of state institutional aid to small innovative enterprises / S. M. Vasin, L. A. Gamidullaeva // Review of European Studies. – 2015. – Т. 7, № 11. – С. 77–88.
6. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – Москва : Эксмо, 2016. – 138 с. – URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2020/01/14/820569-davosskii-forum-manifest-biznesa>
7. Карпинская, В. А. Экосистема как единица экономического анализа / В. А. Карпинская // Системные проблемы отечественной мезоэкономики, микроэкономики, экономики предприятий : материалы Второй конференции Отделения моделирования производственных объектов и комплексов ЦЭМИ РАН (Москва, 12 января 2018 г.). – Москва : ЦЭМИ РАН, 2018. – Вып. 2. – С. 125–141.
8. Moore, J. F. Predators and prey – A new ecology of competition / J. F. Moore // Harvard Business Review. – 1993. – Vol. 71 (3). – P. 75–86.
9. Smith, T. M. Elements of ecology / T. M. Smith, R. L. Smith. – Essex : Pearson Publishers, 2015.
10. Acs, Z. J. National systems of entrepreneurship / Z. J. Acs, D. B. Audretsch, E. E. Lehmann, G. Licht // Small Business Economics. – 2016. – Vol. 46 (4). – P. 527–535.
11. Adner, R. Match your innovation strategy to your innovation ecosystem / R. Adner // Harv. Bus. Rev. – 2006. – Vol. 84 (4). – P. 98–107.
12. Sussan, F. The digital entrepreneurial ecosystem / F. Sussan, Z. J. Acs // Small Business Economics. – 2017. – Vol. 49 (1). – P. 55–73.
13. Hayter, C. S. A trajectory of early-stage spinoff success: The role of knowledge integration within an entrepreneurial university ecosystem / C. S. Hayter // Small Business Economics. – 2017. – Vol. 47 (3). – P. 633–656.
14. Meoli, M. The governance of universities and the establishment of academic spinoff / M. Meoli, S. Paleari, S. Vismara // Small Business Economics. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9956-5>
15. Cumming, D. Governance in entrepreneurial ecosystems: venture capitalists versus technology parks / D. Cumming, J. C. Wert, Y. Zhang // Small Business Economics. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9955-6>
16. Ghio, N. The creation of high-tech ventures in entrepreneurial ecosystems: Exploring the interactions among university knowledge, cooperative banks and individual attitudes / N. Ghio, M. Guerini, C. Lamastra-Rossi // Small Business Economics. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9958-3>
17. Lundvall, B.-A. National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning / B.-A. Lundvall. – London : Frances Pinter, 1992.
18. Nelson, R. National Innovation Systems: A Comparative Analysis / R. Nelson. – Oxford : University Press, 1993.
19. Freeman, C. The National System of Innovation in Historical Perspective / C. Freeman // Cambridge Journal of Economics. – 1995. – Vol. 19. – P. 5–24.
20. Смородинская, Н. В. Сетевые инновационные экосистемы и их роль в динамизации экономического роста / Н. В. Смородинская // Инновации. – 2014. – № 7 (189). – С. 27–33.
21. Ashton, W. S. The Structure, Function and Evolution of a Regional Industrial Ecosystem / W. S. Ashton // Journal of Industrial Ecology. – 2009. – Vol. 13. – P. 228–246. – DOI 10.1111/j.1530-9290.2009.00111.x

22. Korhonen, J. Four ecosystem principles for an industrial ecosystem / J. Korhonen // *Journal of Cleaner Production*. – 2001. – Vol 9, № 3.
23. Попов, Е. В. Структура промышленных «экосистем» в цифровой экономике / Е. В. Попов, В. Л. Симонова, А. Д. Тихонова // *Менеджмент в России и за рубежом*. – 2019. – № 4. – С. 3–11.
24. Frosch, R. A. Strategies for Manufacturing / R. A. Frosch, N. E. Gallopoulos // *Scientific American*. – 1989. – Vol. 261. – P. 144–152. – URL: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
25. Фияксель, Э. А. Исследование конкурсов инновационных проектов как базовых структурных элементов инновационной экосистемы / Э. А. Фияксель, Д. В. Сидоров, В. В. Разина // *Инновации*. – 2017. – № 3 (221). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-konkursov-innovatsionnyh-proektov-kak-bazovyh-strukturnyh-elementov-innovatsionnoy-ekosistemy> (дата обращения: 24.04.2020).
26. Пospelов, Д. С. «Серые» и/или «черно-белые» [шкалы] / Д. С. Пospelов // *Прикладная эргономика. Специальный выпуск «Рефлексивные процессы»*. – 1994. – № 1. – С. 29–33.
27. Шуршикова, Г. В. Методика комплексной оценки уровня безопасности сельскохозяйственной продукции (на примере зерна пшеницы) / Г. В. Шуршикова, Н. М. Дерканосова, В. И. Котарев, Н. И. Золотарева // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. – 2015. – Вып. 2 (31). – С. 92–100.
28. Пуряев, А. С. Математический аппарат компромиссной оценки эффективности инвестиционных проектов / А. С. Пуряев // *Вестник Инжэкона. Серия: Экономика*. – 2009. – № 6. – С. 196–200.

References

1. Aganbegyan A. G. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of forecasting]. 2017, no. 4, pp. 17–20. [In Russian]
2. Chernetsov V. I., Gamidullaeva L. A. *Ekonomika i upravlenie* [Economics and management]. 2014, no. 1 (99), pp. 45–52. [In Russian]
3. Gamidullaeva L. A. *Journal of Economic Regulation*. 2016, vol. 7, no. 1, pp. 93–103.
4. Gamidullaeva L. A. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii* [Economic revival of Russia]. 2015, no. 3 (45), pp. 161–163. [In Russian]
5. Vasin S. M., Gamidullaeva L. A. *Review of European Studies*. 2015, vol. 7, no. 11, pp. 77–88.
6. Shvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* [Fourth industrial revolution]. Moscow: Eksmo, 2016, 138 p. Available at: <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2020/01/14/820569-davoskii-forum-manifest-biznesa> [In Russian]
7. Karpinskaya V. A. *Sistemnye problemy otechestvennoy mezoekonomiki, mikroekonomiki, ekonomiki predpriyatiy: materialy Vtoroy konferentsii Otdeleniya mode-lirovaniya proizvodstvennykh ob"ektov i kompleksov TsEMI RAN (Moskva, 12 yanvarya 2018 g.)* [System problems of domestic macroeconomics, microeconomics, and enterprise Economics: proceedings of the Second conference of the Department of modeling of production facilities and complexes of CEMI RAS (Moscow, January 12, 2018)]. Moscow: TsEMI RAN, 2018, iss. 2, pp. 125–141. [In Russian]
8. Moore J. F. *Harvard Business Review*. 1993, vol. 71 (3), pp. 75–86.
9. Smith T. M., Smith R. L. *Elements of ecology*. Essex: Pearson Publishers, 2015.
10. Acs Z. J., Audretsch D. B., Lehmann E. E., Licht G. *Small Business Economics*. 2016, vol. 46 (4), pp. 527–535.
11. Adner R. *Harv. Bus. Rev.* 2006, vol. 84 (4), pp. 98–107.
12. Sussan F., Acs Z. J. *Small Business Economics*. 2017, vol. 49 (1), pp. 55–73.
13. Hayter C. S. *Small Business Economics*. 2017, vol. 47 (3), pp. 633–656.
14. Meoli M., Paleari S., Vismara S. *Small Business Economics*. 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9956-5>

15. Cumming D., Wert J. C., Zhang Y. *Small Business Economics*. 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9955-6>
16. Ghio N., Guerini M., Lamastra-Rossi C. *Small Business Economics*. 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11187-017-9958-3>
17. Lundvall V.-A. *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*. London: Frances Pinter, 1992.
18. Nelson R. *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*. Oxford: University Press, 1993.
19. Freeman C. *Cambridge Journal of Economics*. 1995, vol. 19, pp. 5–24.
20. Smorodinskaya N. V. *Innovatsii* [Innovations]. 2014, no. 7 (189), pp. 27–33. [In Russian]
21. Ashton W. S. *Journal of Industrial Ecology*. 2009, vol. 13, pp. 228–246. DOI 10.1111/j.1530-9290.2009.00111.x
22. Korhonen J. *Journal of Cleaner Production*. 2001, vol. 9, no. 3.
23. Popov E. V., Simonova V. L., Tikhonova A. D. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom* [Management in Russia and abroad]. 2019, no. 4, pp. 3–11. [In Russian]
24. Frosch R. A., Gallopoulos N. E. *Scientific American*. 1989, vol. 261, pp. 144–152. Available at: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
25. Fiyaksel' E. A., Sidorov D. V., Razina V. V. *Innovatsii* [Innovations]. 2017, no. 3 (221). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-konkursovo-innovatsionnyh-proektov-kak-bazovyh-strukturnyh-elementov-innovatsionnoy-ekosistemy> (accessed Apr. 24, 2020). [In Russian]
26. Pospelov D. S. *Prikladnaya ergonomika. Spetsial'nyy vypusk «Refleksivnye protsessy»* [Applied ergonomics. Special issue "Reflexive processes"]. 1994, no. 1, pp. 29–33. [In Russian]
27. Shurshikova G. V., Derkanosova N. M., Kotarev V. I., Zolotareva N. I. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov* [Technology and commodity science of innovative food products]. 2015, iss. 2 (31), pp. 92–100. [In Russian]
28. Puryaev A. S. *Vestnik Inzhekon. Seriya: Ekonomika* [Bacon's Bulletin. Series: Economics]. 2009, no. 6, pp. 196–200. [In Russian]

Толстых Татьяна Олеговна

доктор экономических наук, профессор,
кафедра промышленного менеджмента,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
институт ЭУПП
(Россия, г. Москва,
Ленинский проспект, 4)
E-mail: tt400@mail.ru

Tolstykh Tatyana Olegovna

doctor of economical sciences, professor,
sub-department of industrial management,
National University of Science
and Technology "MISIS",
Institute of Economics
and Industrial Management
(4 Leninskiy prospect, Moscow, Russia)

Гамидуллаева Лейла Айваровна

доктор экономических наук, профессор,
кафедра менеджмента и экономической
безопасности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
заведующий кафедрой прикладной
и бизнес-информатики,
Московский государственный
университет технологий и управления
имени К. Г. Разумовского (ПКУ)
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: gamidullaeva@gmail.com

Gamidullaeva Leyla Ayvarovna

doctor of economical sciences, professor,
sub-department of management
and economic security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
head of sub-department of applied
and business informatics,
K.G. Razumovsky Moscow State
University of technologies
and management (FCU)
(6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Шмелева Надежда Васильевна

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра экономики,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
институт ЭУПП
(Россия, г. Москва,
Ленинский проспект, 4)
E-mail: nshmeleva@misis.ru

Shmeleva Nadezhda Vasilievna

candidate of economical sciences,
associate professor,
sub-department of economics,
National University of Science
and Technology “MISIS”,
Institute of Economics
and Industrial Management
(4 Leninskiy prospect, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Толстых, Т. О. Методические аспекты формирования портфеля проектов в инновационной экосистеме / Т. О. Толстых, Л. А. Гамидуллаева, Н. В. Шмелева // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 5–23. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-1.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАЛОГОВОГО МОНИТОРИНГА В РОССИИ

Е. А. Бадеева, А. А. Машкина, А. Н. Нагаева

MODERN TRENDS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF TAX MONITORING IN RUSSIA

E. A. Badeeva, A. A. Mashkina, A. N. Nagaeva

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Стремительное развитие технологий и автоматизация многих процессов в настоящее время требуют от налоговой службы принципиально новых форм и методов налогового мониторинга, предполагающих информационное взаимодействие организаций с ФНС России в электронном формате. Предметом исследования являются проблемы модификации отношений налоговых органов и налогоплательщиков с использованием налогового мониторинга. Целью работы является оценка эффективности внедрения налогового мониторинга на текущем этапе и перспектив дальнейшего его использования. *Методы.* В процессе исследования использовались методы анализа и синтеза, сравнения и обобщения информации. *Результаты и выводы.* Рассмотрены современные тенденции применения налогового мониторинга, преимущества данной системы, а также трудности, возникающие при ее внедрении, и перспективы развития данного вида контроля в России. Горизонтальный мониторинг сводит к минимуму количество нарушений налогового законодательства, повышает качество деятельности налоговых органов по осуществлению налогового контроля.

Ключевые слова: налоги, налогообложение, налоговый контроль, налоговое администрирование, налоговый мониторинг.

Abstract. *Subject and goals.* The rapid development of technologies and automation of many processes currently require the tax service to introduce fundamentally new forms and methods of tax monitoring that involve information interaction between organizations and the Federal tax service of Russia in an electronic format. The subject of the study is the problem of modifying the relations between tax authorities and taxpayers using tax monitoring. The purpose of this work is to assess the effectiveness of tax monitoring implementation at the current stage and the prospects for its further use. *Methods.* In the process of research, methods of analysis and synthesis, comparison and generalization of information were used. *Results and conclusions.* Current trends in the use of tax monitoring, the advantages of this system, as well as the difficulties encountered in its implementation, and the prospects for the development of this type of control in Russia are considered. Horizontal monitoring minimizes the number of violations of tax legislation and improves the quality of tax authorities' tax control activities.

Keywords: taxes, taxation, tax control, tax administration, tax monitoring.

Введение

Налоги, являясь одной из составляющих экономики любого государства, служат не только источником доходов госбюджета, но и регулятором экономических процессов, протекающих в стране. Условием успешного функционирования финансовой системы и модернизации экономики страны является организация налогового контроля как государственной финансовой

подсистемы управления денежными фондами [1–5]. Налоговая система государства на основе процедур налогового администрирования, обуславливающих баланс интересов и синергетический эффект от взаимовыгодной модели отношений «налоговый орган – добросовестный налогоплательщик», позволяет обеспечивать конкурентоспособность хозяйствующих субъектов в борьбе на мировом рынке за привлечение зарубежного финансового капитала и инвестиций. Поэтому в кризисных условиях нехватки зарубежных инвестиций отечественная система налогового контроля должна двигаться по пути совершенствования на основе применения инструментов построения доверительных, открытых отношений между хозяйствующими субъектами и государством с использованием современных информационных технологий. Одним из таких современных прорывных новых форм налогового контроля в Российской Федерации стал налоговый мониторинг [1–5].

Материал и методика

Основной целью деятельности налоговых органов является получение максимально возможных положительных и финансовых результатов деятельности при минимизации затрат и ресурсов, а применение горизонтального мониторинга обеспечит создание эффективной бюджетной системы налогового администрирования. Горизонтальный мониторинг необходим для расширения границ взаимодействия с налогоплательщиками на основании реализации налоговым органом процедур по отслеживанию и анализу налоговых рисков финансово-хозяйственных операций, осуществляемых и планируемых хозяйствующими субъектами [1–5].

Цель налогового мониторинга – укрепление сотрудничества и партнерских отношений между субъектами налогового законодательства – налоговыми органами и налогоплательщиками для обеспечения законного соблюдения законодательства о налогах и сборах в Российской Федерации. Горизонтальный мониторинг меняет методику налогового контроля, что смягчает обязательства налогоплательщика перед государством.

Процедура расширенного информационного взаимодействия (горизонтальный мониторинг) успешно функционирует во многих странах мира и имеет свои особенности [6–11]. Впервые данный вид контроля по построению отношений на основе принципов взаимного сотрудничества между государством и налогоплательщиками внедрила Нидерландская налоговая служба [8]. На сегодняшний момент в Нидерландах реализуются следующие формы взаимодействия с государственными органами в рамках горизонтального налогового мониторинга: а) сотрудничество на основе индивидуальных соглашений с крупными компаниями и организациями, принадлежащими среднему бизнесу; б) сотрудничество при участии налоговых консультантов и аудиторов с малым бизнесом [8].

Во Франции, например, налоговый орган обязан по заявлению физического или юридического лица выдать предварительное заключение о последствиях той или иной сделки. В Англии работники экономических отделов организаций обязаны сообщать налоговой службе о любом изменении в схемах ведения бизнеса. В Австралии налоговая служба, реализуя систему данного вида контроля, ежегодно проводит процесс оценки адекватности системы налогового администрирования, публикуя «Программу оценки налоговой дисциплины» [11].

Налоговые органы в Голландии в обеспечение снижения затрат на налоговое администрирование концентрированно проверяют результаты работы внутреннего контроля экономического субъекта на соответствие соблюдения налогового законодательства при совершении сделок и операций. В Бельгии действует процедура предварительного согласования, имеющая юридическое действие, с государственными органами по электронной почте по разъяснению применения законодательства по той или иной планируемой операции [11].

Несмотря на специфику в отдельных вопросах, суть процедур остается прежней – это взаимодействие в режиме реального времени по электронным каналам связи в целях дальнейшего предотвращения налоговых споров. При проведении горизонтального налогового контроля особое место уделяется предварительным разъяснениям налоговых органов по частным вопросам конкретных налогоплательщиков и публичные решения по сложным и высокорисковым сделкам.

В США до подачи налоговой отчетности налогоплательщики могут запросить разъяснения налогового органа по частным вопросам или резолюцию, например по отраслевым вопросам, охватывающим нескольких хозяйствующих субъектов [11]. Порядок применения данных разъяснений – это один из существенных элементов в концепции партнерского взаимодействия «налоговые органы – налогоплательщик». В таких странах, как Швеция, Нидерланды, Финляндия применение данного акта-разъяснения обязательно для налоговых органов. В США вид решения определяет способы разрешения налоговых споров. Со стороны налогоплательщиков обязательными являются такие акты, как «Письмо-указание» («Letterruling»), «Окончательное соглашение» («Closingagreement»), разъясняющие уже имеющиеся прецеденты и существующие принципы налогообложения, «Письмо-разъяснение» («Determinationletter»), «Информационное письмо» («Informationletter»), носящие информационный характер к определенным вопросам [12].

В ряде стран механизм налогового мониторинга распространяется на группы налогоплательщиков, например в США он характерен для крупных и средних экономических субъектов, малого бизнеса, госкорпораций и учреждений [11]. Особая роль в механизме налогового мониторинга отводится налоговому консультированию. В таких европейских государствах, как Чехия, Польша, Румыния, страны Прибалтики, Сербия функционируют профессиональные сообщества налоговых консультантов, входящие в единую конфедерацию. В Австралии на 18 млн населения приходится 18 тыс. работников налоговой службы и 21 тыс. налоговых консультантов. В Германии, Франции, Соединенных Штатах Америки, Австрии, Англии имеет место быть соотношение «налоговый инспектор – налоговый консультант» приблизительно в долях 10/11 [13–15].

Институт же налогового консультирования Российской Федерации до сих пор не имеет законодательного урегулирования, несмотря на то, что впервые начал формироваться в нашей стране еще в 2001 г. В нашем государстве на 140 тыс. работников налоговой службы приходится 5 тыс. налоговых консультантов, осуществляющих свои услуги, и в этот состав не включаются сотрудники самих экономических субъектов, что говорит о нехватке в России данных специалистов, и их должно быть преимущественно более 150 тыс. [13–15].

Обсуждение и результаты

Эффективный механизм взаимодействия субъектов хозяйствования и государственных налоговых служб в вопросах обсуждения и решения проблем соблюдения налогового законодательства и качества налогового администрирования зарубежных государств переняли налоговые органы России. Начало подобных взаимоотношений было положено в 2012 г., когда в рамках пилотного проекта между ФНС России и четырьмя крупными налогоплательщиками были подписаны двухсторонние соглашения по горизонтальному мониторингу: энергетические холдинги ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС» и «Русгидро», ОАО «МТС» (Мобильные ТелеСистемы), ведущая компания по предоставлению услуг связи и доступа в Интернет, частная компания с ограниченной ответственностью «Эрнст энд Янг (СНГ) Б.В.» [16]. Российская система налогового мониторинга создана на основе требований Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), стандартов в риск-менеджменте и ИСО 31000.

В 2015 г. первая часть Налогового кодекса РФ была дополнена новым разделом V.2, посвященным основам и порядку проведения новой формы налогового контроля – налоговому мониторингу. На данный момент режим налогового мониторинга доступен только для крупных хозяйствующих субъектов, соответствующих определенным критериям (рис. 1) [17].

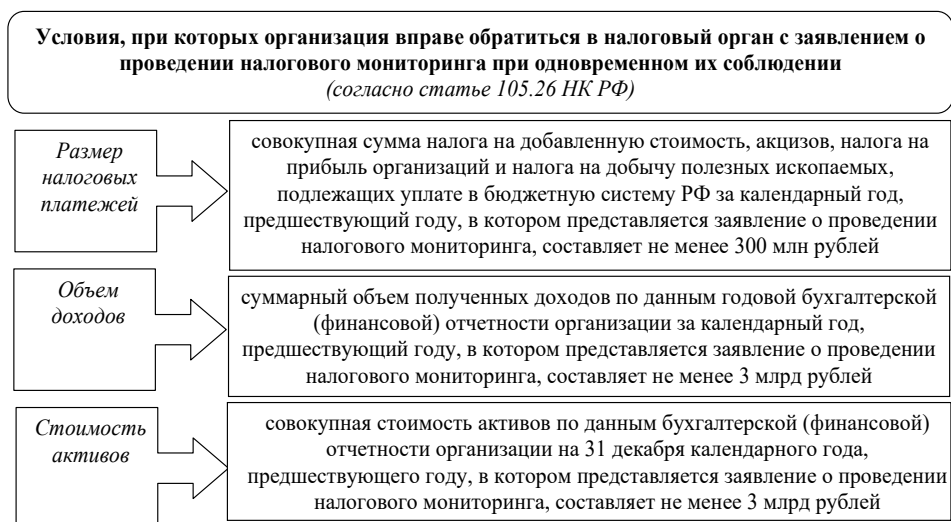


Рис. 1. Условия применения налогового мониторинга

В России данным условиям отвечают примерно 1905 российских компаний, и 687 из них готовы к такому переходу, а также около 70 % российских организаций заинтересованы в применении данной формы взаимовыгодного взаимодействия с налоговой службой, что показало исследование, проведенное Deloitte – международной консалтинговой компанией [18–21]. Количество организаций, присоединившихся к данной системе, неуклонно растет, о чем свидетельствует диаграмма на рис. 2.

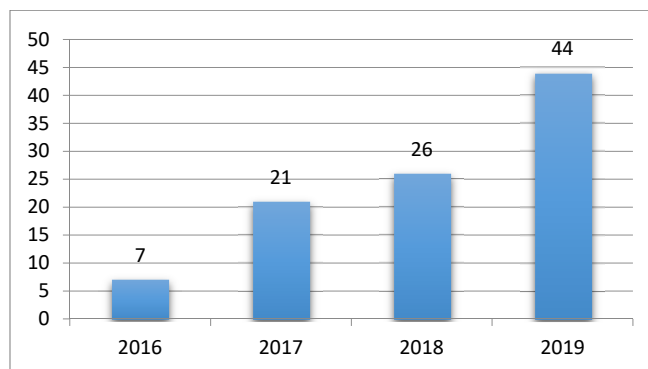


Рис. 2. Динамика количества организаций, применяющих новую форму налогового контроля – налоговый мониторинг

Если в 2016 г. налоговый мониторинг проводился в отношении только 7 фирм, то к 2019 г. в программе было задействовано 44 компании из различных секторов экономики, включая нефтегазовую, металлургическую и горнодобывающую промышленность, банки и торговлю товарами и услугами [22]. В России доступны три способа информационного взаимодействия налоговой службы с налогоплательщиками (рис. 3) [20].

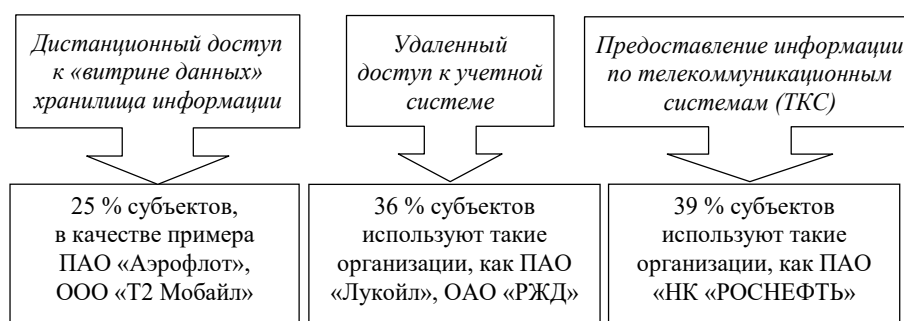


Рис. 3. Способы информационного взаимодействия

Значительное преимущество налогового мониторинга над другими видами налогового контроля заключается в решении спорных моментов между налогоплательщиком и налоговой службой открыто и своевременно (рис. 4). Электронный формат обмена документами позволяет фискальному органу оперативно запрашивать нужную информацию, а также осуществлять проверку налоговой отчетности, регистров налогового учета и другой документации, что, в свою очередь, снижает налоговые риски плательщиков.

Ранее возникшие спорные ситуации выявлялись и разрешались только непосредственно при проведении налоговых проверок, что вызывало существенные затраты трудовых и финансовых ресурсов, а порой налоговые споры длились годами. Применение данной системы гарантирует высокую степень прозрачности всех фактов хозяйственной деятельности организации, что приводит к повышению ее уровня инвестиционной привлекательности.

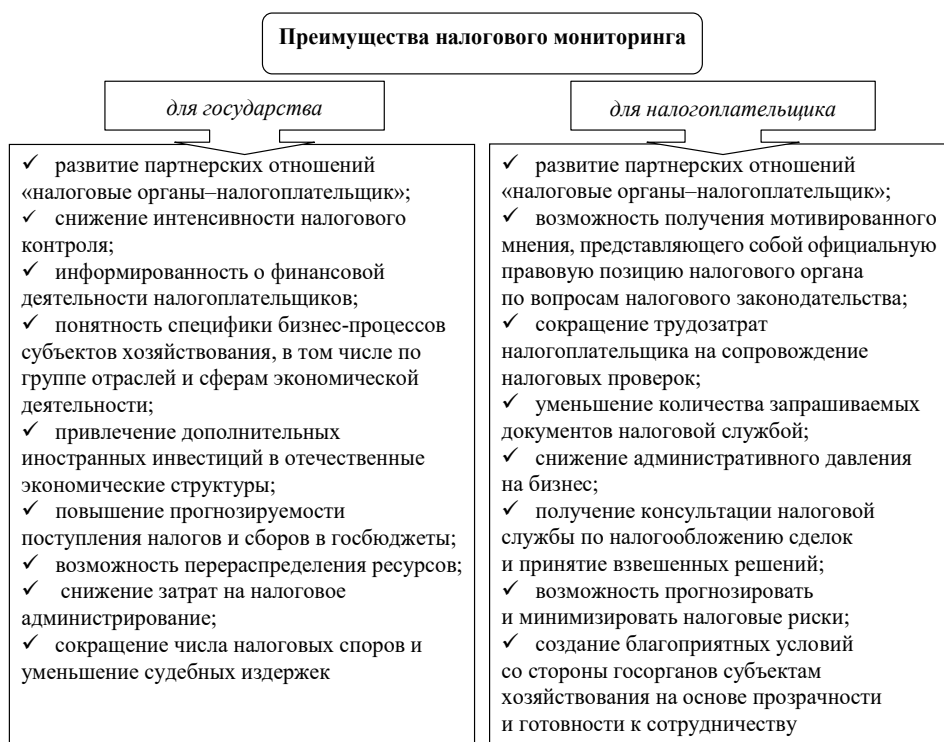


Рис. 4. Преимущества налогового мониторинга

Важным преимуществом применения налогового мониторинга на добровольных началах является возможность запросить у ФНС России мотивированное мнение на этапе планирования или заключения сделок и/или договоров, когда возникают затруднения относительно правильности исчисления налогов и сборов. В большинстве случаев запросы мотивированных мнений связаны с налогообложением прибыли организаций и правомерности признания расходов для целей налогообложения.

Анализ выпущенных мотивированных мнений демонстрирует тот факт, что организации направляют запросы лишь в отношении вопросов, имеющих решающее значение для операций или сделок, которые обладают высокой стоимостью. Это позволяет организациям глубоко проработать свою позицию по спорным вопросам, а налоговый орган получает возможность тщательно изучить аргументы налогоплательщика. Налоговая служба не может адресовать организациям мотивированное мнение по вопросам, связанным с осуществлением контроля соответствия цен, примененных организацией в контролируемых сделках, рыночным ценам.

Что касается случая несогласия с мотивированным мнением налогового органа, то в целом российская практика соответствует международной. Для инициирования проведения взаимосогласительной процедуры соответствующие материалы, включающие предоставленные налогоплательщиком в налоговый орган разногласия, направляются в центральный аппарат ФНС России. По окончании процедуры налогоплательщику приходит уведомление из центрального аппарата ФНС России или об оставлении мотивированного мнения без изменения или об его изменении.

Взаимосогласительные процедуры со стороны налогового органа в настоящее время осуществляются на уровне центрального аппарата, т.е. руководителем (заместителем руководителя) ФНС России, поскольку предполагается, что это практически исключает возможность какого-либо коррупционного проявления. Тем не менее расширение сферы налогового мониторинга непременно вызовет изменения как методические, так и организационные.

Успешность от внедрения налогового мониторинга можно оценить на примере ПАО «Аэрофлот», которое стало первопроходцем среди транспортной отрасли в России в применении данной системы [20]. На базе решений SAP в организации была создана необходимая гибкая адаптивная система, позволяющая налоговым органам получать данные системы внутреннего контроля авиакомпании, информацию по налоговой и бухгалтерской отчетности в формате онлайн-доступа. В итоге по результатам первого полугодия 2018 г. организация сократила на 7 % расходы на налоговое администрирование, более чем в 5 раз уменьшилось количество представленных бумажных документов [20].

Целью ФНС России является привлечение к модели отношений «налоговый орган – добросовестный налогоплательщик» организаций, обеспечивающих до 30 % поступлений федерального бюджета. С 2020 г. налоговый мониторинг проводится уже в отношении 95 организаций, к которым присоединятся представители черной и цветной металлургии: АО «Кольская ГМК» (группа «Норильский никель»), АО «Оленегорский ГОК» (группа «Северсталь»), АО «Лебединский ГОК» (группа «Металлоинвест»), АО «РУСАЛ Новокузнецк» (группа «РУСАЛ»); представители других сфер экономической деятельности: Сбербанк, Росатом, Ростелеком, Россети, Федеральная Сетевая Компания, РусГидро, аэропорт «Шереметьево», Федеральная пассажирская компания, Федеральная грузовая компания, Совкомфлот, СКФ «Шельф», ВТБ лизинг, Дом.РФ и Банк Дом.РФ и др. [21–26].

Большинство перечисленных организаций – это акционерные общества с госучастием и их дочерние подразделения, включенные в специальный перечень, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 января 2003 г. № 91-р., которым на 2021–2025 гг. необходимо разработать и согласовать с ФНС России «дорожную карту» в рамках реализации нового вида контроля [21–26].

Внедрение налогового мониторинга в современную российскую практику является одним из доказательств растущей тенденции выстраивания партнерских отношений налоговых органов с налогоплательщиками с использованием новых контрольных технологий. И хотя преимущества от внедрения налогового мониторинга очевидны, в процессе реализации программы выявляются и трудности:

- данный вид контроля носит весьма ограниченный характер в соответствии с требованиями, прописанными в НК РФ;
- отсутствуют единые требования к сертификации систем налогового мониторинга и стандартизированный подход к витрине данных;
- требуется законодательное прописание взаимосогласительных процедур мониторинга;

- законодательно не предусмотрено досрочное прекращение данного мониторинга по инициативе налогоплательщика;
- у большинства хозяйствующих субъектов нет необходимого уровня автоматизации;
- присутствует недоверие со стороны налогоплательщиков из-за исключительно фискального характера мотивированных мнений налоговых органов;
- существует опасность раскрытия данных налогоплательщиков.

Во многих странах налоговый мониторинг активно применяют не только в отношении корпораций, но и в отношении представителей малого бизнеса, в России данная норма в налоговом законодательстве не предусмотрена, т.е. сфера его действия ограничена. Серьезным препятствием во внедрении данного вида контроля для бизнеса становится отсутствие единых требований к сертификации систем налогового мониторинга. По этому вопросу проводятся активные обсуждения, но к каким-либо результатам они пока не привели [19].

Выводы

Система налогового контроля была запущена с целью предупреждения налоговых правонарушений. На сегодняшний день она дает налоговым органам возможность отслеживать полноту и своевременность уплаты налогов, сборов и страховых взносов организациями. Целью налогового мониторинга как вида налогового контроля является снижение количества налоговых правонарушений. В то же время он должен способствовать росту эффективности работы самой налоговой службы, что создает идеальную систему налогообложения и снижает затраты и ресурсы на проведение мероприятий налогового контроля.

С целью дальнейшего совершенствования контрольной деятельности налоговых органов Российской Федерации необходима проработка механизма горизонтального налогового мониторинга, в том числе на законодательном уровне, по следующим элементам:

- обеспечение удостоверения качества данной системы контроля, обеспечение гарантии ее информационной безопасности, повышение экономической эффективности ее применения и защита прав хозяйствующих субъектов на основе полной сертификации налогового мониторинга;
- расширение списка участников налогового мониторинга;
- применение метода альтернативного разрешения налоговых процедур с использованием беспристрастного подхода при оценке деятельности экономических субъектов со стороны контролирующих органов для развития доверительных отношений с бизнес-структурами;
- смягчение требований к организациям, претендующим на право участия в налоговом мониторинге, в том числе по объемам исчисленных налоговых платежей;
- урегулирование порядка истребования документов через информационные системы налогоплательщиков;
- исключение камеральных налоговых проверок для организаций-участников горизонтального налогового мониторинга, возмещающих НДС и акцизы из бюджета;

– развитие так называемого «дружелюбного метода работы» налоговых органов с налогоплательщиками – механизм и правовой институт государственного налогового консультирования в налоговой службе для защиты интересов добросовестных плательщиков налогов и сборов;

– налогоплательщики должны обеспечивать прозрачность своих бизнес-процессов видов деятельности, планомерно адаптироваться к использованию международных стандартов отчетности, а также стремиться повышать качество системы внутреннего контроля.

Заключение

Несмотря на существование ряда трудностей, налоговый мониторинг как одна из форм налогового контроля продолжает активно развиваться и внедряться в России, что, в свою очередь, является серьезным шагом на пути совершенствования налоговой системы страны, уменьшает издержки на налоговое администрирование и повышает уровень доверия между организациями и фискальным органом. Развитие системы налогового мониторинга позволит налоговым органам уйти от традиционной системы истребования документов и сосредоточиться на проверке рискованных областей. Для дальнейшего развития данного вида налогового контроля требуются формализация и упрощение требований к вступлению в систему со стороны фискального органа. От организаций же требуется увеличение автоматизации процессов и прозрачности данных.

Библиографический список

1. Поролло, Е. В. Налоговый контроль: сущность и место в системе государственного финансового контроля / Е. В. Поролло // *Terra Economicus*. – 2013. – Т. 11, № 3. – Ч. 3. – С. 84–88.
2. Безруков, Г. Г. Сущность налогов и налогового контроля / Г. Г. Безруков, А. В. Козырев // *Journal of new economy*. – 2015. – № 1 (57). – С. 47–52.
3. Кузнецов, Н. Г. Налоговый мониторинг налогоплательщиков – российский опыт и перспективы / Н. Г. Кузнецов, Е. С. Цепилова // *Финансовые исследования*. – 2014. – № 4 (45). – С. 65–72.
4. Барулин, С. В. Содержание и развитие института налогового мониторинга в России / С. В. Барулин, М. С. Минвалиева // *Налоги и финансы*. – 2016. – № 4. – С. 15–23.
5. Демин, А. В. Концепт налогового мониторинга в новой модели налогового администрирования в России / А. В. Демин // *Вестник Сибирского юридического института МВД России*. – 2017. – № 1 (26). – С. 77–85.
6. Van der Hel-Van Dijk, L. Cooperative compliance: tax risk management and monitoring / L. Van der Hel-Van Dijk, M. Sigle // *Intertax*. – 2016. – Vol. 44, № 8. – P. 642–650.
7. Троянская, М. А. Горизонтальный налоговый мониторинг как инструмент совершенствования налогового администрирования / М. А. Троянская // *Азимут научных исследований: экономика и управление*. – 2017. – Том 6, № 3 (20). – С. 347–350.
8. Шамсиева, М. В. Налоговый мониторинг как инструмент совершенствования налогового администрирования и минимизации рисков российских компаний / М. В. Шамсиева // *Вестник Поволжского института управления*. – 2015. – № 1 (46). – С. 109–115.
9. Горина, Г. А. Горизонтальный налоговый мониторинг – международный опыт / Г. А. Горина, Р. Г. Ахмадеев // *Финансы и кредит*. – 2014. – № 38 (614). – С. 26–31.

10. Гнатышина, Е. И. Налоговый мониторинг как инновационный способ контроля / Е. И. Гнатышина, Е. С. Лебедева, Е. О. Никитина // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. – Т. 9, № 5. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/70EVN517.pdf> (дата обращения: 19.12.2019).
11. Литвинова, Ю. М. Налоговый мониторинг: опыт правового регулирования в зарубежных странах / Ю. М. Литвинова // Ленинградский юридический журнал. – 2017. – № 4 (50) – С. 175–181.
12. Налоги и бизнес-климат в России // XI Всероссийский налоговый форум ТПП «Круглый стол» № 5. «Налоги и бизнес-климат в России: найти компромисс». – URL: <http://nalogforum.tpprf.ru/nalog/folder1/> (дата обращения: 15.12.2019).
13. Землянская, И. С. Налоговое консультирование в Российской Федерации: состояние и тенденции развития / И. С. Землянская // Правовая парадигма. – 2018. – Т. 17, № 2. – С. 76–86.
14. Профессия – налоговый консультант. – URL: <http://ecsocman.hse.ru/text/33532049.html> (дата обращения: 25.01.2020).
15. России нужно 150 тысяч налоговых консультантов. – URL: http://rosnou.ru/important/palata_nalog/ (дата обращения: 25.01.2020).
16. Впервые в российской практике подписаны соглашения о расширенном информационном взаимодействии с крупнейшими налогоплательщиками / ФНС России. – URL: <https://www.nalog.ru/rn77/news/archive/4020258/> (дата обращения: 15.12.2019).
17. Налоговый кодекс РФ (часть первая) от 31.07.1998 № 146-ФЗ (ред. от 29.09.2019, с изм. от 31.10.2019) // СПС «КонсультантПлюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19671/ (дата обращения: 18.12.2019).
18. Егоров, Д. В. Цифровизация дает безграничные возможности для совершенствования налогового администрирования / Д. В. Егоров // Материалы форума по налоговому администрированию ОЭСР (FTA) в Сантьяго. – URL: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/8588791/ (дата обращения: 18.12.2019).
19. Подводные камни налогового мониторинга. Интервью с заместителем генерального директора SAP CIS А. Горяиновым // ИА «РЖД-Партнер». – URL: <https://www.rzd-partner.ru/other/interview/podvodnye-kamni-nalogovogo-monitoringa/> (дата обращения: 18.12.2019).
20. Крашенинникова, М. А. Налоговый мониторинг – цифровое будущее налогового контроля / М. А. Крашенинникова // Налоговая политика и практика. – 2018. – № 3. – С. 40–43.
21. Налоговый мониторинг // Сайт ФНС России. – URL: https://www.nalog.ru/rn77/taxation/reference_work/taxmonit/ (дата обращения: 18.12.2019).
22. 44 крупнейшие компании участвуют в налоговом мониторинге с 1 января 2019 года // Сайт ФНС России. – URL: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/6715046/ (дата обращения: 24.12.2019).
23. 48 компаний заявили о переходе на налоговый мониторинг с 2020 года // Сайт ФНС России. – URL: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/8785782/ (дата обращения: 10.01.2020).
24. Крупнейшие металлургические холдинги России вступают в систему налогового мониторинга с 2020 года // Сайт ФНС России. – URL: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/9186231/ (дата обращения: 10.01.2020).
25. О перечне акционерных обществ, в отношении которых определение позиции акционера – РФ осуществляется Правительством РФ, председателем Правительства РФ или по его поручению заместителем председателя Правительства РФ : распоряжение Правительства РФ от 23.01.2003 № 91-р (ред. от 26.10.2019). –

URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_166702/ (дата обращения: 10.01.2020).

26. О создании Экспертного совета при ФНС России по развитию и совершенствованию системы налогового мониторинга : приказ ФНС России ММВ-7-15/585@ от 25.11.2019 // Сайт ФНС России. – URL: https://www.nalog.ru/rn77/about_fts/fts/coordin/esnm/9326870/ (дата обращения: 10.01.2020).

References

1. Porollo E. V. *Terra Economicus*. 2013, vol. 11, no. 3, part 3, pp. 84–88.
2. Bezrukov G. G., Kozyrev A. V. *Journal of new economy*. 2015, no. 1 (57), pp. 47–52.
3. Kuznetsov N. G., Tsepilova E. S. *Finansovye issledovaniya* [Financial study]. 2014, no. 4 (45), pp. 65–72. [In Russian]
4. Barulin S. V., Minvalieva M. S. *Nalogi i finansy* [Taxes and Finance]. 2016, no. 4, pp. 15–23. [In Russian]
5. Demin A. V. *Vestnik Sibirskogo yuridicheskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the Siberian law Institute of the Ministry of internal Affairs of Russia]. 2017, no. 1 (26), pp. 77–85. [In Russian]
6. Van der Hel-Van Dijk L., Sigle M. *Intertax*. 2016, vol. 44, no. 8, pp. 642–650.
7. Troyanskaya M. A. *Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie* [Azimuth of scientific research: Economics and management]. 2017, vol. 6, no. 3 (20), pp. 347–350. [In Russian]
8. Shamsieva M. V. *Vestnik Povolzhskogo instituta upravleniya* [Bulletin of the Volga Institute of Management]. 2015, no. 1 (46), pp. 109–115. [In Russian]
9. Gorina G. A., Akhmadeev R. G. *Finansy i kredit* [Finance and credit]. 2014, no. 38 (614), pp. 26–31. [In Russian]
10. Gnatyshina E. I., Lebedeva E. S., Nikitina E. O. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»* [Internet-journal "SCIENCE of SCIENCE"]. 2017, vol. 9, no. 5. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/70EVN517.pdf> (accessed Dec. 19, 2019). [In Russian]
11. Litvinova Yu. M. *Leningradskiy yuridicheskij zhurnal* [Leningrad law journal]. 2017, no. 4 (50), pp. 175–181. [In Russian]
12. *XI Vserossiyskiy nalogovyy forum TPP «Kruglyy stol» № 5. «Nalogi i biznes-klimat v Rossii: nayti kompromiss»* [XI all-Russian tax forum of the CCI "Round table" 5. "Taxes and the business climate in Russia: find a compromise"]. Available at: <http://nalogforum.tpprf.ru/nalog/folder1/> (accessed Dec. 15, 2019). [In Russian]
13. Zemlyanskaya I. S. *Pravovaya paradigma* [Legal paradigm]. 2018, vol. 17, no. 2, pp. 76–86. [In Russian]
14. *Professiya – nalogovyy konsul'tant* [Profession-tax consultant]. Available at: <http://ecsocman.hse.ru/text/33532049.html> (accessed Jan. 25, 2020). [In Russian]
15. *Rossii nuzhno 150 tysyach nalogovykh konsul'tantov* [Russia needs 150,000 tax consultants]. Available at: http://rosnou.ru/important/palata_nalog/ (accessed Jan. 25, 2020). [In Russian]
16. *Vpervye v rossiyskoy praktike podpisany soglashiya o rasshirennom informatsionnom vzaimodeystvii s krupneyshimi nalogoplatel'shchikami* [For the first time in Russian practice agreements on expanded information interaction with major taxpayers have been signed]. Website of the Federal Tax Service of Russia. Available at: <https://www.nalog.ru/rn77/news/archive/4020258/> (accessed Dec. 15, 2019). [In Russian]
17. *Nalogovyy kodeks RF (chast' pervaya) ot 31.07.1998 № 146-FZ (red. ot 29.09.2019, s izm. ot 31.10.2019)* [The tax code of the Russian Federation (part one) of 31.07.1998 № 146-FZ (as amended on 29.09.2019, Rev. from 31.10.2019)]. «ConsultantPlus». Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19671/ (accessed Dec. 18, 2019). [In Russian]

18. Egorov D. V. *Materialy foruma po nalogovomu administrirovaniyu OESR (FTA) v Sant'yago* [Proceedings of the OECD tax administration forum (FTA) in Santiago]. Available at: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/8588791/ (accessed Dec. 18, 2019). [In Russian]
19. *Podvodnye kamni nalogovogo monitoringa. Interv'yu s zamestitelem general'nogo direktora SAP CIS A. Goryaynovym* [Pitfalls of tax monitoring. Interview with Deputy General Director of SAP CIS A. Goryainov]. IA «RZhd-Partner». Available at: <https://www.rzd-partner.ru/other/interview/podvodnye-kamni-nalogovogo-monitoringa/> (accessed Dec. 18, 2019). [In Russian]
20. Krashenninnikova M. A. *Nalogovaya politika i praktika* [Tax policy and practice]. 2018, no. 3, pp. 40–43. [In Russian]
21. *Nalogovyy monitoring* [Tax monitoring]. Website of the Federal Tax Service of Russia. Available at: https://www.nalog.ru/rn77/taxation/reference_work/taxmonit/ (accessed Dec. 18, 2019). [In Russian]
22. *44 krupneyshie kompanii uchastvuyut v nalogovom monitoringe s 1 yanvarya 2019 goda* [44 largest companies participate in tax monitoring since January 1, 2019]. Website of the Federal Tax Service of Russia. Available at: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/6715046/ (accessed Dec. 24, 2019). [In Russian]
23. *48 kompaniy zayavili o perekhode na nalogovyy monitoring s 2020 goda* [48 companies announced the transition to tax monitoring from 2020]. Website of the Federal Tax Service of Russia. Available at: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/8785782/ (accessed Jan. 10, 2020). [In Russian]
24. *Krupneyshie metallurgicheskie kholdingi Rossii vstupayut v sistemu nalogovogo monitoringa s 2020 goda* [Russia's largest metallurgical holdings will join the tax monitoring system from 2020]. Website of the Federal Tax Service of Russia. Available at: https://www.nalog.ru/rn77/news/activities_fts/9186231/ (accessed Jan. 10, 2020). [In Russian]
25. *O perechne aktsionernykh obshchestv, v otnoshenii kotorykh opredelenie pozitsii aktsionera – RF osushchestvlyayetsya Pravitel'stvom RF, predsedatelem Pravitel'stva RF ili po ego porucheniyu zamestitelem predsedatelya Pravitel'stva RF: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 23.01.2003 № 91-r (red. ot 26.10.2019)* [On the list of joint-stock companies in respect of which the position of a shareholder – RF is determined by the Government of the Russian Federation, the Chairman of the Government of the Russian Federation, or on his behalf by the Deputy Chairman of the Government of the Russian Federation : order of the Government of the Russian Federation of 23.01.2003 No. 91-R (ed. from 26.10.2019).]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_166702/ (accessed Jan. 10, 2020). [In Russian]
26. *O sozdanii Ekspertnogo soveta pri FNS Rossii po razvitiyu i sovershenstvovaniyu sistemy nalogovogo monitoringa: prikaz FNS Rossii MMV-7-15/585@ ot 25.11.2019* [About creation of the Expert Council at the Federal tax service of Russia on development and improvement of the tax monitoring system: order of the Federal tax service of Russia MMV-7-15/585@ of 25.11.2019]. Website of the Federal Tax Service of Russia. Available at: https://www.nalog.ru/rn77/about_fts/fts/coordin/esnm/9326870/ (accessed Jan. 10, 2020). [In Russian]

Бадеева Елена Александровна
 доктор технических наук, профессор,
 кафедры бухгалтерского учета,
 налогообложения и аудита,
 Пензенский государственный
 университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Badeeva Elena Aleksandrovna
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of accounting,
 taxation and auditing,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Машкина Ангелина Алексеевна
студентка,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: goldangel1998@mail.ru

Mashkina Angelina Alekseevna
student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нагаева Алина Николаевна
студентка,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nagaevalina2911@mail.ru

Nagaeva Alina Nikolaevna
student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Бадеева, Е. А. Современные тенденции и перспективы развития налогового мониторинга в России / Е. А. Бадеева, А. А. Машкина, А. Н. Нагаева // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 24–36. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-2.

ЭКОСИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Т. О. Толстых, А. М. Агаева

ECOSYSTEM MODEL OF ENTERPRISE DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION

T. O. Tolstykh, A. M. Agaeva

Аннотация. *Предмет и цель работы.* В связи с быстросменяющимися технологиями создаются новые и модернизируются существующие модели поведения экономических игроков. Традиционные модели бизнеса между участниками рынка постепенно устаревают, и наблюдается тенденция построения отношений с конкурентами в формате партнерских взаимодействий. Данные условия рынка призывают исследователей и акторов (участников рынка) к образованию новых организационных моделей взаимодействия участников на экономическом рынке. *Методы.* Рассматриваются подходы различных исследователей по вопросам целей и сущности инновационных экосистем. Исследование опирается на синергетический принцип изучения экосистемы, а также проводится сравнительный анализ организационных моделей, практикуемых при генерировании и реализации инноваций. *Результаты и выводы.* Предлагается авторская позиция определения экосистемы. Приводится трехуровневая (уровень актора, микро- и макроуровни) структура экосистемы и ее потенциальные риски. Продемонстрирован пример кластера, который постепенно трансформируется в модель экосистемы. Массовая цифровизация крайне важна, но без параллельного развития горизонтальных социальных коммуникаций, без культивирования отношений коллаборации между бизнесом и наукой цифровизация не сможет дать экономике ни новых источников роста, ни повышения ее устойчивости.

Ключевые слова: инновации, цифровые технологии, экосистема, организационные модели, акторы, кластер, структура экосистемы, риски.

Abstract. *Subject and goals.* In connection with rapidly changing technologies, new models of behavior of economic players are being created and modernized. Traditional business models between market participants are gradually becoming outdated and there is a tendency to build relationships with competitors in the format of partnership interactions. These market conditions call for researchers and actors (market participants) to form new organizational models of interaction between participants in the economic market. *Methods.* The approaches of various researchers on the issues of the goals and essence of innovative ecosystems are considered. the research is based on the synergetic principle of studying the ecosystem, as well as a comparative analysis of organizational models used in the generation and implementation of innovations. *Results and conclusions.* The author's position of the ecosystem definition is proposed. The three-level (actor level, micro level, and macro level) structure of the ecosystem and its potential risks are presented. An example of a cluster that is gradually transforming into an ecosystem model is shown. Mass digitalization is extremely important, but without parallel development of horizontal social communications, without cultivating collaborative relationships between business and science, digitalization will not be able to give the economy either new sources of growth or increase its stability.

Keywords: innovation, digital technologies, ecosystem, organizational models, actors, cluster, ecosystem structure, risks.

Введение

В настоящее время мировая экономика переживает процесс глобальной трансформации, связанный с наступлением Промышленной революции 4.0. Революционность преобразований касается буквально всех (экономических, социальных, производственных) процессов, что требует кардинальных преобразований управления ими. Цифровые технологии приводят к тому, что увеличиваются скорости изменений на макро- и микроуровнях, сокращаются жизненные циклы инноваций, стираются отраслевые и территориальные границы. Эти тенденции приводят к необходимости стремительного реагирования на вызовы, изменения управленческой ментальности и управленческих моделей.

Стремительное изменение конкурентных сил на рынке в сторону инновационности, скорости внедрения новых технологий, открытости к изменениям приводит к тому, что превалирующей рыночной стратегией компании любого масштаба становится не стремление завоевать конкурентное лидерство, а сотрудничество, позволяющее обеспечить прорывное развитие как каждому участнику партнерства, так и обществу в целом.

Актуальность данной статьи обусловлена тем, что в настоящее время требуются принципиально новые организационные и управленческие подходы и модели, позволяющие эффективно осуществлять цифровую трансформацию предприятий и организаций, стимулировать их инновационную деятельность, способствовать инициации и реализации проектов по созданию новых технологий, материалов, бизнес-процессов [1, 2].

Понятие биологической экосистемы было предложено Артуром Тенсли в 1935 г., который интерпретировал ее как биосистему, состоящую из совокупности живых организмов, среды их обитания и систем связей, осуществляющих обмен веществ или энергии между ними. Подход к анализу социально-экономических систем, в аналогии с биологическими системами, привлекал многих исследователей. И в настоящее время этот подход стал доминирующим в формировании новых моделей управления инновационными процессами. Действительно, аналогично живым организмам биологических экосистем инновационные экосистемы – это открытые системы, включающие в себя акторов (участников процессов), связанных между собой обменом знаниями, информацией, технологиями, являющимися для данных акторов энергией. Позже Л. Берталанфи описал теорию систем, дав понятие открытой, сложной, самоорганизующейся, саморегулирующейся и саморазвивающейся системы, которой свойственны входящие и исходящие потоки веществ и энергии, что явилось методологическим прорывом в целом ряде исследований [3, 4].

Анализируя определения экосистемы уже с позиции теории систем в экономической научной среде, можно увидеть различные позиции исследователей. Так, Национальный научный фонд NSF при Правительстве США определяет инновационную экосистему как «люди, учреждения, политика и ресурсы, которые способствуют преобразованию новых идей в продукты, процессы и услуги». Российские исследователи также активно занимаются исследованиями в области экосистем. Например, Г. Б. Клейнер [5–8] определяет экосистему как локализованные системы организаций, бизнес-процессов, инновационных проектов и инфраструктурных комплексов, способные функционировать на длительном промежутке времени за счет кругооборота ресурсов и различных продуктов. В другом исследовании А. Ю. Яко-

влева [9] трактует определение инновационной экосистемы как сообщество сетевых участников, выступающее катализатором трансформации, обмена, распространения и эффективного распределения знаний и иных ресурсов.

Обобщая данные понятия, можно сделать вывод, что ключевым фактором инновационной экосистемы является взаимодействие участников инновационного процесса, в ходе которого экономические агенты добиваются общих целей, таких как создание уникального продукта, услуги, проведение реинжиниринга бизнес-процессов, разработки и внедрения новой технологии, проектов и т.д. [10].

В работе Дж. Мура [11] вводится термин «предпринимательская экосистема», который перекликается с термином «инновационная экосистема», если мы говорим об инновативных компаниях. Аналогия с биологическими экосистемами оказалась очень популярной для описания ситуаций с большим количеством стейкхолдеров, взаимодействующих между собой [12–14]. К. Фриман к этому классу ситуаций относит и инновационные кластеры. То есть, можно сказать, что модели инновационного кластера и инновационной экосистемы во многом перекликаются и являются развитием кластерных и сетевых моделей в условиях цифровизации [4, 15–18]. Так, например, целью формирования кластеров является повышение конкурентоспособности отдельного региона или отрасли. Решение о создании кластера принимается, как правило, на уровне федеральных или региональных уровней власти. В сетевых объединениях целью является получение качественных и количественных результатов в ограниченное (короткое) время, задействуя минимальные факторы производства. Инициация создания сетевого объединения чаще всего принадлежит крупному предприятию, «притягивающего» к себе партнеров для увеличения добавочной стоимости продукции или услуг [1, 3, 19]. Основным отличием экосистемы от сетевых и кластерных моделей можно назвать самоорганизацию и саморазвитие в целях достижения уникальных конкурентных преимуществ каждого из участников экосистемы [2, 20–23].

Методы (основная часть)

Исходя из вышеуказанных определений, можно предположить, что инновационные экосистемы рассматриваются как механизмы сотрудничества, с помощью которых акторы рынка объединяют свои индивидуальные предложения для установления устойчивых связей на основе проекто- и клиенто-ориентированности с целью достижения ключевых уникальных преимуществ.

Анализируя и соглашаясь с позициями вышеизложенных исследователей, можно отметить недостаточное внимание к среде, формируемой участниками экосистемы и связям между ними. Считаем, что среда, формируемая на условиях комплементарности через связи и обмен энергией в виде новых знаний, компетенций, уникальной информации, является ключевым звеном в экосистемах. Именно потребность недостающих знаний и технологий, необходимость в значительном сокращении процессов инициации и реализации инноваций объединяют акторов и выстраивают отношения на иных принципах, чем было принято ранее.

Под инновационной экосистемой в работе будем понимать открытую и саморазвивающуюся систему сетевого равенства экономических акторов, которые самоорганизуются на основе особой среды, формируемой в результате обмена (переливов) энергии. В качестве такой энергии выступают новые зна-

ния, технологии, информация или уникальные ресурсы. Ключевой идеей, возле которой начинает формироваться экосистема, могут быть инициация и реализация инновационного проекта, создание нового продукта, технологии, разработка цифровых платформ и т.д. При этом отдельное предприятие может являться актором нескольких экосистем одновременно, реализуя разные проекты, являясь, например, заказчиком, поставщиком уникальных ресурсов или исполнителем разных проектов.

В отличие от кластеров и сетевых сообществ инициация экосистемного объединения не принадлежит одному конкретному актору. Объединение происходит на основе самоорганизации, когда каждый участник выгоден другому. Именно самоорганизация диктует принципы сотрудничества и партнерства как основа взаимоотношений между участниками. Сравнительный анализ моделей представлен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ организационных моделей горизонтального типа
(составлено авторами данной статьи)

Критерий сравнения	Кластеры	Сетевая организация	Экосистема
Цель формирования	Повышение конкурентоспособности отрасли или региона	Использование особенностей, ресурсов, специфических преимуществ перед другими участниками рынка для совместной реализации предпринимательских проектов	Инициация и реализация цифровой инновации или уникального продукта
Границы объединения	Географические или отраслевые	Ценностная цепь реализации определенной продукции или услуг	Межотраслевые, межтерриториальные
Критерии объединения	По стадиям производственного процесса	По цепочке создания и реализации продукции или услуг	По стадиям ЖЦ нового продукта или новой технологии
Отношения между участниками	Внутренняя конкуренция и кооперация	Внутренняя конкуренция и кооперация	Сотрудничество и партнерство
Возможность включения или исключения акторов	Ограничение по входам и выходам	Ограничение по входам и выходам	Высокий уровень открытости
Управляемость	Наличие органов управления на федеральных или региональных уровнях	Наличие органа управления принадлежит инициатору сетевого объединения	Самоорганизация

Из таблицы видно, что отличия данных моделей не носят кардинального характера, а являются отражением целей и условий конкретных вызовов развития экономики.

Научная новизна и результаты работы

При исследовании структуры экосистемы предполагаем, что необходимо рассматривать ее с позиции трех уровней: на уровне актора, на микроуровне и на макроуровне.

Функциональная структура актора (рис. 1) формирует бизнес-процессы, которые при включении актора в экосистему могут вступать во взаимодействие с процессами других участников системы, что потенциально влечет за собой угрозы рисков и для отдельного участника, и для системы в целом.

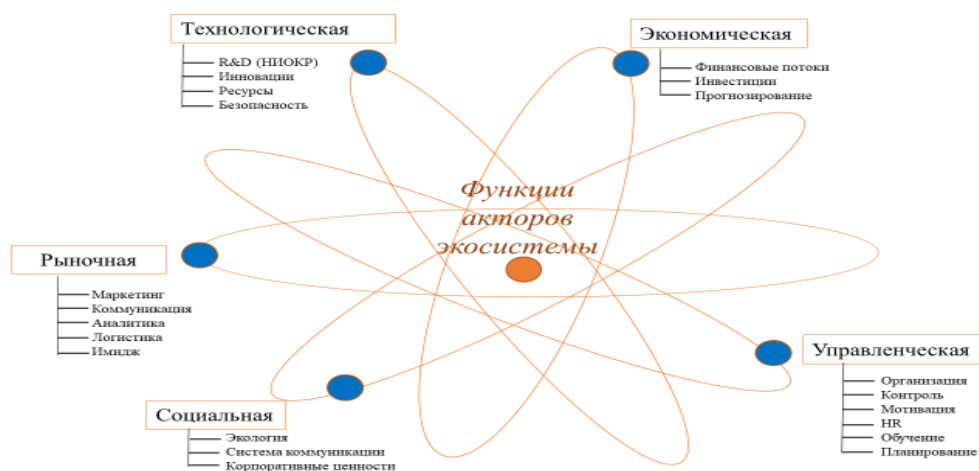


Рис. 1. Структура актора экосистемы и его функциональные составляющие (составлено авторами данной статьи)

Концептуальная атомистическая модель актора строится благодаря автономному взаимодействию внутренних компонентов и ее составляющих. Объединение акторов на принципах самоорганизации представляет экосистему на микроуровне (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что структура экосистемы – это соотношение групп акторов, занимающих определенные роли в экосистеме. Акторы разных типов взаимодействуют внутри экосистемы, образуя ее среду и потоки (сети, цепи) для обмена энергией. Экосистема на рис. 2 описана комплексной схемой прямых и обратных связей, поддерживающих гомеостаз системы в некоторых пределах параметров окружающей среды.

Ключевым свойством аттрактивного интеллектуального ядра в экосистеме выступает пейсмейкер, который может быть технологией, проектом, инновацией, платформой и актором. Пейсмейкер создает условия для сбалансированного перелива знаний и обмена энергией, создавая согласованность коммуникации между акторами в экосистеме.

Пейсмейкер, который является сердцем экосистемы, имеет свойство задавать темп для функционирования акторов в ней и выступает триггером для него, вовлекая какую-либо систему в единый специфический акт жизнедеятельности.

тельности [22, 23]. Связи между участниками экосистемы могут быть различные: финансовые, дистрибьютерские, научно-исследовательские, информационные, защитные (безопасность), производственные и коммерческие. На макроуровне экосистема интегрируется с другими экосистемами для достижения совместных целей (рис. 3).



Рис. 2. Структура экосистемы на микроуровне
(составлено авторами данной статьи)



Рис. 3. Структура экосистемы на макроуровне и ее результаты коллаборации
(составлено авторами данной статьи)

Вследствие объединения нескольких экосистем формируются уникальные производственные, сырьевые, инфраструктурные, культурные, информационные, экологические, интеллектуальные ценности и другие эффекты и ценности.

Экосистема на микро- и макроуровнях охватывает широкое разнообразие акторов, которые свободно взаимодействуют друг с другом в рамках определенных границ (институциональных, географических, проектных). В ходе этих взаимодействий спонтанно возникает новый организационный порядок или интегральная модель поведения экосистемы. Реагируя на обратные связи, акторы адаптируются к возникшему порядку: изменяют свои технологические решения, структуру, стиль поведения. Чередование хаоса и порядка происходит непрерывно, что настраивает всю систему на дальнейший рост и движущую силу обновлений. Благодаря такому виду взаимодействия акторов и групп акторов обеспечивается главное свойство экосистемы – способность к саморазвитию.

Несмотря на способность сукцессии, экосистемы, как и любые организационные модели, несут в себе определенные риски (рис. 4).



Рис. 4. Классификация рисков в экосистеме
(составлено авторами данной статьи)

Риски могут быть социальными, демографическими, геополитическими, экономическими, финансовыми, информационными, технологическими, организационными, могут возникать на всех уровнях экосистемы и нести в себе разную степень угрозы для целевых установок акторов и устойчивости экосистемы.

В качестве акторов экосистемы могут выступать промышленные предприятия и организации различных форм собственности, стартапы, инжиниринговые структуры, технопарки, финансовые и венчурные фонды, федеральные, территориальные и отраслевые структуры, объединение и взаимодействие которых осуществляется на следующих принципах:

- самоорганизация и саморазвитие;
- совместное генерирование и использование информационных и интеллектуальных ресурсов;
- открытость к внешним вызовам;
- корпоративность взаимодействий;

- трансграничность;
- проектоориентированность;
- ориентация на ресурсосбережение и экологическую безопасность;
- регенерация новых проектов и технологий;
- клиентоориентированность.

Область применения

Примером такого рода инновационного промышленного кластера, преобразующегося постепенно в экосистему, является кластер «Композиты без границ», который объединяет ведущих российских игроков композитной отрасли на принципах партнерства, интеллектуального сотрудничества, когнитивности, проектоориентированности [24]. Пейсмейкером кластера можно считать АНО «Специализированная организация межрегионального промышленного кластера "Композиты без границ"» (Umatex «Росатом»), объединяющего компании со следующими целевыми установками:

- развитие кооперации между разработчиками, производителями, потребителями композитов;
- масштабирование российского рынка композитов;
- реализация экспортного потенциала российских композитных материалов и изделий из них.

Акторами данного кластерного объединения выступают многочисленные промышленные предприятия, университеты и технопарки. Кластер иницирует, разрабатывает и продвигает проекты по проектированию изделий из композитов и разработке материалов с необходимыми параметрами.

Так, например, акторами – производителями углеродных, стеклянных и базальтовых волокон являются ООО «Композит-Волокно», ООО «Аргон», а акторами – производителями композитных материалов выступают ООО «Инжиниринговая компания "Интек"», ООО «Татнефть-Пресскомпозит», ООО «Заряд», ООО «П-Д Татнефть-Алабуга Стекловолокно», ООО «Аргон», ООО «Препрег-Дубна», ООО «Алабуга-Волокно», ООО «Композит-волокно» и другие предприятия кластера.

Акторами – разработчиками проектов являются Казанский федеральный университет, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Технологический университет, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, КАИ, исследовательская компания АО «Институт новых углеродных материалов и технологий» (АО«ИНУМиТ»), созданная совместно с МГУ им. М. В. Ломоносова, Тульский государственный университет, Университет «Дубна», Технополис «Химград» и др.

Одним из акторов – промоутеров кластера можно назвать компанию ООО «Мортех», иницирующую и реализующую новые инновационные проекты в области производства композитных скоростных судов на подводных крыльях. Акторами – промоутерами кластера в области развития и масштабирования российского рынка композитов выступают ООО НПП «Завод стеклопластиковых труб», ООО «Инжиниринговая компания "ИНТЕК"», ООО «КАМАТЕК», ООО «СМП-Механика», ООО «РОСИЗОЛИТ» и АО «Композит».

Инфраструктурное взаимодействие участников кластера происходит на базе таких акторов-интеграторов, как технополис «Химград» (Республика Татарстан), ОЭЗ ППТ «Алабуга» (Республика Татарстан), ПОЭЗ «Ульяновск», ОЭЗ ППТ «Узловая» (Тульская область), Индустриальный парк «Заволжье» (Тульская область), ОЭЗ ТВТ «Дубна» (Московская область), которые реализуют принципы трансграничности и сами по себе могут выступать экосистемами.

За 2017 г. кластер обеспечил рабочими местами 4,2 тыс. работников, а выручка акторов кластера составила 15,4 млрд руб. Устойчивость развития кластера подтверждает инициация в 2018 г. и реализация сроком до 2022 г. совместного кластерного проекта «Организация современного производства ПАН-волокна для обеспечения российского рынка всеми типами углеродных волокон» со следующими целевыми показателями проекта к 2022 г.: создание 75 высокопроизводительных рабочих мест, прирост объема экспорта на 658 млн руб. и рост кооперации между участниками кластера в размере 946 млн руб.

Выводы

Подводя итоги, можно определить, что развитие национального экономического рынка прямо пропорционально зависит от мониторинга и пересмотра моделей поведения всех участников рынка на различных уровнях экономики как со стороны государства, так и со стороны участников национальной экономики. Экосистемная перестройка среды – это объективный глобальный тренд, движимый технологической революцией. Задача такой реформы модели экономики – это уход от иерархического наследия прошлого и формирование горизонтально-связанной сетевой среды для свободного перелива знаний, информации, технологии и инновации в межотрасли и межтерритории. Опираясь на приведенный кейс, возможно предположить, что кластеры могут переродиться в инновационную экосистему, которая имеет ряд преимуществ перед иными системами горизонтальных организаций. Например, в экосистеме участники могут быть не только объединены по принципу кластера внутри одной отраслевой ниши, но и преимущественно создавать конкурентные интеграции между (или объединяя) акторами (акторов) из различных отраслевых структур внутри одной экосистемы. Важно отметить, что современная экономика не поддается прежним методам контроля и формирует новые нелинейные стандарты поведения, требующие развития саморегулирования на всех уровнях связей.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 20-010-00470.

Библиографический список

1. Васин, С. М. Концептуальные вопросы управления инновационной системой / С. М. Васин, Л. А. Гамидуллаева // Russian Journal of Management. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 342–351.
2. Толстых, Т. О. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях индустрии 4.0 / Т. О. Толстых, Л. А. Гамидуллаева, Е. В. Шкарупета // Экономика в промышленности. – 2018. – № 1. – С. 4–12.

3. Гамидуллаева, Л. А. Опыт государственной поддержки бизнес-инкубирования за рубежом и возможности его адаптации в России / Л. А. Гамидуллаева // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – Вып. 369. – С. 122–125.
4. Дорошенко, С. В. Предпринимательская экосистема в современных экономических исследованиях / С. В. Дорошенко, А. Г. Шеломенцев // Журнал экономической теории. – 2017. – № 4. – С. 212–221.
5. Клейнер, Г. Б. Социально-экономические экосистемы в свете системной парадигмы / Г. Б. Клейнер // Системный анализ в экономике – 2018 : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф.-биеннале (21–23 ноября 2018 г.) / под общ. ред. Г. Б. Клейнера, С. Е. Щепетовой. – Москва : Прометей, 2018. – С. 5–14.
6. Клейнер, Г. Б. Социально-экономические экосистемы в контексте дуального пространственно-временного анализа / Г. Б. Клейнер // Экономика и управление: проблемы и решения. – 2018. – № 5–5'. – С. 5–13.
7. Клейнер, Г. Б. Системная сбалансированность экономики / Г. Б. Клейнер, М. А. Рыбачук. – Москва : ИД «Научная библиотека», 2017. – 320 с.
8. Клейнер, Г. Б. От «экономики физических лиц» к системной экономике / Г. Б. Клейнер // Вопросы экономики. – 2017. – № 8. – С. 56–74.
9. Яковлева, А. Ю. Инновационная экосистема как ключевой инструмент в развитии региона / А. Ю. Яковлева // Инновации в экономике : сб. материалов V Всерос. эконом. форума студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Томск, 17–21 мая 2010 г.) / ред.-сост. Ж. Н. Зенкова. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. – С. 104–105.
10. Freeman, C. Technology Policy and Economic Performance / C. Freeman : Lessons from Japan. London: Pinter. Japan: A new national system of innovation // Technical Change and Economic Theory. – London : Pinter, 1987.
11. Moore, J. The Death of Competition: Leadership and Strategy in the Age of Business Ecosystems / J. Moore. – USA : Harper Business, 1996. – 297.
12. Nolan, A. The digitalisation of science, technology and innovation. An overview of key developments and policies / A. Nolan, D. Guellec // OECD, DSTI/ STP. – 2019.
13. OECD. University-Industry Collaboration: New Evidence and Policy Options. – Paris : OECD Publishing, 2019.
14. Dewar, J. University 4.0: Redefining the Role of Universities in the Modern Era / J. Dewar // Higher Education Review. – 2017. – URL: <https://www.thehigher-educationreview.com/magazine/university-40-redefining-the-role-of-universities-in-the-modern-era-SUPG758722027.html>
15. Дементьев, В. Е. Очередная промышленная революция и организация бизнеса / В. Е. Дементьев // Львовские чтения – 2018 : сб. статей IV Всерос. науч. конф. / под ред. Г. Б. Клейнера. – Москва : Издательский дом ГУУ, 2018. – С. 17–21.
16. Дементьев, В. Е. Гибридные формы организации бизнеса: к вопросу об анализе межфирменных взаимодействий / В. Е. Дементьев, С. Г. Евсюков, Е. В. Устюжанина // Российский журнал менеджмента. – 2017. – Т. 15, № 1. – С. 89–122.
17. Келли, К. Неизбежно. 12 технологических трендов, которые определяют наше будущее / К. Келли. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 352 с.
18. Орлова, В. Г. Перспективы развития экономики припортовых территорий России / В. Г. Орлова, Д. В. Арутюнова, Н. И. Чернобровкина // Системный анализ в экономике – 2018 : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф.-биеннале (21–23 ноября 2018 г.) / под общ. ред. Г. Б. Клейнера, С. Е. Щепетовой. – Москва : Прометей, 2018. – С. 115–118.
19. Суловицкая, Г. В. Совершенствование механизмов накопления человеческого капитала региональных университетов в условиях цифровой экономики / Г. В. Суловицкая, Л. А. Гамидуллаева // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2019. – № 1-2 (29-30). – С. 16–26.
20. Толстых, Т. О. Проблемы экономической безопасности в условиях цифровой трансформации / Т. О. Толстых, А. М. Агаева // Известия Юго-Западного госу-

дарственного университета. Сер.: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2020. – Т. 10, вып. 1. – С. 59–68.

21. Толстых, Т. О. Влияние человеческого потенциала на формирование цифровой экосистемы в рамках кросс-отраслевой трансформации / Т. О. Толстых, Е. В. Шкарупета // Актуальные проблемы развития хозяйствующих субъектов, территорий и систем регионального и муниципального управления : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. – 2019. – С. 210–213.
22. Толстых, Т. О. Экосистемный подход как концепция инновационного развития экономики / Т. О. Толстых, А. М. Агаева // Наука сегодня: вызовы и решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Вологда, 29 января 2020 г.). – Вологда : ООО «Маркер», 2020. – С. 73.
23. Толстых, Т. О. Организационный дизайн университетского образования как стратегия инновационного развития в контексте цифровизации экономики / Т. О. Толстых, Б. Г. Преображенский, Е. А. Алпеева, Е. Н. Елисеева // Регион: системы, экономика, управление. – 2017. – № 4 (39). – С. 174–182.
24. Интернет-ресурс: сайт официальной страницы кластера. – URL: <https://compositescluster.ru/>

References

1. Vasin S. M., Gamidullaeva L. A. *Russian Journal of Management*. 2015, vol. 3, no. 4, pp. 342–351. [In Russian]
2. Tolstykh T. O., Gamidullaeva L. A., Shkarupeta E. V. *Ekonomika v promyshlennosti* [Key factors of industrial enterprises development in the context of industry 4.0]. 2018, no. 1, pp. 4–12. [In Russian]
3. Gamidullaeva L. A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2013, iss. 369, pp. 122–125. [In Russian]
4. Doroshenko S. V., Shelomentsev A. G. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii* [Journal of economic theory]. 2017, no. 4, pp. 212–221. [In Russian]
5. Kleyner G. B. *Sistemnyy analiz v ekonomike – 2018: sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.-biennale (21–23 noyabrya 2018 g.)* [System analysis in Economics-2018: sat. Tr. V mezhdunar. scientific-practical Conf. – Biennale (November 21–23, 2018)]. Moscow: Prometey, 2018, pp. 5–14. [In Russian]
6. Kleyner G. B. *Ekonomika i upravlenie: problemy i resheniya* [Economics and management: problems and solutions]. 2018, no. 5–5', pp. 5–13. [In Russian]
7. Kleyner G. B., Rybachuk M. A. *Sistemnaya sbalansirovannost' ekonomiki* [System balance of the economy]. Moscow: ID «Nauchnaya biblioteka», 2017, 320 p. [In Russian]
8. Kleyner G. B. *Voprosy ekonomiki* [Economic issue]. 2017, no. 8, pp. 56–74. [In Russian]
9. Yakovleva A. Yu. *Innovatsii v ekonomike: sb. materialov V Vseros. ekonom. foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (g. Tomsk, 17–21 maya 2010 g.)* [Innovations in Economics: collection of materials V Vseros. steward. forum of students, postgraduates and young scientists (Tomsk, may 17-21, 2010)]. Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010, pp. 104–105. [In Russian]
10. Freeman S. *Technical Change and Economic Theory*. London: Pinter, 1987.
11. Moore J. *The Death of Competition: Leadership and Strategy in the Age of Business Ecosystems*. USA: Harper Business, 1996, 297.
12. Nolan A., Guellec D. *OECD, DSTI/ STP*. 2019.
13. *OECD. University-Industry Collaboration: New Evidence and Policy Options*. Paris: OECD Publishing, 2019.
14. Dewar J. *Higher Education Review*. 2017. Available at: <https://www.thehigher-educationreview.com/magazine/university-40-redefining-the-role-of-universities-in-the-modern-era-SUPG758722027.html>
15. Dement'ev V. E. *L'vovskie chteniya – 2018: sb. statey IV Vseros. nauch. konf.* [Lviv readings-2018: collection of articles IV vseros. scientific Conf.]. Moscow: Izdatel'skiy dom GUU, 2018, pp. 17–21. [In Russian]

16. Dement'ev V. E., Evsyukov S. G., Ustyuzhanina E. V. *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta* [Russian journal of management]. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 89–122. [In Russian]
17. Kelli K. *Neizbezhno. 12 tekhnologicheskikh trendov, kotorye opredelyayut nashe budushchee* [Inevitably. 12 technological trends that define our future]. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2017, 352 p. [In Russian]
18. Orlova V. G., Arutyunova D. V., Chernobrovkina N. I. *Sistemnyy analiz v ekonomike – 2018: sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.-biennale (21–23 noyabrya 2018 g.)* [System analysis in Economics-2018: sat. Tr. V mezhdunar. scientific-practical Conf. – Biennale (November 21-23, 2018)]. Moscow: Prometey, 2018, pp. 115–118. [In Russian]
19. Surovitskaya G. V., Gamidullaeva L. A. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society]. 2019, no. 1-2 (29-30), pp. 16–26. [In Russian]
20. Tolstykh T. O., Agaeva A. M. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment* [Izvestiya Yugo-ZAPADNOGO gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Economics. Sociology. Management]. 2020, vol. 10, iss. 1, pp. 59–68. [In Russian]
21. Tolstykh T. O., Shkarupeta E. V. *Aktual'nye problemy razvitiya khozyaystvuyushchikh sub"ektov, territoriy i sistem regional'nogo i munitsipal'nogo upravleniya: materialy KhIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of development of economic entities, territories and systems of regional and municipal management: materials of the XIV international conference. scientific-practical conf.]. 2019, pp. 210–213. [In Russian]
22. Tolstykh T. O., Agaeva A. M. *Nauka segodnya: vyzovy i resheniya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Vologda, 29 yanvarya 2020 g.)* [Science today: challenges and solutions : proceedings of the international conference. scientific-practical Conf. (Vologda, January 29, 2020).]. Vologda: OOO «Marker», 2020, p. 73. [In Russian]
23. Tolstykh T. O., Preobrazhenskiy B. G., Alpeeva E. A., Eliseeva E. N. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie* [Region: systems, economy, management]. 2017, no. 4 (39), pp. 174–182. [In Russian]
24. *Internet-resurs: sayt ofitsial'noy stranitsy klastera* [Online resource: the official web-site page of the cluster]. Available at: <https://compositescluster.ru/> [In Russian]

Толстых Татьяна Олеговна

доктор экономических наук, профессор,
кафедра промышленного менеджмента,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
институт ЭУПП
(Россия, г. Москва,
Ленинский проспект, 4)
E-mail: tt400@mail.ru

Tolstykh Tatyana Olegovna

doctor of economical sciences, professor,
sub-department of industrial management,
National University of Science
and Technology “MISIS”,
Institute of Economics
and Industrial Management
(4 Leninskiy prospect, Moscow, Russia)

Агаева Айя Мередгельдыевна

аспирант,
Российский экономический университет
имени Г. В. Плеханова
(Россия, г. Москва,
ул. Стремянный переулок, 36)
E-mail: agaevaam94@mail.ru

Agaeva Ayya Meredgel'dyevna

postgraduate student,
Russian University of Economics
named after G. V. Plekhanov
(36 Stremyanny lane, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Толстых, Т. О. Экосистемная модель развития предприятий в условиях цифровизации / Т. О. Толстых, А. М. Агаева // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 37–49. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-3.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫХОДА МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЫНОК ЗЕРНА

Е. А. Попова, Е. М. Бижанова, С. В. Зинченко

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF SMALL-SIZED ENTERPRISE' ENTRY ON THE CEREALS MARKET

E. A. Popova, E. M. Bizhanova, S. V. Zinchenko

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Актуальность темы исследования обусловлена высоким экспортным потенциалом российских производителей зерна и продуктов его происхождения, в том числе и небольших компаний. Объем производства зерновых культур превышает внутренний спрос на данный продукт, в связи с чем значительная доля его экспортируется. *Методы.* Работа основана на исследовании динамики отечественного рынка зерна и продуктов его переработки, выводы которого представлены в виде PEST-анализа. Исследованы динамика и структура экспорта зерна отечественных производителей, выявлены крупнейшие экспортеры зерна из России, а также особенности экспортной системы распределения зерна. *Результаты и выводы.* Проведенные исследования позволили разработать методику выхода на международный рынок зерна малых предприятий, которая предполагает наращивание материально-технического, кадрового потенциала, формирование партнерских отношений с существующими экспортерами, поиск и заключение контрактов с зарубежными партнерами. Предлагаемый подход к выходу на зарубежный рынок сельскохозяйственных производителей учитывает особенности и ограничения, с которыми неизбежно сталкивается малый бизнес. Даны конкретные рекомендации по формированию стратегических направлений развития бизнеса для реализации экспортного потенциала небольших предприятий.

Ключевые слова: экспорт, рынок зерна и продуктов его переработки, методика выхода на зарубежные рынки, исследование тенденций рынка зерна, экспортная система распределения, внешнеэкономическая деятельность.

Abstract. *Subject and goals.* Topical relevance depends on the high export capacity of the small- and medium-sized Russian enterprises on the cereals market. Labour of the grain is higher than domestic demand therefore a large part of the grain is exported. *Methods.* The study is based on the marketing researches of the cereals market which results are as PEST analysis. Dynamics and export structure grain Russian producers were analysed, the largest exporters were identified. *Results and conclusions.* Researches allowed to develop the method of small-sized enterprise' entry on the cereals international market. This approach aims to improve logistical and staff capacity, establishment of a partnership with exporters and external partners. This approach considers characteristics and constraints faced by small-sized enterprises of the grain going abroad. It also developed recommendations to create strategies of the small-sized enterprises to realize the export potential.

Keywords: export, cereals market, the method of the entry on the international market, the research of the cereals market trends, system of distribution, International economic activities.

Введение

Основной особенностью отечественного рынка зерна является то, что производство данной культуры превышает внутренние потребности страны, в связи с чем значительная доля произведенной продукции отправляется на экспорт. Последние десять лет валовое производство зерна в России имеет устойчивую тенденцию к росту и приближается к 105–110 млн тонн, причем в 2016 г. достигло 120,7 млн тонн. Основной объем потребления зерна внутри страны идет на переработку, а также на семена и фуражные цели, на данный момент не меняется и составляет порядка 45–47 млн тонн. Произведенное сверх того зерно идет в незначительной степени на создание переходящего запаса, в большем же объеме отправляется на экспорт, который в последние годы постоянно увеличивается. В структуре мирового производства зерновых Россия входит в тройку лидеров наряду с США и Китаем [1, 2].

Вместе с тем следует отметить увеличение интереса предпринимателей к сельскому хозяйству: в последнее время появилось достаточно большое количество небольших сельскохозяйственных предприятий и фермерских компаний, которые обострили конкуренцию на внутреннем рынке. При этом зерновой рынок России с точки зрения сбыта является достаточно сложным и непредсказуемым в плане ценообразования, что побуждает производителей к поиску выходов на зарубежные рынки.

Существующие разработки в области методов выхода предприятий и освоения зарубежных рынков требуют существенной доработки к отраслевой специфике и потенциалу предприятий [3]. Как показало исследование, отсутствуют рекомендации по освоению зарубежных рынков именно для малых предприятий, тогда как, несомненно, зерновой мировой рынок предоставляет экономические возможности и для небольших компаний – производителей зерна. Данное исследование является результатом адаптации теоретико-методических подходов к выходу и разработке стратегии малого предприятия на мировом рынке с учетом специфики отраслевого рынка зерна.

Исследование тенденций российского зернового рынка

Зерно и продукты его переработки во многом определяют продовольственную безопасность России, поскольку являются наряду с мясом одним из основных продуктов питания населения всего мира. Именно на зерно приходится наиболее устойчивый спрос на международном рынке [4].

Рынок зерна в России за последние годы показывает положительную динамику роста: его видимое потребление увеличилось по сравнению с предыдущими годами. Рост объема рынка составил 5 % по итогам 2017 г. и составил в натуральном выражении 88,1 млн тонн. По прогнозам экспертов, в среднесрочной перспективе ожидается незначительный рост потребления: порядка 0,5 % в год (рис. 1) [5].

Основное производство зерна в России расположено на территориях Южного, Центрального и Приволжского ФО, где сосредоточены основные производители зерновых культур: 12 регионов России производят 60 % валового сбора зерна, при этом 10 регионов Европейской части РФ находятся в климатических условиях, схожих с ЕС, Канадой и основной частью США, следовательно, урожайность данных территорий РФ может расти (рис. 2) [5].

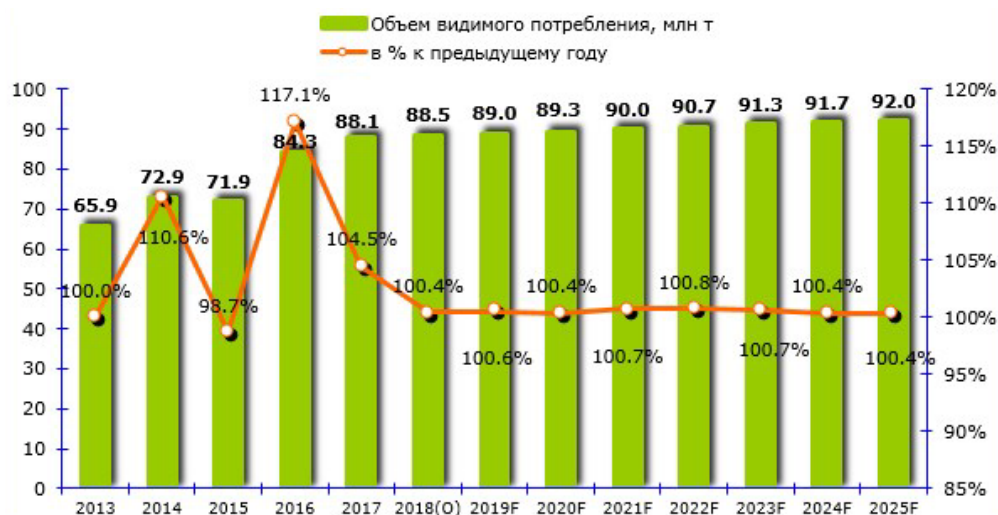


Рис. 1. Объем предложения на рынке зерна в 2013–2018 гг., прогноз до 2025 г., млн т (источник: данные Росстата, ФТС, аналитика IndexBox)



Рис. 2. Основные регионы – производители зерна в РФ

Сфера производства, обращения зерна и продуктов его переработки в РФ регулируется Гражданским кодексом Российской Федерации, законом РФ от 14.05.1993 № 4973-1 «О зерне», ФЗ от 27.12.2002 № 184 «О техническом регулировании», ФЗ от 05.12.1998 № 183 «О государственном надзоре и контроле за качеством и безопасностью зерна и продуктов его переработки» и другими нормативно-правовыми актами РФ и субъектов Российской Федерации [4, 6].

Производство и реализация зерна и продуктов его переработки на единой таможенной территории Евразийского экономического союза в приоритете нормативно-правовых актов Союза.

Классификация зерна осуществляется на основе совокупности биологических и технологических показателей зерна в соответствии с националь-

ными и международными стандартами, техническими регламентами в сфере производства зерна.

Таким образом, исследование отечественного зернового рынка позволило выявить возможности и угрозы его развития, которые следует учитывать производителям для определения приоритетных перспектив своего развития (табл. 1).

Таблица 1

PEST-анализ российского рынка зерна

Факторы	Возможности	Угрозы
Политико-правовая среда (Р)	– действующее законодательство	– сокращение субсидий на экспорт для зернопроизводящих регионов
Экономическая среда (Е)	– рост пищевой промышленности и сельского хозяйства; – рост цен на импортную продукцию	– нестабильность курса валют (в первую очередь доллара)
Социально-демографическая среда (S)	– восстановление потребительского спроса на продукцию переработки зерновых	– демографическая ситуация (прогнозируемое снижение уровня рождаемости и миграционного прироста)
Технологическая, природная среда (Т)	– погоднo-климатические условия: более низкая урожайность зерна – возможность получить большую прибыль	– погоднo-климатические условия: сокращение уборочных площадей; – риски потери урожая

Анализ динамики и структуры экспорта зерна

Производство зерна в РФ превышает объем внутреннего потребления, поэтому в основном ориентировано на вывоз за рубеж. Так, Россия является одним из лидеров по экспорту зерна на международном рынке. По данным исследования IndexBox Russia, производство зерновых культур, в частности пшеницы, является экспортоориентированной отраслью: за рубеж вывозится порядка 33 % всей произведенной продукции. При этом треть российского экспорта зерна направляется в Египет и Турцию.

Следует отметить, росту экспортного потенциала зерна препятствует слабое развитие транспортно-логистической инфраструктуры, а также недостаток элеваторных мощностей. В среднесрочной перспективе ожидается некоторое замедление роста из-за отсутствия предпосылок роста потребления зерна и продуктов его переработки. Несмотря на это, прогнозируется рост объемов производства зерна в РФ порядка 2 % в год.

Вывоз пшеницы, основной российской экспортной агрокультуры, по итогам сезона 2017–2018 гг. достиг 41,07 млн тонн, что на 14,1 млн тонн больше, чем в предыдущий период. Данный показатель позволил второй раз в истории зафиксировать лидерство России в мировом экспорте пшеницы [7].

К факторам, способствующим столь заметному росту экспорта, следует отнести не только рекордный урожай зерновых, но и введение правитель-

ством льготного тарифа на перевозку зерна железнодорожным транспортом из ряда удаленных от портов регионов Центральной России, Поволжья, Урала и Сибири, а также рост цен на зерновых биржах на российскую пшеницу: более \$200/т. Также росту экспорта значительно способствует развитие транспортной инфраструктуры, пропускная способность которой превышает 5 млн тонн зерна в месяц.

Основными покупателями российских зерновых культур являются Египет, Турция и страны Ближнего Востока. Рейтинг крупнейших покупателей российского зерна возглавляет Египет, импортировавший за сезон 2018 г. более 8,6 млн тонн, что превысило ввоз на 30,3 % по отношению к прошлому периоду (рис. 3).

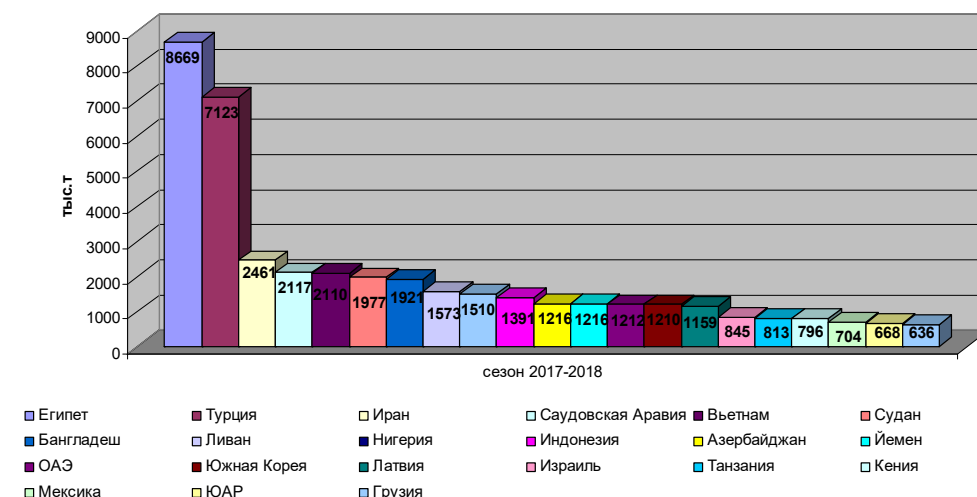


Рис. 3. Страны – крупнейшие экспортеры зерна из России

На втором месте по экспорту зерна находится Турция, в которую в 2018 г. увеличился российский экспорт зерна на 131 % и достиг 7,1 млн тонн. Отгрузка зерна в Турцию осуществляется в основном через малые порты, глубоководные же терминалы отправили в данную страну за 11 месяцев 2017–2018 гг. менее 14 %.

Третьим по величине покупателем в рассматриваемом периоде является Иран, который увеличил ввоз более чем на 57 % и достиг 2,46 млн тонн. Отгрузки осуществляются преимущественно через порты Каспия.

Следующим по величине импортером является Саудовская Аравия, которая увеличила покупки на 80,8 % по сравнению с предыдущим периодом, что составило 2,1 млн тонн.

К странам, также увеличившим импорт российского зерна, относятся Латвия, через порты которой зерно вывозилось в третьи страны. Импорт в Латвию увеличился в три раза и достиг 1,15 млн тонн. Также динамично увеличился экспорт зерна в такие страны, как ОАЭ (до 12,2 млн тонн), Мексика (до 704 тыс. тонн), Иордания (до 589 тыс. тонн), Катар увеличил ввоз российского зерна в 5,6 раза (до 293 тыс. тонн), Филиппины – в 28 раз (до 421 тыс. тонн).

Всего 30 крупнейших стран-покупателей в 2018 г. импортировали более 45 млн тонн российского зерна, что составило более 90 % от общего объема экспорта.

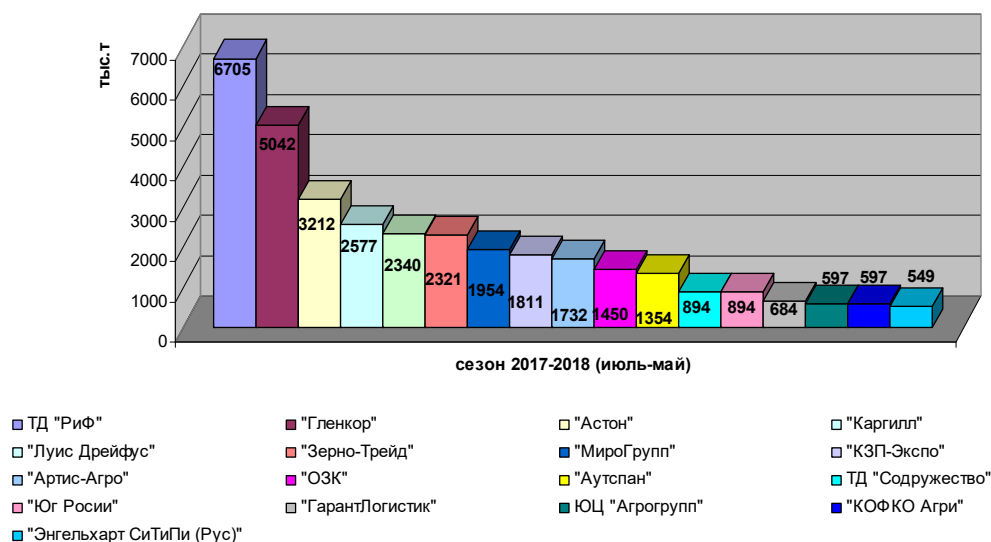


Рис. 4. Крупнейшие экспортеры российского зерна (источник: «Русагротранс»)

Анализ деятельности компаний экспортеров российского зерна показал, что на тридцать крупнейших из них пришлось 78 % всего экспорта зерна за июль–май сезона 2017–2018 гг. (рис. 4). Лидером по экспортным продажам – торговый дом «РиФ», находящийся в Ростове-на-Дону, который занимается закупками зерна внутри России и продажами на внутреннем и зарубежном рынках зерновых культур [8, 9].

Исследование особенностей экспортной системы распределения продукции российских предприятий на мировом рынке зерна

Современная схема экспорта зерна из России представлена на рис. 5. Так, производители зерна (фермерские хозяйства) продают его оптовым посредникам преимущественно со своих складов. При этом все расходы и риски, связанные с доставкой, берут на себя именно они. Партии зерна, которые закупают эти компании, колеблются в пределах от одной до десяти тонн.

Затем в дело вступают компании – экспортеры зерна: они представлены предприятиями различных размеров и форм собственности, в задачу которых входит взаимодействие с небольшими производителями зерна, покупка у них необходимого его количества и доставка до крупных экспортеров. При этом, следует отметить, что большинство из них не имеют своего транспорта и прибегают к услугам транспортных компаний для доставки зерна.

Следующий уровень при экспорте зерна занимают компании-экспортеры, которых на настоящий момент достаточно небольшое количество. Они отслеживают тендеры, выставяемые иностранными трейдерами, и участвуют в торгах по продаже зерна за границу. Также в обязанности указанных компаний входят сбор и оформление полного пакета документов для участия в торгах. Некоторые компании (например «РиФ») имеют собственные транспортные средства и отлаженные механизмы взаимодействия с портами. Особенностью указанных компаний является наличие складов и элеваторов для хранения крупных партий зерна [8].

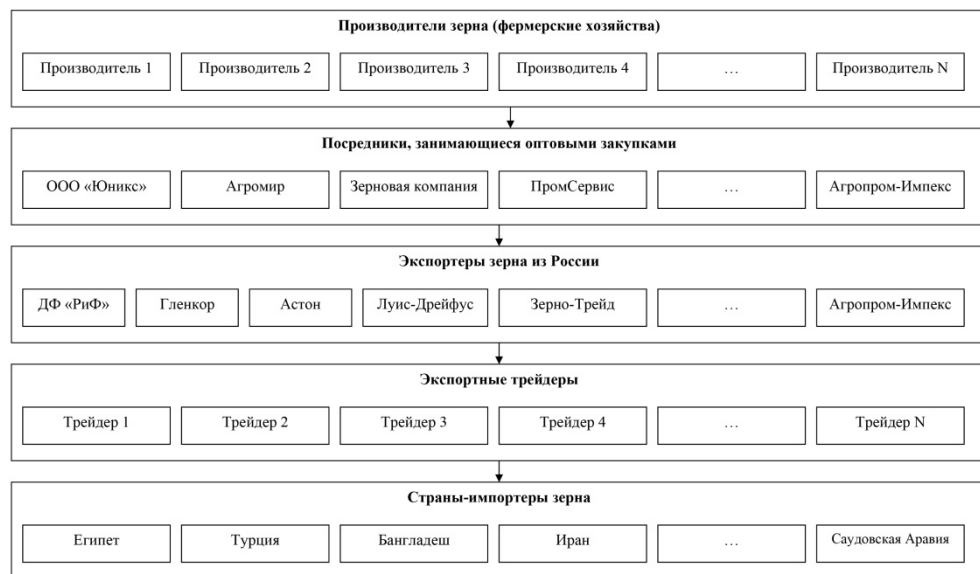


Рис. 5. Экспортная система распределения российского зерна

Со стороны стран – импортеров зерна его закупкой также занимаются трейдеры – иностранные компании, выставляющие квоты по необходимому объему продукции и проводящие закупку от лица государства. Так, в двух странах – крупнейших экспортерах зерна – Турции и Египте – это компании «Зерновое агентство Турции (ТМО)» и «GASC» (Египетский госагент по закупкам).

Описанная схема является наиболее часто используемым вариантом экспорта зерна для небольших фермерских предприятий, так как является наименее рискованной. Однако есть ряд компаний, осуществляющих горизонтальную интеграцию и работающих на нескольких уровнях рынка (например «Агропром-Импекс»). Кроме того, на зерновом рынке работают также и предприятия, осуществляющие прямые поставки зерна зарубежным покупателям, что связано со значительными затратами и рисками.

В настоящее время лидером среди зерновых трейдеров является ТД «РиФ» и аффилированная с ней «Промэкспедиция», основанные Петром Ходыкиным в 2010 г. Последние четыре года компания делает ставку на отгрузку зерна по «малой воде»: этому способствовало завершение реконструкции азовского элеватора «Промэкспедиции» с наращиванием мощности по единовременному хранению зерна от 30 до 105 тыс. тонн.

Компания закупает пшеницу, ячмень, кукурузу, горох и подсолнечник. Подать заявку на отгрузку можно через официальный сайт «Рифа». Одно из конкурентных преимуществ трейдера – максимальная автоматизация взаимодействия с сельхозтоваропроизводителями, предельное упрощение всех процедур. Фактически работать с ним можно полностью удаленно, что экономит значительные ресурсы для фермера. Значительным минусом взаимодействия с указанной компанией является достаточно низкий уровень закупочных цен: фактически, это плата за отработанную и проверенную схему взаимодействия.

Компания «Гленкор», российский филиал крупнейшего мирового зернотрейдера, занимает в рейтинге «Агроэксперта» второе место по объемам экспорта зерна. Две указанные компании двукратно опережают ближайших конкурентов по объемам экспорта. Компания, будучи представителем международного концерна, стремится к максимальной прозрачности своей деятельности – по крайней мере, на бумаге и при первом знакомстве (чтобы изучить полный список документов, необходимых для сотрудничества с трейдером, достаточно одного клика на официальном сайте).

Весной 2018 г. компания «Гленкор» вошла в число трейдеров, инициировавших выход отрасли из «серой» зоны экономики. Речь идет, во-первых, о полноценном налоговом бремени без «увеличений», а во-вторых, о борьбе с перекупщиками-однодневками, которые становятся неприятным промежуточным звеном между сельхозтоваропроизводителем и трейдером и создали диспаритет на рынке, а в конечном счете, оставляют в накладе фермеров.

Стратегией компании является приоритетная закупка зерна непосредственно у сельхозпроизводителей, и эта логика становится основной для большинства участников экспортного рынка.

Третье место на российском зернотрейдерском рынке занимает компания «Астон» – еще одна компания из Ростова-на-Дону. Ее конкурентным преимуществом является акцент на инновационности: например, в июне 2018 г. компания внедрила электронную очередь для регистрации на выгрузку автотранспорта – это должно упорядочить подачу грузовых машин, сократить время ожидания и разгрузить подъезды к терминалу в ростовской промзоне «Заречная». Мобильное приложение как инструмент регулирования бизнеса – в общем-то, не новость для России, но в аграрной сфере такие решения относительно редки.

Компания работает со следующими видами культур: пшеница, подсолнечник, ячмень, лен, кукуруза, горох, рапс, рыжик.

Компания «Луис Дрейфус» известна на рынке в качестве создателя крупного Азовского зернового терминала, сданного в эксплуатацию в 2017 г. Данный терминал имеет выгодное географическое положение, развитую инфраструктуру, в том числе значительные складские мощности. Именно Азовский терминал во многом обеспечивает отечественным производителям конкурентные преимущества на международном рынке за счет возможности реализации перевозки зерна посредством судов класса «река–море».

Сама компания работает в России с 1864 г., однако следует отметить, что на долгие годы сотрудничество с СССР было остановлено. Однако элементы «старых добрых традиций» все же сохранились: проявляется это не только в преимущественном использовании морских путей, но и в формате взаимодействия с поставщиками. В отличие от многих конкурентов «Луис Дрейфус» в духе XIX–XX вв. инвестирует в инфраструктуру, возводя собственные элеваторные комплексы и зерновые терминалы по всему Югу России, Черноземью и Северному Кавказу. Это позволяет компании, как правило, держать относительно невысокие логистические цены.

«Зерно-трейд» – ростовская компания, которая в настоящее время развивается стремительными темпами: за 2017 г. произошел 45%-й рост отгрузок на внешние рынки за год. Основным своим конкурентным преимуществом компания считает цифровизацию как собственного бизнеса, так и

сельского хозяйства в целом, поэтому инвестирует в развитие электронной инфраструктуры.

Половину грузоперевозок «Зерно-трейд» осуществляет железнодорожным транспортом, половину – автомобильным. При перевозках автотранспортом существует ярко выраженная сезонность тарифов: они существенно (иногда вдвое) возрастают в пиковый сезон. Для решения указанной проблемы компания отрабатывает механизмы привлечения к транспортировке грузов специалистов на аутсорсинге, связанных в единую систему, ориентированную, с одной стороны, на повышение удобства для зернопоставщика, а с другой – на плотный контроль процесса перевозки со стороны головного офиса. Это приведет в стратегической перспективе к повышению конкурентных позиций компании за счет высокой скорости доставки зерна для тех сельхозтоваропроизводителей, которым важна оперативность продаж [8, 9].

Анализ деятельности крупнейших российских экспортеров зерна показал, что на рынке зерна активно развивается партнерство в виде союзов. Так, АО «Астон», ООО «Гленкор Агро МЗК», ООО «ОЗК-Юг» и ООО «Торговый дом "РИФ"» подписали меморандум о создании Союза экспортеров зерна. На данные компании приходится более трети всего экспорта зерновых из России [10].

Основной целью союза является продвижение зерна и зернобобовых культур российского происхождения, а также продуктов их переработки на международном рынке. Формирование союза, помимо прочего, способствует повышению эффективности взаимодействия экспортеров и органов государственной власти, что позволит производителям, выходящим на мировой рынок зерна, приобрести поддержку со стороны государства. Возможность участников соглашения участвовать в разработке нормативно-правовых актов, регулирующих процессы производства и обращения зерна, способствовать появлению новых технологически оснащенных специализированных лабораторий и экспертных организаций на основе мировой практики в области формирования и подтверждения качества зерновых агрокультур, позволит повысить качество отечественного зерна и продуктов его переработки [10].

Кроме того, следует отметить возможность введения экспортной пошлины для ограничения вывоза зерна из России: это предложение было выдвинуто в августе 2018 г. на совещании в Минсельхозе России. Позднее министр сельского хозяйства сообщил, что в настоящее время предпосылок для введения экспортной пошлины на зерно нет. Однако, по данным Национальной ассоциации экспортеров сельскохозяйственной продукции, пошлину могут вернуть, если объем экспортных поставок зерна превысит 30 млн тонн, а пшеницы – 25 млн тонн [11].

Экспортная пошлина на пшеницу действовала с 1 июля 2015 г. по 23 сентября 2016 г. и составляла 15 % от таможенной стоимости плюс 7,5 евро (но не менее 35 евро за тонну). Причиной введения пошлины была стабилизация ситуации на зерновом рынке после девальвации рубля. В настоящее время значение экспортной пошлины нулевое.

Таким образом, анализ современных механизмов экспорта на рынке зерна показал, что экспорт зерна из России в сезоне 2017–2018 гг. значительно вырос по сравнению с предыдущим сезоном. Основными покупателями российских зерновых являются Египет, Турция, страны Ближнего Востока. Отечественных производителей и зарубежных покупателей зерна связывают три уровня посредников: компании, занимающиеся оптовыми закупками, компании – экспортеры зерна из РФ и экспортные трейдеры. Крупнейшими экспортерами

зерна из России являются ТД «РиФ», «Гленкор», «Астон», ООО «ОЗК-Юг» и «Луис Дрейфус», которые в 2018 г. объединились в Союз экспортеров зерна.

В настоящее время в России сложились хорошие предпосылки для экспорта зерна, в том числе и для небольших производителей: рост урожая и замедление роста внутреннего потребления. При этом потребление продуктов переработки зерна не является стабильным. Несмотря на падение доходов, значительного роста спроса на хлеб и хлебобулочные изделия, другие продукты переработки зерна не происходит. Однако на внутреннем рынке сложилась ситуация, при которой внутренний зерновой рынок поделен между крупными компаниями, значительно влияющими на ценовую ситуацию.

При этом на уровень цен на зерно также оказывают влияние погода и, как следствие, урожай зерна: так, при хорошей погоде и большом урожае цены на внутреннем рынке достаточно низкие, а в самые урожайные годы могут даже не покрывать себестоимость производства зерна. Также следует отметить, что спрос на российском рынке зерна нестабилен и непредсказуем: анализ деятельности предприятия показал отсутствие постоянных покупателей, гарантирующих предприятию стабильные объемы продаж.

Иная ситуация наблюдается на мировом рынке зерна. С середины 2000-х по 2012 г. цены в мире на зерно росли, как и на большинстве товарных рынков. С 2012 г. цены падали и стабилизировались на историческом минимуме последних лет. Данная ситуация негативно отразилась на доходах фермеров по всему миру, для российских же производителей девальвация 2014 г. несколько смягчила международную ситуацию. В настоящее время цена и спрос на зерно на мировых рынках более предсказуемы и прогнозируемы.

Кроме того, выстраивание отношений с экспортерами и иностранными предприятиями гарантирует определенные объемы продаж для компании.

Алгоритм выхода малого предприятия по производству зерна на международный рынок

Таким образом, на основании проведенных исследований особенностей экспорта зерна нами предлагается следующая методика для новых участников рынка (рис. 6).

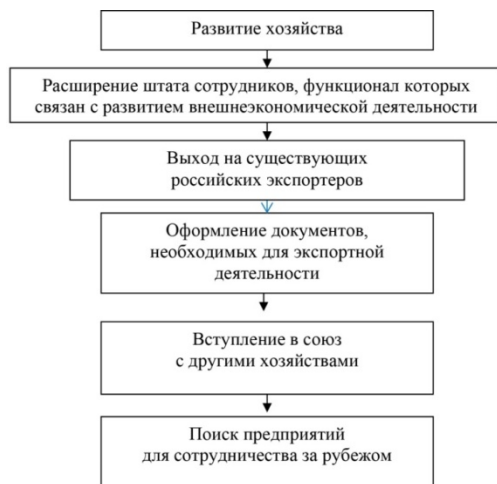


Рис. 6. Алгоритм выхода малого предприятия по производству зерна на зарубежные рынки

Первым направлением стратегического развития предприятия, стремящегося к освоению зарубежных рынков, является увеличение мощности самого хозяйства: материально-технической базы, технологии производства зерна, кадрового состава. Зачастую именно низкий уровень материально-технического оснащения препятствует стратегическому развитию современных небольших сельскохозяйственных производителей, в то время как современные технологии позволяют решить данную проблему с относительно небольшими затратами.

Так, развитие материально-технической базы сельскохозяйственных производителей можно осуществить такими видами современной техники, как культиватор «DUPORT Liquiliser», который позволяет вносить удобрения (карбидно-аммиачную смесь (КАС), сульфат аммония) на глубину 6–8 см, за счет чего растения могут питаться в течение трех недель. При этом, как показывается практика, увеличивается урожайность (до 10–15 ц/га) без увеличения затрат. Самоходный опрыскиватель «Challenger Rogator 1300C» с шириной захвата 36,5 м дает возможность дифференцированного внесения гербицидов и позволяет экономить на средствах защиты растений.

Применение нового вида удобрений также позволяет увеличить производительность производителей зерна, например, переход с гранулированных (аммиачная селитра) на жидкие удобрения (КАС 32). КПД у гранулированных удобрений при благоприятных условиях составляет 45–50 %. Эти удобрения можно вносить как поверхностно, так и непосредственно в почву. В современном сельском хозяйстве все большее распространение получает удобрение КАС 32, которое можно совмещать с использованием пестицидов в одной баковой смеси, что позволяет сократить расходы за счет снижения количества операций по уходу за растениями. Помимо затрат, КАС 32 улучшает качество зерновых за счет получения требуемых мировыми стандартами зерна товарных характеристик: показатели белка, клейковины, стекловидности и пр. С точки зрения экологичности, что на современном этапе развития общества является одним из важнейших факторов системы производства, КАС не загрязняет окружающую среду, не токсичен, также характеризуется такими показателями безопасности, как отсутствие пожаро- и взрывоопасности. Во время засухи данное удобрение улучшает потребление азота, удобен для перевозки: может транспортироваться в любых емкостях (пластиковых, нержавеющей, из углеродистых сталей).

Кроме того, для увеличения урожайности без увеличения площади полей необходима цифровизация хозяйств, а именно внедрение в деятельность GPS навигации-автопилота для дифференцированного внесения удобрений и электронной карты полей, что позволит осуществлять контроль технологического процесса через специальные приложения.

Комплексная цифровизация сельхозпроизводства позволит снизить затраты на 23 %: средняя их экономия при землепользовании с применением технологий GPS-навигации составляет 11–14 %, при дифференцированном внесении удобрений – 8–12 %, а благодаря системам параллельного вождения – 8–13 %.

Кроме того, цифровизация позволит кардинально (до 10 раз) снизить транзакционные издержки на куплю-продажу товара и упростить цепочку поставок.

Для внедрения GPS-технологий необходима аэросъемка полей хозяйств с привлечением специализированных компаний, оказывающих услуги по аэросъемке с применением беспилотной авиации. Преимуществом технологии является точное определение (погрешность 10–15 см) границ и площадей обрабатываемых участков. При этом точность данных в десятки раз превышает точность данных со спутника. Информация о рельефе местности позволяет определить необрабатываемые участки, а также проектировать мелиоративное строительство. Все полученные данные загружаются в геоинформационную систему (ГИС). Скорость обработки до 8000 га/сутки с помощью одного беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Полученные карты интегрируются в карты спутника и позволяют значительно повысить эффективность всех технологических процессов хозяйства. Более того, подобные компании не только предоставляют услуги по аэросъемке, но и с помощью специального оборудования наглядно показывают собственнику тепловую карту рельефа, карту предписаний (состояние конкретных участков земли для выбора оптимального режима внесения удобрений).

Все полученные данные могут выводиться в приложение «Система управления агропроизводством «Сторіо»», которое предназначено для оптимизации удобрения и орошения почвы и таким образом снижения количества используемых удобрений и воды. «Сторіо», вместе с информацией о погоде и данными со спутника, также делает возможным мониторинг посевов и прогноз урожайности. Несомненным преимуществом приложения является возможность его работы на всех мобильных устройствах.

После внедрения в деятельность указанных мероприятий сельскохозяйственному производителю следует оснастить всю технику GPS-датчиками для повышения эффективности ее работы за счет более точной прокладки траектории движения по полю, а также контроля.

Повысить эффективность рассмотренных технологий позволит применение беспилотных летательных аппаратов (например, «Геоскан 201 Агро») для автоматической аэрофотосъемки с БПЛА (снимки высокого разрешения, координаты центров фотографирования), автоматической обработки данных (ортофотоплан, матрица высот, карта вегетационного индекса (NDVI)) и визуализации, анализа и экспорта данных (карты уклонов, маршруты пробоотбора, файлы карт-предписаний) в действующее приложение.

Указанные мероприятия позволят увеличить в среднем урожайность хозяйств на 7–15 ц/га и уменьшить затраты на 20–30 %.

Следующим направлением развития малого хозяйства является расширение штата сотрудников. Особое внимание следует уделить развитию компетенций сотрудников, необходимых для постоянного мониторинга зарубежных рынков, в частности такого показателя, как индекс цен, а также поиска возможных партнеров за рубежом. Источниками вторичной информации при этом могут являться зарубежные справочники, котировки товарных бирж, отраслевые дайджесты и др. Также следует предусмотреть выполнение должностных обязанностей, связанных с экспортной деятельностью: оформлением необходимой документации, разработкой внешнеэкономического контракта, определением условий поставок на основе Инкотермс.

Параллельно с указанными направлениями развития для малых предприятий – производителей зерна – рекомендуется сотрудничество с состояв-

шимися экспортерами и заключение с ними агентских договоров. Это тем более актуально, что позволит приобрести опыт внешнеэкономической деятельности, а также сформировать собственную клиентскую базу. Помимо прочего, взаимодействие с опытными экспортерами сводит возможные риски к минимуму, так как работа осуществляется в форме самовывоза со склада производителя, а самим компаниям принадлежат элеваторы, портовые терминалы и транспортеры зерна.

Возможными партнерами могут быть такие экспортеры, как «Агропром-Импекс» и «Луис Дрейфус Восток» с учетом возможности заинтересовать их в таком сотрудничестве своим потенциалом.

Также следует отметить, что сотрудничество с российскими экспортерами при текущей благоприятной конъюнктуре может принести значительные выгоды: доход формируется как за счет агентского вознаграждения, так и за счет разницы между ценами производителей и биржевыми котировками. Стоимость зерновых культур на региональных рынках при условии мгновенного расчета отличается на 5–15 % от цен фьючерсных контрактов [11].

Следующим стратегическим направлением развития являются подготовка и оформление необходимой для экспортной деятельности документации. Небольшим производителям при экспорте необходимо ориентироваться на международные стандарты качества, требования которых к зерну и продуктам его переработки на порядок выше отечественных. Так, стандарты качества Европейского союза по отношению к зерновым являются основой оценки зерна при проведении всех закупочных и торговых операций на мировом рынке. Подтверждение соответствия зерна осуществляется фитосанитарными сертификатами, оформленными в соответствии с европейскими стандартами.

Для ведения внешнеэкономической деятельности с государственными агентами стран-партнеров необходима регистрация в таможенном органе, для чего оформляется пакет требуемых документов.

Помимо прочего, на каждую экспортируемую партию товаров формируется пакет документов для таможенного оформления:

- контракт, подтверждающий совершение внешнеторговой сделки;
- инвойс, спецификация, упаковочный лист;
- товарно-транспортные документы (коносамент, книжка МДП, международная автомобильная накладная (CMR), российская товарно-транспортная накладная (ТТН), авианакладная, железнодорожная накладная (международная или российская);
- документы, необходимые для осуществления валютного контроля и подтверждения таможенной стоимости товара (паспорт сделки, перевозочные, страховые документы, платежные документы);
- разрешения государственных органов.

Анализ особенностей экспортной деятельности отечественных производителей зерновых показал, что минимально интересной партией для экспорта является 100–150 тонн зерна. При отсутствии потенциала экспорта партии такого размера возможно такое направление развития хозяйства, как вступление в союз с другими сельскохозяйственными производителями. В Пензенской области в настоящее время единым представительным органом крестьянско-фермерских хозяйств и юридических лиц, занимающихся сель-

скохозяйственным производством, является Ассоциация производителей сельскохозяйственной продукции.

Основными направлениями деятельности ассоциации являются:

- представление и защита интересов сельхозпроизводителей в регионе;
- участие в информационном обеспечении сельхозтоваропроизводителей;
- содействие созданию организационных, экономических, правовых и социальных условий, необходимых для сельскохозяйственных товаропроизводителей;

- обсуждение и подготовка коллегиальных предложений по общим проблемным вопросам всех отраслей агропромышленного комплекса.

На заседаниях ассоциации рассматривается широкий спектр вопросов, связанных с ведением сельского хозяйства. В частности, обсуждаются вопросы увеличения посевных площадей, органического земледелия, новых технологий ведения хозяйственной деятельности и ряд других. Также на заседании ассоциации рассматриваются и вопросы развития экспорта зерна в Пензенской области, организации внешнеэкономической деятельности предприятий региона и использования товарных знаков при осуществлении внешнеэкономической торговли.

Таким образом, потенциальными партнерами при экспортной деятельности могут выступать в том числе и члены ассоциации.

Последним направлением стратегической деятельности предприятия по выходу на зарубежные зерновые рынки являются поиск и установление контактов с зарубежными покупателями. Исходя из того, что наиболее перспективными являются зерновые рынки Турции и Египта, следует особенно выделить крупнейших закупщиков в этих странах.

Египет – крупнейший импортер российского зерна. С начала сезона по 25 декабря 2018 г. страна увеличила закупки на 17 %, до 4,8 млн тонн по отношению к 2017 г., включая 4,7 млн тонн пшеницы. Основным импортером зерна в Египте является компания «GASC» [12]. Египетский госагент по закупкам «GASC» (трейдер) в совокупности является посредником между поставщиками (экспортерами) российского зерна (пшеницы, ячменя и т.д.) и переработчиками зерновых культур на внутреннем рынке Египта.

В Турции в качестве покупателя выступает «Зерновое агентство Турции (ТМО)». Начиная с момента своего основания в 1938 г., Турецкий зерновой совет, или «ТМО», является основной структурой, обеспечивающей стабильность рынка зерна Турции, в то же время проводя реформирование этой отрасли. Сегодня «ТМО» – автономное государственное экономическое предприятие в структуре министерства сельского хозяйства Турции, со штаб-квартирой в Анкаре.

Основная роль «ТМО» на рынке зерна – интервенции, закупка зерна у фермеров, когда рыночные цены на него опускаются значительно ниже стоимости производства. Объемы зерновых закупок «ТМО» варьируются из года в год в зависимости от рыночной ситуации. Для обеспечения мукомольных предприятий сырьем «ТМО» также проводит импорт зерна, а когда внутренние запасы зерна в Турции становятся чрезмерными – его экспорт.

Структура «ТМО» состоит из 28 региональных офисов, оперирующих разными по объему, времени постройки и оснащению мощностями по хранению зерна общей мощностью около 4 млн тонн, включая портовые. Для обеспечения своих импортно-экспортных операций «ТМО» использует пор-

товые элеваторы и склады мощностью 528 тыс. тонн. Эти терминалы расположены в разных портах Черного, Мраморного и Средиземного морей.

Основным преимуществом работы с указанными компаниями является более высокая, по сравнению с текущей, прибыль. Но возможным ограничением для небольшого сельскохозяйственного производителя могут стать значительные партии закупки зерна (от 100 тонн), недостаток внешнеторгового опыта и соответствующего документационного обеспечения. Так как указанные компании являются государственными, все закупки проводятся в виде тендеров, правила участия в которых также следует изучить и вменить в обязанности штата сотрудников.

Однако есть и ряд рисков, связанных с работой с указанными предприятиями. Во-первых, есть вероятность того, что существующие экспортеры будут всячески мешать появлению нового контрагента. Во-вторых, доставка зерна будет осуществляться до порта вывоза, что влечет за собой взаимодействие с транспортными компаниями и связанными с этим рисками.

Однако есть и еще возможности для поиска более мелких покупателей в указанных странах для прямой работы с ними. Это предприятия, заинтересованные в прямых поставках от российских зернопроизводителей, встречи с представителями указанных предприятий, возможно, в том числе и на крупных сельскохозяйственных выставках, проводимых как в России, так и за рубежом (табл. 2).

Таблица 2

Некоторые международные сельскохозяйственные выставки

Название выставки	Место проведения	Время проведения
AgroExpo Uzbekistan/ Agrotech Expo	Ташкент, Узбекистан, Uzexpocentre	Июнь
Agro-Tech Minikowo	Миниково, Польша, Kujawsko – Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego	Июнь
Белагро	Беларусь, Минск, ТЛЦ «Глобус Парк»	Июнь
Агрорусь	Россия, Санкт-Петербург, Ленинградская область, КВЦ «Экспофорум»	Июль
Farmer	Молдова, Кишинев, I.E.C. Moldexpo	Октябрь

Первоначальное участие в указанных выставках возможно в качестве посетителя, что не повлечет значительных затрат, с разработкой для этих целей специального коммерческого предложения и комплекта печатно-полиграфической продукции.

Выводы

Таким образом, на основе проведенных исследований рынка зерна, в том числе мирового, динамики производства и потребления, а также отечественного экспорта зерновых разработана методика выхода малого производителя зерна на зарубежные рынки, даны четкие рекомендации стратегического развития конкретных направлений деятельности с учетом ограниченности потенциала предприятия малого бизнеса: развитие материально-технической базы, совершенствование технологических процессов ве-

дения деятельности хозяйства, расширение штата сотрудников, выход на существующих российских экспортеров, подготовка и оформление документов для ведения ВЭД, вступление в союз с другими сельхозпроизводителями и поиск предприятий за рубежом для сотрудничества.

Библиографический список

1. Итоги года на внутреннем рынке зерна в России: перепроизводство и планы на будущее. – URL: <http://svetich.info/publikacii/analitika/itogi-goda-na-vnutrennem-rynke-zerna-v-r.html>
2. Чернышева, А. Рынок зерна в России в настоящее время показывает положительную динамику роста / А. Чернышева. – URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/rynok-zerna-v-rossii-v-nastoyashchee-vremya-pokazyvaet-polozhitelnuyu-dinamiku-rosta.html>
3. Попова, Е. А. Методика разработки международной стратегии развития компании / Е. А. Попова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – № 1 – С. 72–80.
4. Беспехотный, Г. В. Программно-целевое планирование и проектное управление в сельском хозяйстве / Г. В. Беспехотный // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2. – С. 3–18. – URL: <https://mss.pnzgu.ru/mss1218>
5. Ветелкин, Г. В. Рынок зерна России и его перспективы / Г. В. Ветелкин // Современные методы, средства и нормативы в области оценки качества зерна и зернопродуктов : сб. материалов 14-й Всерос. науч.-практ. конф. (5–9 июня 2017 г., г. Анапа). – Анапа : КФ ФГБНУ «ВНИИЗ», 2017. – С. 16–21.
6. О зерне : федер. закон РФ № 4973-1 [принят 14.05.1993].
7. Итоги года 2018. Рынок зерна. – URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/itogi-goda-2018-rynok-zerna.html>
8. Акулиничев, А. Крупнейшие зернотрейдеры: работа напрямую как гарантия успеха / А. Акулиничев. – URL: <https://rynok-apk.ru/articles/plants/krupnejshie-zernotrejdery/>
9. Павенский, И. Топ-30 экспортеров зерна. Рынок разгрузили на 53 млн тонн / И. Павенский. – URL: <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/30049-top-30-eksporterov-zerna/>
10. Российские трейдеры создают новый союз экспортеров зерна. – URL: <http://zerno.ru/node/4800>
11. О ценах на зерновые культуры: итоги 2018 – начало 2019 г. – URL: <http://prostor-group.ru/news/87/>
12. Экспортеры России: информационный портал. – URL: <http://www.rusexporter.ru/research/ved/8092>

References

1. *Itogi goda na vnutrennem rynke zerna v Rossii: pereproizvodstvo i plany na budushchee* [Results of the year on the domestic grain market in Russia: overproduction and future plans]. Available at: <http://svetich.info/publikacii/analitika/itogi-goda-na-vnutrennem-rynke-zerna-v-r.html> [In Russian]
2. Chernysheva A. *Rynok zerna v Rossii v nastoyashchee vremya pokazyvaet polozhitel'nyuyu dinamiku rosta* [The grain market in Russia is currently showing positive growth dynamics]. Available at: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/rynok-zerna-v-rossii-v-nastoyashchee-vremya-pokazyvaet-polozhitelnuyu-dinamiku-rosta.html> [In Russian]
3. Popova E. A. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society]. 2015, no. 1, pp. 72–80. [In Russian]
4. Bepakhotnyy G. V. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society]. 2018, no. 2, pp. 3–18. Available at: <https://mss.pnzgu.ru/mss1218> [In Russian]

5. Vetelkin G. V. *Sovremennye metody, sredstva i normativy v oblasti otsenki kachestva zerna i zerno-produktov: sb. materialov 14-y Vseros. nauch.-prakt. konf. (5–9 iyunya 2017 g., g. Anapa)* [Modern methods, tools and standards in the field of grain and grain products quality assessment: collection of materials of the 14th all-Russia. scientific-practical Conf. (June 5-9, 2017, Anapa)]. Anapa: KF FGBNU «VNIIZ», 2017, pp. 16–21. [In Russian]
6. *O zerne : feder. zakon RF № 4973-1 [prinyat 14.05.1993]* [About the grain : Feder. law of the Russian Federation No. 4973-1 [adopted on 14.05.1993].]. [In Russian]
7. *Itogi goda 2018. Rynok zerna* [Results of the year 2018. Grain market]. Available at: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/itogi-goda-2018-rynok-zerna.html> [In Russian]
8. Akulinichev A. *Krupneyshie zernotreydery: rabota napryamuyu kak garantiya uspekha* [Major grain traders: working directly as a guarantee of success]. Available at: <https://rynok-apk.ru/articles/plants/krupneyshie-zernotrejdery/> [In Russian]
9. Pavenskiy I. *Top-30 eksporterov zerna. Rynok razgruzili na 53 mln tonn* [Top 30 exporters of grain. The market was unloaded by 53 million tons]. Available at: <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/30049-top-30-eksporterov-zerna/> [In Russian]
10. *Rossiyskie treydney sozdayut novyy soyuz eksporterov zerna* [Russian traders create a new Union of grain exporters]. Available at: <http://zerno.ru/node/4800> [In Russian]
11. *O tsenakh na zernovye kul'tury: itogi 2018 – nachalo 2019 g.* [About prices for crops: the end of 2018 – beginning of 2019.]. Available at: <http://prostor-group.ru/news/87/> [In Russian]
12. *Eksportery Rossii: informatsionnyy portal* [Exporters Of Russia: information portal]. Available at: <http://www.rusexporter.ru/research/ved/8092> [In Russian]

Попова Елена Александровна

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра менеджмента и экономической
безопасности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: elenapopova09@yandex.ru

Popova Elena Alexandrovna

candidate of economical sciences,
associate professor,
sub-department of management
and economic security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бижанова Евгения Михайловна

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра маркетинга, коммерции
и сферы обслуживания,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: elenapopova09@yandex.ru

Bijanova Evgenia Mikhailovna

candidate of economical sciences,
associate professor,
sub-department of marketing,
business and services,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Зинченко Светлана Владимировна

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра маркетинга, коммерции
и сферы обслуживания,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: elenapopova09@yandex.ru

Zinchenko Svetlana Vladimirovna

candidate of economical sciences,
associate professor,
sub-department of marketing,
business and services,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Попова, Е. А. Разработка методики выхода малого предприятия на международный рынок зерна / Е. А. Попова, Е. М. Бижанова, С. В. Зинченко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 50–67. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИОРИТЕТОВ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В РАЗВИТИЕ СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. Г. Коваленко, Ю. Ю. Пронина, А. А. Князькина

MODELLING OF PRIORITIES OF INVESTMENT INTO DEVELOPMENT OF RURAL TERRITORIES OF THE PENZA REGION

E. G. Kovalenko, Y. Y. Pronina, A. A. Knyazkina

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Сохранение, обновление и совершенствование сельских территорий является одной из существенных составляющих современной аграрной политики. Актуальность данного направления усиливается тем, что сельские территории определяют не только состояние и динамику сельскохозяйственного производства, но и демографическую, пространственную, геополитическую, национальную и культурную составляющие развития страны. Инвестиции в сельское развитие, осуществляемые по приоритетным направлениям, которые определены с помощью научно обоснованных методов, становятся основным механизмом сохранения и развития сельских территорий. *Методы.* Исследовательские задачи были реализованы путем применения следующих научных методов: научной абстракции, функционального и статистического анализа, графических изображений, метода Дельфи, стратегического таргетирования. Данная научная основа позволила сопоставить важность проблем сельского развития с приоритетными направлениями инвестирования в сельские территории. *Результаты и выводы.* Анализ стратегических проблем Пензенской области выявил наиболее важные проблемы развития сельских территорий Пензенской области в сфере качества жизни сельских жителей, их благосостояния, обеспеченности инфраструктурой, бизнес-среды и соотнести их с приоритетными направлениями инвестирования. Основные направления инвестирования в развитие сельских территорий должны касаться вопросов стимулирования агробизнеса, в том числе малого, грантовой поддержки организаций, реализующих социальные программы на селе, строительство дорожной сети, агротехнопарков, вложения в социокультурные эндаумент и бизнес-проекты.

Ключевые слова: сельские территории, инвестирование, стратегические приоритеты, фреймворк, социокультурные проекты, стратегические императивы.

Abstract. *Subject and goals.* Preservation, updating and improvement of rural territories is one of essential components of modern agrarian policy. The relevance of this direction amplifies the fact that rural territories define not only a state and dynamics of agricultural production, but also the demographic, spatial, geopolitical, national and cultural making development countries. The investments into rural development which are carried out in the priority directions which are defined by evidence-based methods become the main mechanism of preservation and development of rural territories. *Methods.* Research tasks were realized by application of the following scientific methods: scientific abstraction, functional and statistical analysis, graphics, Delfi method, strategic targeting. This scientific basis allowed to compare importance of problems of rural development with the priority directions of investment into rural territories. *Results and conclusions.* The analysis of strategic problems of the Penza region revealed the most important problems of develop-

ment of rural territories of the Penza region in the sphere of quality of life of villagers, their welfare, security with infrastructure, business environments and to correlate them to the priority directions of investment. The main directions of investment into development of rural territories have to concern questions of stimulation of agrobusiness, including small, grant support of the organizations implementing social programs in the village, construction of a road network, agrosience and technology parks, investments in sociocultural an endowment – and business projects.

Keywords: rural territories, investment, strategic priorities, framework, sociocultural projects, strategic imperative.

Введение

Государственная политика, направленная на устойчивое развитие сельских территорий, призвана решить ряд проблем экономического, социального, демографического характера при условии сохранения и развития природно-ресурсного, социально-экономического, историко-культурного и рекреационного потенциала сельской местности. Однако ускоряющиеся темпы инновационного развития экономики и регионов оказывают решающее влияние на желание людей оставаться жить в сельской местности и вести там хозяйственную, культурную, просветительскую и иную деятельность. В этой связи важна выработка стратегических приоритетов, направленных на гармонизацию интересов субъектов инвестиционного механизма развития сельских территорий: государственных органов власти, инвестиционных институтов, сельского предпринимательства и населения сельских территорий, а также организацию их гибкого взаимодействия.

Необходимость моделирования приоритетов инвестирования в развитие сельских территорий

Как известно, любые стратегии формируются как набор конкретных вариантов развития объектов стратегического планирования [1–3], однако, учитывая колебания факторов внешней среды и усиливающееся давление конкурентных сил, разработанные варианты должны обеспечивать возможность гибкого реагирования на возможности и угрозы извне, избегания или уменьшения неожиданных рисков, а также безболезненную возможность перехода от одного сценария к другому в случае возникновения такой необходимости. Основная проблема реализации современной Стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 г. состоит в фрагментарной имитации отдельных положений федеральной целевой программы «Устойчивое развитие сельских территорий на 2014–2017 годы и на период до 2020 года» [4] и «Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года» [5]. Цель действенной стратегии – выработать набор взаимоувязанных решений, способных преодолеть деградацию и инертность такой консервативной системы, как сельские территории, и заставить ее развиваться ускоренными темпами, обеспечивая необходимую степень противодействия давлению конкурентных факторов внешней среды. С одной стороны, мы должны предусмотреть все сложности возникающих проблем инвестиционного механизма развития сельских территорий, с другой стороны – нам следует выработать такие стратегические приоритеты, достижение которых опосредовано про-

стотой выполнения поставленных задач, чтобы не противодействовать желанию субъектов механизма участвовать в реализации намеченных вариантов стратегии развития сельских территорий. Именно для этого некоторые ученые, специализирующиеся на проблемах стратегического менеджмента, предлагают вырабатывать так называемые стратегические приоритеты [6], являющиеся своего рода «мостом», позволяющим перейти от общей стратегии к намеченным результатам.

Разработка модели определения приоритетных направлений развития сельских территорий

При определении приоритетных направлений развития сельских территорий в соответствии со стратегическими приоритетами развития Пензенской области мы исходили из важного правила, что они должны быть ограничены небольшим числом вариантов реализации, чтобы выбор не был затруднен, и соответствовали следующим критериям:

- 1) выбранные приоритеты могут служить компромиссом, если возникают конфликтующие цели;
- 2) по выбранным приоритетам реально организовать конкретные мероприятия в течение 3–5 лет, чтобы не затягивалось достижение цели;
- 3) выбранные приоритеты создают условия для развития сельских территорий в будущем, а не закрепляют существующее положение дел;
- 4) приоритеты достаточно конкретны, чтобы представители законодательства и органов исполнительной власти могли понимать ориентиры реализуемых стратегий, планировать показатели и достигать их, так как по выбранным приоритетам можно установить метрики;
- 5) невозможна рассогласованность заинтересованных лиц в векторах обозначенных приоритетов.

Особую роль приобретают модели определения стратегических приоритетов в целях определения их эффективности. Существует множество данного рода методик, в основе которых лежит метод приоритетов, заключающийся в ранжировании приоритетов по выбранному признаку (критерию) при условии различных сочетаний этих признаков. В нашем случае в качестве признаков могут выступать заранее обозначенные стратегические и тактические цели развития сельских территорий. Основная проблема данного метода заключается в необходимости составления сложных математических моделей, ограничивающих широкое применение метода приоритетов. Это требует привлечения специалистов, не всегда удается формализовать мнения экспертов по отдельным вопросам, не все цели поддаются объективной критериальной оценке. Это требует поиска альтернативных методов оценки стратегических приоритетов в целях определения их эффективности.

Одним из наиболее подходящих, на наш взгляд, методических подходов к оценке стратегических приоритетов является фреймворк Иана Макаллистера [7], основанный на сочетании интересов и возможностей системы по реализации стратегии. Используя данный метод моделирования стратегических приоритетов, сформируем следующий алгоритм их оценки и выбора (рис. 1).

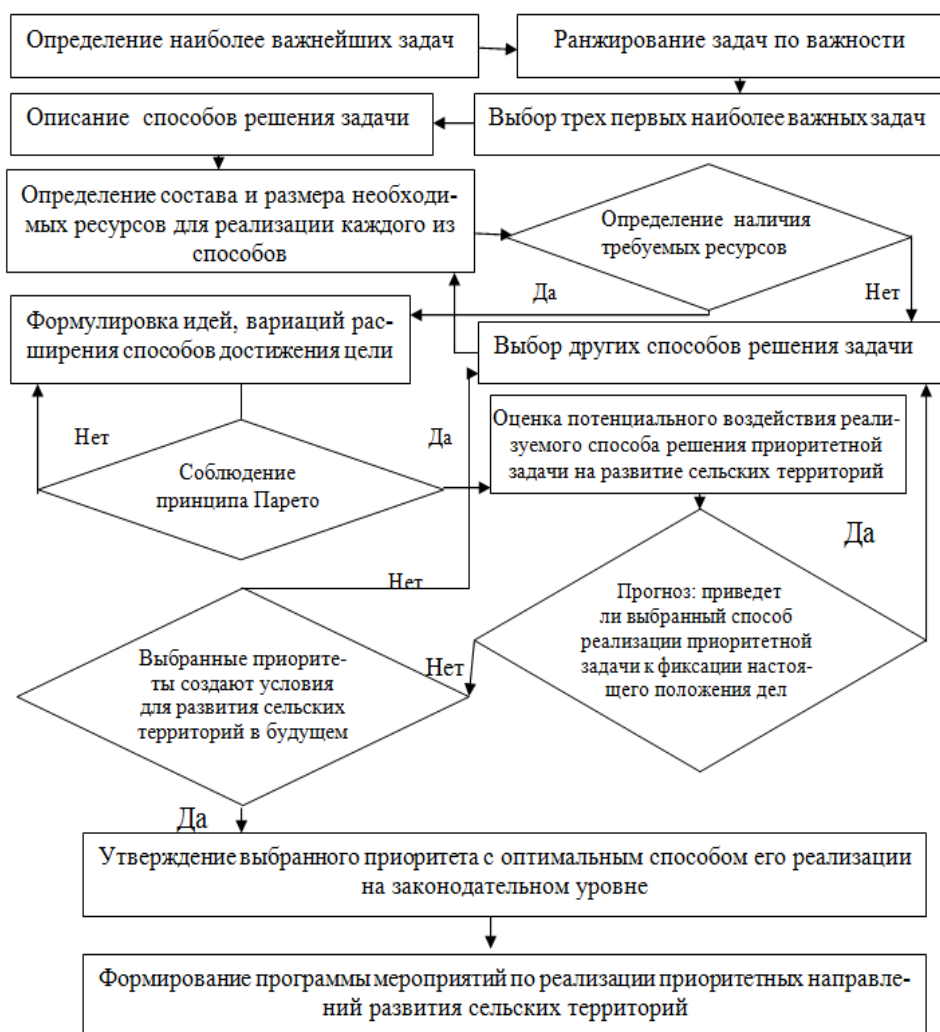


Рис. 1. Алгоритм оценки и выбора стратегических приоритетов развития сельских территорий с использованием методического подхода Иана Макаллистера

Основу подхода составляют следующие принципы (рис. 2).

Методика экспертной оценки стратегических императив и ее реализация на практике

В модели предполагается использование мнения квалифицированных экспертов и их оценок относительно ресурсных потребностей и эффективности разработанных мероприятий, а также самих мероприятий в рамках приоритетных направлений. В качестве экспертов нами были привлечены специалисты Министерства сельского хозяйства Пензенской области, отдела проектной деятельности Правительства Пензенской области (Проектного офиса), главы муниципалитетов, специалисты районных управлений сельского хозяйства (всего 30 человек). В соответствии со стратегическими направлениями развития сельских территорий, определенных экспертами, и методом мозгового штурма 11 экспертов (представители Министерства и

Проектного офиса) был разработан перечень мероприятий, наиболее полно отвечающих реализации выбранных направлений. Всем экспертам были розданы анкеты с перечнем мероприятий и просьбой оценить их результативность по принципу соотношения затрат на их реализацию с возможным эффектом по десятибалльной шкале от 1 до 10. Затем посредством создания модели ранжирования в Microsoft был определен перечень наиболее эффективных в перспективе мероприятий, требующих совершенствования инвестиционного инструментария и способствующих в наибольшей мере, по мнению экспертов, развитию сельских территорий.

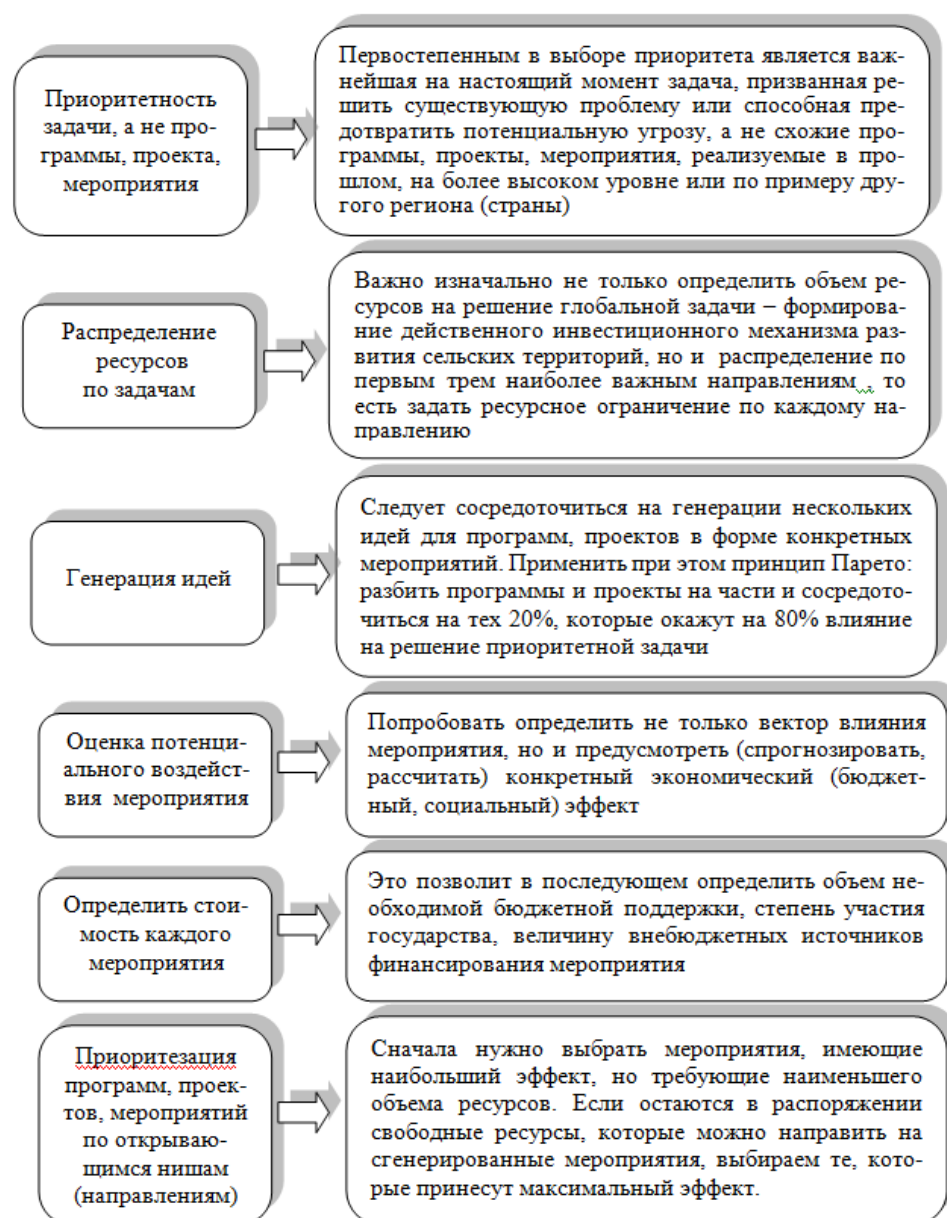


Рис. 2. Принципы фреймворка Иана Макаллистера в отношении выделения приоритетов инвестиций в сельское развитие

Стратегически важными приоритетными направлениями определены:

1. Содействие развитию нетрадиционных для Пензенской области, но набирающих обороты видов деятельности в сельской местности:

– в сфере аграрного бизнеса – производство меда, мяса кроликов и водоплавающей птицы, пушное звероводство, рыбное хозяйство;

– в сфере социокультурного развития – открытие рекреационных зон в сельской местности, агроусадеб, сельских зоопарков, развитие агротуризма;

– в сфере инновационного развития – создание агротехнопарков;

2. Создание позитивного имиджа сельских территорий как места проживания и ведения бизнеса;

3. Привлечение инвестиций в сельскую местность на реализацию проектов переработки сельскохозяйственной продукции.

Соответственно рейтингу по данным направлениям выбраны следующие мероприятия:

1) организация регионального бренда пищевой продукции переработки сельскохозяйственного сырья (например «Сурская самобранка»);

2) грантовая поддержка начинающих фермеров, специализирующихся на производстве меда, мяса кроликов и водоплавающей птицы, пушном звероводстве, рыбном хозяйстве;

3) финансирование создания и функционирования агротехнопарков;

4) разработка программы агротуризма, софинансирование мероприятий по организации объектов агротуризма и обеспечивающей их инфраструктуры, популяризация агротуризма;

5) грантовая поддержка НКО, реализующих проекты, способствующие обеспечению и повышению занятости пенсионеров и лиц с ОВЗ в производстве и социокультурных проектах сельских территорий.

Процесс приоритизации был дополнен точками приложения усилий в отношении конкретных мероприятий с позиций географического местоположения и концентрации востребованности в данном мероприятии. Это достигается путем стратегического фокусирования, представляющего собой выделение целевых сегментов, ниш, на которых реализация приоритетных стратегических направлений станет наиболее успешной.

Стратегическое фокусирование осуществляется на основе типизации сельских территорий по ряду признаков посредством метода группировок, кластерного анализа, математических реконструктивных техник. Данные методы можно сочетать. В частности, изначально сформировать нестатистическую модель реконструктивной задачи [8], в которой изучаемый объект как гладкое геометрическое образование (в произвольной форме) ν условно будет находиться в заранее очерченном пространстве территории региона $S_{\text{по}}$ (площадь Пензенской области) и обладать размерностью $S_{\text{ф}}$. Для каждого образования ν характерна группа условий (или факторов) $\omega_1, \omega_2, \omega_n$, формирующих среду образования $I\omega(\omega_1, \omega_2, \omega_n)$. На основе определенной площади территории $S_{\text{ф}}$ и с учетом факторов территории образования $\omega_{\text{ф}}$ определяются ресурсы на реализацию стратегической альтернативы As . Стратегическое фокусирование будет впоследствии осуществляться на основе доказательства гипотезы о том, является ли стратегическая альтернатива As подходящей для образования ν с точки зрения приемлемости условий образования, а также достаточности (или приемлемости размера расходов) ресурсов на реализацию

стратегической альтернативы *Аз*. Для проверки гипотезы мы использовали методы кластерного анализа при осуществлении структурирования инвестиционного потенциала сельских территорий в целях определения в последующем стратегических императив (стратегическое таргетирование).

Итоги экспертной оценки стратегических императив

Экспертами были не только определены точки стратегического таргетирования, но и оценены примерные бюджетные затраты на реализацию данных мероприятий при осуществлении инвестирования из всех источников (табл. 1). Также было сделано предположение, что по опыту реализации подобных мероприятий софинансирование из внебюджетных источников составляет от 20 до 50 %, что нашло свое отражение в планировании инвестиционных затрат на реализацию мероприятий из средств бюджета и средств инвесторов. Это определено в соответствии с опытом других регионов, нормативно-правовой базой, которая определяет софинансирование вложений из внебюджетных источников в социокультурные эндаумент-проекты на уровне от 0 до 20 %, в бизнес-проекты – от 50 до 100 % [9].

Таблица 1

Примерные затраты на реализацию приоритетных мероприятий
по совершенствованию инвестиционного механизма развития
сельских территорий

Наименование мероприятия	Стоимость мероприятия (по оценкам экспертов), тыс. руб.	Средства регионального и муниципальных бюджетов, тыс. руб.	Вне-бюджетные источники, тыс. руб.	Соотношение источников софинансирования (бюджетные средства / внебюджетные средства), %
1	2	3	4	5
Организация регионального бренда пищевой продукции переработки сельскохозяйственного сырья (например, «Сурская самобранка»)	4800	3840	960	80/20
Грантовая поддержка начинающих фермеров, специализирующихся на производстве меда, мяса кроликов и водоплавающей птицы, пушном звероводстве, рыбном хозяйстве	200 000	180 000	20 000	90/10

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Финансирование создания и функционирования агротехнопарков	1 800 000	1 800 000	–	100/0
Разработка программы агротуризма, софинансирование мероприятий по организации объектов агротуризма, обеспечивающей их инфраструктуры, популяризация агротуризма	800 000	640 000	160 000	80/20
Грантовая поддержка НКО, реализующих проекты, способствующих обеспечению и повышению занятости пенсионеров и лиц с ОВЗ в производстве и социокультурных проектах сельских территорий	1 400 000	700 000– 1 400 000	0– 7 000 000	от 0 до 100/ от 0 до 50

Итого по стратегически приоритетным мероприятиям императивы оцениваются в сумму примерно 4204,8 млн рублей. Бюджетные расходы при условии софинансирования программ в размерах, указанных в табл. 1, составят 3323,84–4023,84 млн рублей, внебюджетные средства за счет участников мероприятий – 180,96–880,96 млн рублей.

Заключение

Таким образом, используя предложенную нами модель стратегического планирования и стратегического таргетирования, были определены не только наиболее перспективные направления инвестирования в сельское развитие, но и наиболее значимые мероприятия, инвестирование по которым сможет принести наиболее значимый эффект.

Библиографический список

1. Ансофф, И. Стратегическое управление / И. Ансофф. – Москва, 1989. // Электронная публикация: Центр гуманитарных технологий. – 2012. – URL: <https://gtmarket.ru/laboratory/basis/4155>

2. Andrews, K. R. *The Concept of Corporate Strategy* / K. R. Andrews. – Homewood : Richard D. Irwin, Inc., 1980. – 180 p.
3. Омаёе, К. Мышление стратега: Искусство бизнеса по-японски / К. Омаёе ; пер. с англ. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 215 с.
4. Федеральная целевая программа «Устойчивое развитие сельских территорий на 2014–2017 годы и на период до 2020 года» (утв. Постановлением Правительства РФ от 15 июля 2013 г. № 598). – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70319016/>
5. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190
6. Sull, D. *Turning Strategy Into Results* / D. Sull, S. Turconi, C. Sull, J. Yoder. – URL: <https://sloanreview.mit.edu/article/turning-strategy-into-results>
7. McAllister, I. What are the best ways to prioritize a list of product features? / I. McAllister. – URL: <https://www.quora.com/What-are-the-best-ways-to-prioritize-a-list-of-product-features/answer/Ian-McAllister>
8. Webb, A. *Statistical pattern recognition* / A. Webb. – Wiley : Chichester, UK, 2002.
9. Полушкина, Т. М. Концептуальные основы развития системы государственного регулирования сельского хозяйства на региональном уровне / Т. М. Полушкина, Ю. Ю. Пронина, Г. И. Дубина // Регион, экономика: теория и практика. – 2019. – Т. 17, № 1 (460). – С. 153–168.

References

1. Ansoff I. *Strategicheskoe upravlenie* [Strategic management]. Moscow, 1989. Electronic Publication: Humanitarian Technology Center. 2012. Available at: <https://gtmarket.ru/laboratory/basis/4155> [In Russian]
2. Andrews K. R. *The Concept of Corporate Strategy*. Homewood: Richard D. Irwin, Inc., 1980, 180 p.
3. Omaye K. *Myshlenie stratega: Iskuststvo biznesa po-yaponski* [Strategist thinking: the Art of business in Japanese]; transl. from Engl. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2007, 215 p. [In Russian]
4. *Federal'naya tselevaya programma «Ustoychivoe razvitie sel'skikh territoriy na 2014–2017 gody i na period do 2020 goda»* (utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 15 iyulya 2013 g. № 598) [Federal target program "Sustainable development of rural territories for 2014-2017 and for the period up to 2020" (approved By decree of the Government of the Russian Federation No. 598 of July 15, 2013).]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70319016/> [In Russian]
5. *Prognoz dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190 [In Russian]
6. Sull D., Turconi S., Sull C., Yoder J. *Turning Strategy Into Results*. Available at: <https://sloanreview.mit.edu/article/turning-strategy-into-results>
7. McAllister I. *What are the best ways to prioritize a list of product features?* Available at: <https://www.quora.com/What-are-the-best-ways-to-prioritize-a-list-of-product-features/answer/Ian-McAllister>
8. Webb A. *Statistical pattern recognition*. Wiley: Chichester, UK, 2002.
9. Polushkina T. M., Pronina Yu. Yu., Dubina G. I. *Region, ekonomika: teoriya i praktika* [Region, economy: theory and practice]. 2019, vol. 17, no. 1 (460), pp. 153–168. [In Russian]

Коваленко Елена Георгиевна

доктор экономических наук, профессор,
заведующий кафедрой государственного
и муниципального управления,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевикская, 68)
E-mail: kovelena13@mail.ru

Kovalenko Elena Georgiyevna

doctor of economical sciences, professor,
head of sub-department of public
and municipal administration,
National Research Mordovia
State University named after N. P. Ogarev
(68 Bol'shevistskaya street, Saransk,
Republic of Mordovia, Russia)

Пронина Юлия Юрьевна

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра менеджмента
и экономической безопасности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chastuhina@mail.ru

Pronina Yulija Yurjevna

candidate of economical sciences,
associate professor,
sub-department of management
and economic security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Князькина Альбина Александровна

старший преподаватель,
кафедра менеджмента
и экономической безопасности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: albinakna@yandex.ru

Knyazkina Albina Aleksandrovna

senior teacher,
sub-department of management
and economic security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Коваленко, Е. Г. Моделирование приоритетов инвестирования в развитие сельских территорий Пензенской области / Е. Г. Коваленко, Ю. Ю. Пронина, А. А. Князькина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 68–77. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-5.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

УДК 615.47:616–072.7

DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-6

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ЭПИКАРДА

М. Н. Крамм

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SELECTING THE ELECTRODES NUMBER ON RESULTS OF RECONSTRUCTION OF ELECTRICAL POTENTIAL DISTRIBUTION ON THE EPICARD SURFACE

M. N. Kramm

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Целью работы является повышение пространственного разрешения при анализе электрической активности сердца путем реконструкции карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. Используются электрокардиосигналы многоэлектродной системы на поверхности торса человека и геометрические характеристики поверхности торса. Рассматривается вопрос о влиянии выбора количества электродов на результаты реконструкции карты распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. На примере модельной задачи проводится сравнение карт электрического потенциала, полученных путем реконструкции по потенциалам на поверхности торса, и карт, полученных прямым расчетом. Исследование актуально в задачах повышения информативности электрокардиографических обследований путем реконструкции параметров эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). *Методы.* В рамках модели электрической активности сердца с неоднородностями различных размеров анализируются карты распределения электрического потенциала на эпикарде, полученные путем решения обратной задачи по потенциалам, зарегистрированным на поверхности торса. *Результаты и выводы.* Проведено сравнение карт электрического потенциала на поверхности эпикарда, полученных путем реконструкции по потенциалам на поверхности торса, и карт, полученных прямым расчетом. Рассмотрено влияние выбора количества электродов на результаты реконструкции карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. Получены оценки количества электродов для различных размеров неоднородностей в распределении потенциала. Необходимое для регистрации потенциала количество электродов и оптимальный коэффициент регуляризации существенно зависят от размера неоднородности на карте распределения потенциала. Для реконструкции неоднородностей размером 3 см и более достаточное число электродов порядка 40, для более мелких неоднородностей – до 60 и более.

Ключевые слова: карта распределения электрического потенциала, электроды, торс, эпикард, реконструкция, коэффициент регуляризации.

© Крамм М. Н., 2020

Abstract. Subject and goals. The aim of this study is to increase spatial resolution in the analysis of the heart electrical activity by reconstructing the maps of the electric potential distribution on the epicardium surface. The electrocardiograms of the multi-electrode system on the human torso surface and the geometric characteristics of the torso surface are used. We consider the influence of the choice of the electrodes number on the results of reconstruction of the electric potential distribution map on the epicardium surface. Using the model object, as an example, we compare the electric potential maps obtained by reconstruction according to potentials on the torso surface and the maps obtained by direct calculation. The study is relevant in the tasks of increasing the information content of electrocardiographic examinations by reconstructing the parameters of an equivalent electric heart generator (EEHG). **Methods.** In the framework of the model of heart electrical activity with inhomogeneities of various sizes, we analyze maps of the electric potential distribution on the epicardium, obtained by solving the inverse problem under potentials, recorded on the torso surface. **Results and conclusions.** We present the results of comparing electric potential maps on the epicardium surface, obtained by reconstruction according to potentials on the torso surface, and the maps, obtained by direct calculation. The influence of the choice of the electrodes number on the results of reconstruction of the electric potential distribution map on the epicardium surface is considered. Estimates of the number of electrodes for various sizes of inhomogeneities in the potential distribution are obtained. The number of electrodes required for recording the potential and the optimal regularization coefficient substantially depend on the size of the inhomogeneity on the potential distribution map. For reconstruction of inhomogeneities of 3 cm or more in size, a sufficient number of electrodes is of the order of 40, for smaller inhomogeneities – up to 60 or more.

Keywords: electric potential distribution map, electrodes, torso, epicardium, reconstruction, regularization coefficient.

Введение

Одной из значимых задач электрокардиологии является повышение информативности электрокардиографических (ЭКГ) обследований с помощью многоэлектродных отведений. Известны работы по картированию электрического потенциала на поверхности торса [1, 2]. Однако при переходе от электрических источников миокарда к потенциалам на поверхности торса происходит потеря мелких деталей в связи с эффектом подавления верхних пространств частот потенциала [3, 4]. Отсюда вытекает актуальность обратной задачи электрокардиографии, которая ориентирована на реконструкцию эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС), в частности карт потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ) по электрическим потенциалам на поверхности торса, зарегистрированным с помощью многоэлектродной системы кардиоотведений [5, 6]. Для целей ранней диагностики нарушений в процессах распространения возбуждения и реполяризации в миокарде важно располагать картами распределения параметров электрической активности на поверхности сердца для различных моментов времени кардиоцикла.

Рассматривается многоэлектродная программно-аппаратная ЭКГ система, содержащая 40–80 электродов, размещенных равномерно на поверхности торса [4]. Система включает блок регистрации многоканальных электрокардиосигналов (ЭКС), блок предварительной обработки ЭКС, блок определения координат электродов, блок интерполяции координат и потенциалов на поверхности торса, блок реконструкции ЭЭГС, блок визуализации.

Поскольку задача реконструкции КППЭ относится к обратным задачам электрокардиографии, решение обладает определенной неустойчивостью, когда малые погрешности в представлении данных (потенциалы на поверхности торса, погрешности дискретизации) и погрешности в геометрических па-

параметрах задачи могут приводить к заметным погрешностям в оценке пространственно-временной динамики сердца [7, 8]. В этих условиях решающее значение приобретает вопрос качества представления исходных данных и прежде всего вопрос выбора количества электродов для адекватного представления распределения потенциала на поверхности торса. Данную задачу необходимо рассматривать совместно с оптимизацией режима реконструкции при решении обратной задачи с помощью регуляризующих алгоритмов [7, 9]. В настоящей работе использовался метод усеченного сингулярного разложения (TSVD), который потенциально имеет схожие свойства с методом регуляризации Тихонова [9, 10].

Метод реконструкции карты потенциалов на поверхности эпикарда

Исходными данными для обработки являются записи электрокардио-сигналов многоканальных кардиоотведений. Электроды располагаются на поверхности торса с помощью надеваемого на торс «многоэлектродного жилета» (см., например, [4, 5]). Для получения КППЭ надо провести реконструкцию ЭЭГС, располагая записанными потенциалами с электродов на поверхности торса для сетки моментов времени кардиоцикла. После интерполяции записанных потенциалов в текущий момент времени на мелкой сетке на поверхности торса получаем вектор $\phi^b = [\phi_1^b, \phi_2^b, \dots, \phi_{N_b}^b]$, где N_b – количество точек дискретизации поверхности торса [11], $N_b \approx 10^3$. Эквивалентный электрический генератор сердца поверхностного типа характеризуется распределениями электрического потенциала $\phi^h = [\phi_1^h, \phi_2^h, \dots, \phi_{N_h}^h]$ и нормальной производной электрического потенциала $g^h = [\partial\phi_1^h/\partial n, \partial\phi_2^h/\partial n, \dots, \partial\phi_{N_h}^h/\partial n]$ на поверхности эпикарда [11, 12], $N_h \approx 10^3$ – количество точек на мелкой сетке на поверхности эпикарда. Связь между этими распределениями и регистрируемым распределением потенциала на поверхности торса имеет интегральный характер и вытекает из уравнения Лапласа для области между поверхностями эпикарда и торса [8, 12]. Интегральные соотношения можно свести к системе матричных линейных алгебраических уравнений, в которых матрицы связывают ϕ^h и g^h с ϕ^b . Итерационная процедура решения этой системы уравнений [4] предполагает вычисление обратных матриц (обращение матриц) и в предлагаемом варианте обращение матрицы G^{hb} с элементами $G_{ij}^{hb} = (1/R_{ij})\Delta S_j^h$, где ΔS_j^h – площадь элементов поверхности эпикарда; R_{ij} – расстояние между элементами поверхностей торса и эпикарда с номерами i и j .

Матрица G^{hb} является плохо обусловленной с коэффициентом обусловленности $\text{cond} \approx 10^{11} - 10^{14}$, поэтому прямое обращение матрицы G^{hb} порождает неустойчивость по отношению к погрешностям записи и оцифровки потенциалов, а также к погрешностям задания геометрии сеток на торсе и эпикарде.

Устойчивое решение может быть получено с использованием метода усеченного сингулярного разложения TSVD [9], когда регуляризованная обратная матрица представляется в виде

$$(\tilde{G}^{hb})^{-1} = V\tilde{R}^+U^T, \quad (1)$$

где U , V – ортогональные матрицы сингулярного разложения матрицы G^{hb} , $R^+ = \text{diag}(\tilde{\rho}_1^+, \tilde{\rho}_2^+, \dots, \tilde{\rho}_M^+)$; $M = \min(N_h, N_b)$,

$$\tilde{\rho}_i^+ = \frac{\rho_i}{\alpha + \rho_i^2}; \quad (2)$$

ρ_i – сингулярные числа матрицы G^{hb} ; α – коэффициент регуляризации. При $\alpha = 0$ обратная матрица будет нерегуляризованной. Для достаточно больших сингулярных чисел $\alpha < \rho_i^2$ регуляризация практически не сказывается, для малых сингулярных чисел $\alpha > \rho_i^2$, что ограничивает влияние неустойчивостей в формуле (2). Целью дальнейшего исследования был анализ влияния режима регуляризации на КППЭ, реконструированных по картам потенциала на поверхности торса при разном количестве измерительных электродов.

Результаты анализа влияния количества электродов

При малом количестве точек в матрицах принципиально нельзя описать верхние пространственные частоты в спектре потенциала на эпикарде. Поэтому ошибку в представлении спектра можно уменьшить, увеличив число точек дискретизации на торсе и эпикарде N_b и N_h и проведя процедуру интерполяции распределения потенциала на торсе при неизменном количестве электродов [3]. Однако при этом возрастает вклад погрешности интерполяции потенциалов на торсе из-за неустойчивостей при обращении матриц в процедуре реконструкции карты потенциалов на эпикарде по потенциалам торса. Для снижения этого эффекта следует увеличивать количество электродов в технически разумных пределах. Рассмотрим влияние выбора количества электродов на результаты реконструкции.

Для контроля погрешности реконструкции карт электрического потенциала на поверхности эпикарда необходимо, строго говоря, располагать известным распределением потенциала на эпикарде. В этих условиях, при отсутствии баз данных с распределениями потенциала на торсе и эпикарде, для анализа алгоритма регуляризации мы провели математическое моделирование единичных неоднородностей на примере дипольной модели электрического источника внутри эпикарда [8]. Поскольку основным вопросом была оценка влияния количества электродов, были выбраны модельные представления поверхности торса в виде эллиптического цилиндра с полуосями a и b и поверхности эпикарда в виде сферы радиусом R_h (сферический квазиэпикард, окружающий реальное сердце [5,8]). Размер неоднородности варьировался путем смещения центра дипольного источника в горизонтальном направлении относительно центра сферического квазиэпикарда при радиусе $R_h = 6$ см: чем ближе модельный источник к поверхности эпикарда, тем меньше размер пятна. Для оценки размера неоднородности dr рассчитывались пространственные спектры потенциала на поверхности квазиэпикарда [3]. При этом $dr = 1/k_{bnd}$, где k_{bnd} – граничная пространственная частота в пространственном спектре потенциала, взятая по уровню 0,01. Для снижения ошибок дискретизации распределений потенциала на торсе и эпикарде использовались количества точек $N_b \approx N_h \approx 10^3$ в (1), (2).

Поскольку при изменении уровня погрешностей в представлении исходных данных изменяется величина оптимального коэффициента регуляризации [7, 9], для каждого значения количества электродов N_e проводился поиск оптимального коэффициента регуляризации α . При этом оптимум определялся из условия максимальной величины коэффициента корреляции между модельным и реконструированным распределениями электрического потенциала.

На рис. 1 показана зависимость нормированного коэффициента взаимной корреляции C_h (коэффициент корреляции Пирсона) между модельным и реконструированным распределениями электрического потенциала на эпикарде от количества электродов на поверхности торса для разных размеров неоднородности. На рис. 2 представлена зависимость оптимального коэффициента регуляризации от количества электродов, полученная при этих же условиях.

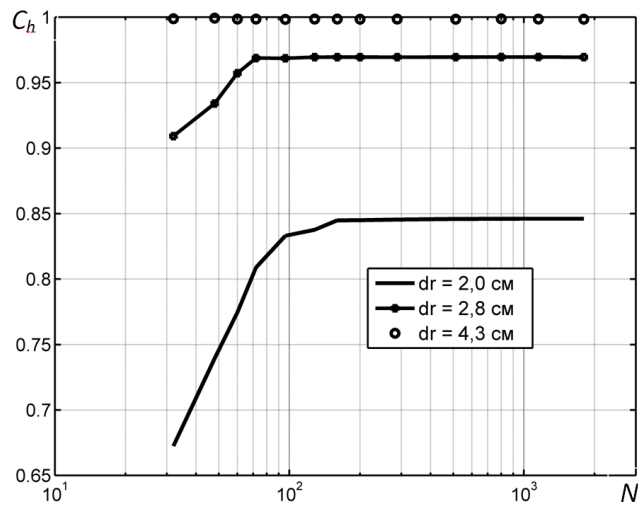


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции C_h от количества электродов при разных размерах неоднородностей

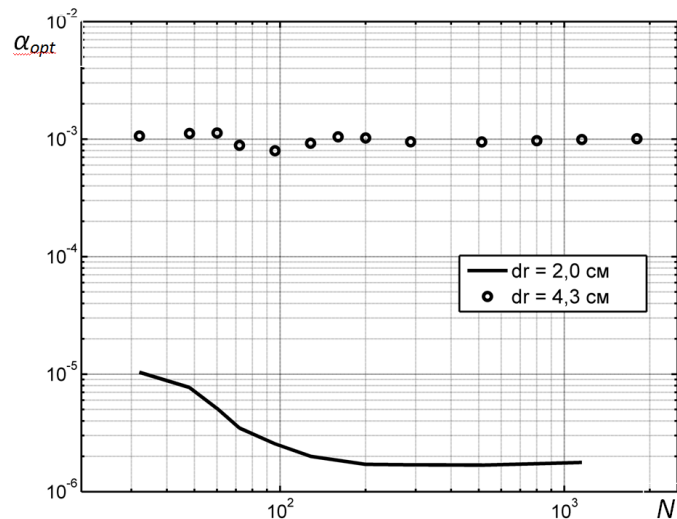


Рис. 2. Зависимости оптимального коэффициента регуляризации от количества электродов при разных размерах неоднородностей

В соответствии с рис.1 в области $N < 100$ возрастает влияние погрешности интерполяции из-за ограниченного количества точек съема потенциала на торсе и значение выбора количества электродов становится существенным, особенно для неоднородностей с размерами 3 см и менее, когда для подавления неустойчивостей реконструкции из-за погрешности интерполяции приходится увеличивать коэффициент регуляризации (см. рис. 2). В области $N > 100$ на выбор коэффициента регуляризации уже влияет практически только размер неоднородности. В целом, ориентируясь на уменьшение коэффициента корреляции при уменьшении числа электродов, можно заключить, что для реконструкции неоднородностей размерами 3 см и более достаточно число электродов порядка 40, для более мелких – до 80 и более.

Отмеченные особенности согласуются с зависимостями граничной частоты в пространственных спектрах распределения потенциала на эпикарде от количества электродов (рис. 3). Так, при $N = 40$ граничная частота k_{bnd} в реконструированном распределении меньше граничной частоты, полученной по модели при $dr = \frac{1}{k_{bnd}} = 4,3$ см в $\gamma = 1,1$ раза и при $dr = 2$ см уже в 1,9 раза. В то же время при $N = 100$ $\gamma = 1,05$ для $dr = 4,3$ см и $\gamma = 1,5$ для $dr = 2$ см.

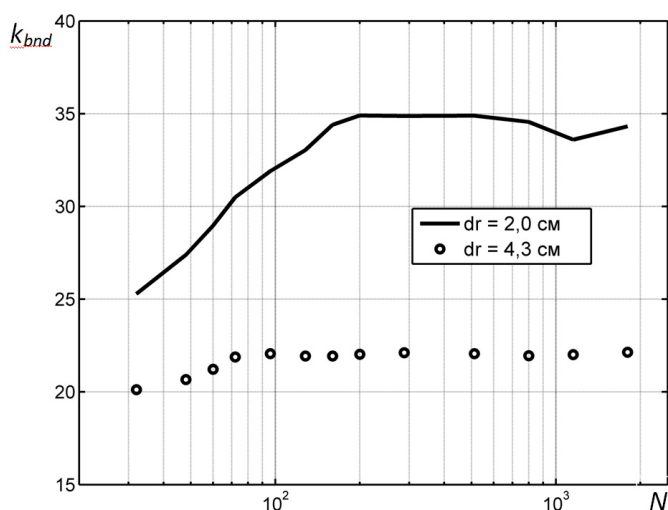


Рис. 3. Зависимость граничной частоты в пространственном спектре реконструированной КППЭ при разных размерах неоднородностей

Обсуждение

В рамках проведенного исследования можно заключить, что для неоднородностей в распределении потенциала на эпикарде с размерами более 3 см при количестве электродов более 100 погрешность интерполяции потенциалов на торсе в целом перестает влиять на результаты реконструкции КППЭ. В этой области на первое место выходят погрешность дискретизации, погрешность оцифровки сигналов и шумы. Однако для снижения погрешности дискретизации необходимо увеличивать количество точек разбиения поверхностей торса и эпикарда с $N_b \approx N_h \approx 10^3$ до $N_b \approx N_h \approx 10^4$, что потребует при современной производительности ПК неприемлемых временных затрат на

реконструкцию (десятки минут). Переход от 2-байтового представления чисел к 8-байтовому представлению снижает относительную погрешность квантования от $2 \cdot 10^{-10}$ (соизмеримо со степенью обусловленности матриц в процедуре реконструкции) до $5 \cdot 10^{-20}$, однако требует уже зачастую неприемлемых затрат оперативной памяти ПК.

Выводы

Рассмотрено влияние выбора количества электродов на поверхности торса на результаты реконструкции распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда. Получены оценки количества электродов и оптимального коэффициента регуляризации при различных размерах неоднородностей в распределении потенциала.

В целом можно заключить, что рассматриваемая методика позволяет реконструировать неоднородности на поверхности эпикарда с размерами более 3 см при количестве электродов порядка 40. Для неоднородностей с меньшими размерами необходимо располагать электродами в количестве 60 и более.

Библиографический список

1. Амиров, Р. З. Электрокардиотопография / Р. З. Амиров. – Москва : Медицина, 1965. – 142 с.
2. Полякова, И. П. Поверхностное ЭКГ – картирование как метод диагностики нарушений сердечного ритма сердца / И. П. Полякова, А. В. Ардашев // Клиническая аритмология. – Москва : Медпрактика-М, 2009. – Гл. 6. – С. 157–175.
3. Крамм, М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на карты распределения электрического потенциала на поверхностях торса и квазиэпикарда / М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (33). – С. 61–68.
4. Патент РФ № 2651068. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Жихарева Г. В., Крамм М. Н. и др. – 2018. – Бюл. № 11. – 7 с.
5. Титомир, Л. И. Неинвазивная электрокардиотопография / Л. И. Титомир, В. Г. Трунов, Э. А. И. Айду. – Москва : Наука, 2003. – 198 с.
6. Comprehensive Electrocardiology / P. W. Macfarlane, A. van Oosterom, O. Pahlm, P. Kligfield, M. Janse, J. Camm. – London : Springer, 2011. – Chapter 9. – P. 300–343.
7. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1979. – 285 с.
8. Титомир, Л. И. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – Москва : Наука. Физматлит, 1999. – 447 с.
9. Леонов, А. С. Решение некорректно поставленных обратных задач: Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации / А. С. Леонов. – Москва : Либроком, 2010. – 336 с.
10. Throne, R. D. The effects of errors in assumed conductivities and geometry on numerical solutions to the inverse problem of electrocardiology / R. D. Throne, L. G. Olson // IEEE Trans Biomed Eng. – 1995. – Vol. 42 (12) – P. 1192–1200.
11. Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface / G. V. Zhikhareva, M. N. Kramm, O. N. Bodin, R. Seepold, A. I. Chernikov, Y. A. Kupriyanova, N. A. Zhuravleva // IWBBIO 2018 : proceedings of 6th International Work-Conference (Granada, Spain, April 25–27, 2018). – 2018. – Part I.
12. Zhikhareva, G. Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem / G. Zhikhareva, M. Kramm // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, 2012. – 148 p.

References

1. Amirov R. Z. *Elektrokardiotopografiya* [Electrocardiografia]. Moscow: Meditsina, 1965, 142 p. [In Russian]
2. Polyakova I. P., Ardashev A. V. *Klinicheskaya aritmologiya* [Clinical Arrhythmology]. Moscow: Medpraktika-M, 2009, chapter 6, pp. 157–175. [In Russian]
3. Kramm M. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 3 (33), pp. 61–68. [In Russian]
4. Patent RF № 2651068. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa* [Russian patent no. 2651068. Method for noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart]. Bodin O. N., Zhikhareva G. V., Kramm M. N. et al. 2018, bull. no. 11, 7 p. [In Russian]
5. Titomir L. I., Trunov V. G., Aydu E. A. I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya* [Non-invasive electrocardiography]. Moscow: Nauka, 2003, 198 p. [In Russian]
6. Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O., Kligfield P., Janse M., Camm J. *Comprehensive Electrocardiology*. London: Springer, 2011, chapter 9, pp. 300–343.
7. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979, 285 p. [In Russian]
8. Titomir L. I., Kneppo P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa* [Mathematical modeling of a bioelectric heart generator]. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1999, 447 p. [In Russian]
9. Leonov A. S. *Reshenie nekorrektno postavlennykh obratnykh zadach: Ocherk teorii, prakticheskie algoritmy i demonstratsii* [The solution of ill-posed inverse problems: an Essay on the theory, practical algorithms, and demonstrations]. Moscow: Librokom, 2010, 336 p. [In Russian]
10. Throne R. D., Olson L. G. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1995, vol. 42 (12), pp. 1192–1200.
11. Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N., Seepold R., Chernikov A. I., Kupriyanova Y. A., Zhuravleva N. A. *IWBBIO 2018: proceedings of 6th International Work-Conference (Granada, Spain, April 25–27, 2018)*. 2018, part I.
12. Zhikhareva G., Kramm M. *Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem*. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, 2012, 148 p.

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Kramm Mikhail Nikolaevich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of radio engineering
fundamentals,
National Research University «MPEI»
(14 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Крамм, М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на результаты реконструкции распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда / М. Н. Крамм // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 78–85. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-6.

**КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ
ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ В ПРИМЕНЕНИИ
К ИССЛЕДОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ
УДАРНОЙ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
В ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ**

Д. А. Тукмаков

**FINITE DIFFERENCE DYNAMICS MODEL
OF A HOMOGENEOUS MIXTURE IN APPLICATION
TO THE STUDY OF THE LARGE INTENSITY
OF THE SHOCK WAVE IN A HYDROGEN-AIR ENVIRONMENT**

D. A. Tukmakov

Аннотация. *Предмет и цель работы.* В связи с развитием энергетики актуальным направлением исследования является изучение течений в сложных средах, состоящих из газов с разными физическими свойствами. Смеси газов также применяются в газоразрядных лазерах, где возникает необходимость моделировать динамические процессы в смесях. В водородной энергетике при эксплуатации агрегатов, емкостей и трубопроводов происходят ударно-волновые истечения водорода в воздух с возможным последующим отражением ударной волны от твердой поверхности. Отличие математических моделей ударно-волновых течений заключается в том, что необходимо учитывать сжимаемость среды. Целью данной работы является алгоритмизация для программной реализации явного конечно-разного метода, примененного к решению уравнений математической модели динамики гомогенной смеси, позволяющей описывать нелинейные волновые процессы в смеси вязких, сжимаемых, теплопроводных газов в двумерной постановке. *Методы.* Математическая модель разрабатывалась в соответствии с методологией динамики неоднородных сред. Уравнения непрерывности плотности компонент смеси записывались отдельно для каждой компоненты. Сохранение импульса смеси описывается двумерной нестационарной системой уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа. Уравнение сохранения энергии записывалось для всей смеси в целом. В качестве методов реализации математической модели использован явный конечно-разностный алгоритм, дополненный начальными и граничными условиями. *Результаты и выводы.* Численные расчеты демонстрируют, что при одинаковой интенсивности начального разрыва давлений в водородно-воздушной смеси наблюдаются большие скорости движущейся и отраженной ударной волны, большие скорости спутных потоков и большие температуры газа. Разработаны алгоритм и компьютерная программа, реализующие конечно-разностное решение уравнений динамики гомогенной смеси. Сопоставление ударно-волновых течений динамики однородной и двухкомпонентной сред с одинаковой начальной интенсивностью ударных волн показало, что программа позволяет выявить отличия, связанные с неоднородностью моделируемых течений.

Ключевые слова: гомогенные смеси, ударные волны, численное моделирование, явная конечно-разностная схема, уравнение Навье – Стокса, водородно-воздушные смеси.

Abstract. *Subject and goals.* In connection with the development of energy, an urgent area of research is the study of flows in complex media consisting of gases with differ-

ent physical properties. Gas mixtures are also used in gas-discharge lasers, where it becomes necessary to simulate dynamic processes in mixtures. In hydrogen energy during the operation of aggregates, tanks and pipelines, shock-wave outflows of hydrogen into the air occur with the possible subsequent reflection of the shock wave from a solid surface. The difference between mathematical models of shock-wave flows is that it is necessary to take into account the compressibility of the medium. The aim of this work is to algorithmize for the software implementation of an explicit finite-difference method as applied to solving the equations of a mathematical model of the dynamics of a homogeneous mixture, which allows describing nonlinear wave processes in a mixture of viscous, compressible, heat-conducting gases in a two-dimensional formulation. *Methods.* The mathematical model was developed in accordance with the methodology of the dynamics of heterogeneous media. The continuity equations for the density of the components of the mixture were written separately for each component. The conservation of the momentum of the mixture is described by a two-dimensional non-stationary system of Navier-Stokes equations for a compressible gas. The energy conservation equation was written for the whole mixture as a whole. As methods for implementing the mathematical model, an explicit finite-difference algorithm is used, supplemented by initial and boundary conditions. *Results and conclusions.* Numerical calculations demonstrate that at the same intensity of the initial pressure rupture in the hydrogen-air mixture, there are large velocities of the moving and reflected shock waves, high velocities of satellite flows and high gas temperatures. An algorithm and a computer program are developed that implement a finite-difference solution of the equations of dynamics of a homogeneous mixture. A comparison of the shock-wave flows of the dynamics of a homogeneous and two-component media with the same initial intensity of the shock waves showed that the program allows us to identify differences associated with the heterogeneity of the simulated flows.

Keywords: homogeneous mixtures, shock waves, numerical simulation, explicit finite-difference scheme, Navier-Stokes equation, hydrogen-air mixtures.

Введение

Динамика неоднородных сред является разделом современной механики жидкости и газа [1, 2], отличающимся от классической аэро- и гидродинамики [1, 3–18]. Основы механики неоднородных сред изложены в [3]. В случае, когда компоненты неоднородной среды находятся в одинаковом агрегатном состоянии, смесь именуется гомогенной. Математические модели динамики гомогенных смесей [3, 4, 6–10] являются промежуточными между математическими моделями динамики многофазных сред [3, 5, 11–18] и равновесными математическими моделями динамики неоднородных сред [3]. В свою очередь, равновесные математические модели [3] являются математическими моделями классической газовой динамики однородных сред [1, 2, 19–22], но с введением коэффициентов для физических параметров среды, дающих поправки на неоднородность. Ряд практических проблем, связанных как с водородной энергетикой, так и с химическими и аэрокосмическими технологиями, требует изучения ударно-волновых течений в водородно-воздушных смесях, в том числе в некоторых случаях с начальным пространственным разделением компонент смеси. В работе [4] численно моделировался тлеющий разряд в смеси газов в одномерной постановке, математическая модель предполагала нестационарность электродинамических процессов. Статья в [6] посвящена численному исследованию распространения волн горения в гомогенной метано-воздушной смеси, обсуждалась методология описания кинетики горения в турбулентном потоке реагирующей газовой смеси, изуча-

лись течения химически активных газовых смесей для дозвуковых скоростей. Аналитические решения для термодиффузионных процессов в ламинарном потоке несжимаемой гомогенной смеси, состоящей из двух компонент, описаны в работе [7], также проведено исследование групповых свойств точных решений математической модели вибрационной конвекции в двухкомпонентной смеси. Экспериментальное исследование высокоскоростных течений в ионизированных сильно разряженных газах представлено в статье [8]. В работе [9] обосновывается применение водородно-воздушной смеси для безыгольной инъекции, экспериментально исследуется возможность передачи энергии детонационной волны в водородно-воздушной смеси слою жидкости с последующим образованием высокоскоростной жидкостной струи. В статье [10] приведены физические эксперименты, целью которых было изучение распространения сферической волны горения в водородно-воздушной смеси. Публикация [13] посвящена математическому моделированию плоских ударных и детонационных волн в смесях газов с учетом сложной химической кинетики процесса. Уравнения математической модели решались численным конечно-разностным методом. Математическая модель описывала нестационарную динамику сжимаемой смеси с одномерной геометрией потока, численно исследовались ударные и детонационные волны в газовых смесях с переменным химическим составом, но без учета воздействия на динамику потока тензора вязких напряжений сплошной среды. В результате моделирования определено влияние свойств газа на интенсивность и затухание ударных волн.

Таким образом, несмотря на проработанность ряда вопросов моделирования динамических процессов в смесях, чьи компоненты имеют одинаковое агрегатное состояние, актуальной задачей является разработка конечно-разностной модели ударно-волновых течений в неоднородных средах, учитывающей такие свойства среды, как вязкость, сжимаемость, теплопроводность и возможное неравномерное распределение компонент смеси. Такая модель имеет актуальность для выявления нелинейных эффектов при распространении [1] и, что еще важнее, отражении от твердых поверхностей [2] ударных волн большой интенсивности в газовых смесях [3].

В технологиях хранения и транспортировки сжатого водорода возникают процессы ударно-волнового истечения водорода в воздух в каналах и емкостях с последующим отражением ударной волны от твердой поверхности, также следует отметить, что газовые смеси часто используются в качестве активной среды в газоразрядных лазерах; для описания таких течений необходима математическая модель, учитывающая эффекты пристеночной вязкости среды и начального разделения компонент смеси. В связи с нелинейностью систем уравнений в частных производных для математического моделирования ударных волн в смесях вязких газов используются преимущественно численные методы [22]. Математическая модель, представленная в данной работе, описывает нестационарные двухмерные течения вязких сжимаемых и теплопроводных сред, модель позволяет описывать течения с двумерной геометрией, что также позволяет учитывать пристеночную вязкость при течении сплошных сред в прямоугольных каналах. Применяется математическая модель диффузионного типа – такого рода модели чаще всего используются при исследовании нестационарных течений неоднородных сред,

компоненты которых имеют одинаковое агрегатное состояние [3]. Для каждой из компонент смеси уравнения непрерывности плотности решаются отдельно, что позволяет описать процесс, в котором плотности компонент смеси распределены неравномерно.

Методика

В работе используется модель движения гомогенной смеси с двумя компонентами [3, 4]. Система уравнений движения двухкомпонентной смеси вязких теплопроводных газов в двумерном случае имеет вид

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv - \tau_{xy}) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 - \tau_{yy}) = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left([e + p - \tau_{xx}]u - \tau_{xy}v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left([e + p - \tau_{yy}]v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) = 0; \quad (5)$$

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} D\right); \tau_{yy} = \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} D\right); \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right); D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}; \quad (6)$$

$$p = \rho_1 R_1 T + \rho_2 R_2 T; \quad (7)$$

$$e = \rho_1 c_{v1} T + \rho_2 c_{v2} T + \rho(u^2)/2; \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\rho_1}{\rho} \mu_1 + \frac{\rho_2}{\rho} \mu_2; \lambda = \frac{\rho_1}{\rho} \lambda_1 + \frac{\rho_2}{\rho} \lambda_2; \rho = \rho_1 + \rho_2, \quad (9)$$

где ρ , u , v , T , e – плотность, составляющие вектора скорости, температура и полная энергия газовой смеси. Для компонент смеси вводятся индексы «1» – для газа в камере высокого давления и «2» – для газа в камере низкого давления; R , c_v , λ , μ – газовые постоянные, удельные массовые теплоемкости при постоянном объеме, коэффициенты теплопроводности и вязкости газов; p , e – давление и удельная полная энергия смеси [19].

В представленной системе уравнений уравнения (1) и (2) – это уравнения непрерывности массы компонент смеси. Уравнения (3), (4) и (5) – уравнения сохранения пространственных компонент импульса и полной энергии смеси. Уравнения (6) – формулы для компонент тензора вязких напряжений смеси (τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy}). Уравнения (7) и (8) – формулы для давления и полной энергии смеси соответственно. Выражения (9) описывают вязкость, теплопроводность и плотность гомогенной среды, выражающиеся через соответ-

ствующие физические параметры компонент смеси. Целью разработки конечно-разностной модели динамики гомогенной смеси являлось исследование ударно-волновых течений с учетом различных выше перечисленных свойств моделируемого объекта, что необходимо для выявления закономерностей ударно-волновых течений в гомогенных смесях, отличных от аналогичных процессов в однородных средах.

Уравнения математической модели решаются явным двухэтапным конечно-разностным методом, применяемым при моделировании нестационарных сверхзвуковых сжимаемых вязких течений и позволяющим с высокой экономичностью получать численные решения второго порядка точности относительно шагов по пространственным переменным при моделировании сверхзвуковых течений сплошной среды [22]. Для демонстрации численного алгоритма представим систему уравнений (1)–(5) в матричном виде:

$$\mathbf{A}_t + \mathbf{B}_x + \mathbf{C}_y = 0 : \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \rho_1 u \\ \rho_2 u_2 \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ (e + p - \tau_{xx})u - \tau_{xy}v + \lambda \partial T / \partial x \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \rho_1 v \\ \rho_2 v \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ (e + p - \tau_{yy})v - \tau_{xy}u + \lambda \partial T / \partial y \end{bmatrix}.$$

Явная конечно-разностная схема [22] для системы уравнений (10) включает в себя последовательно выполняемые шаги:

$$\mathbf{A}_{j,k}^* = \mathbf{A}_{j,k}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{B}_{j+1,k}^n - \mathbf{B}_{j,k}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (\mathbf{C}_{j,k+1}^n - \mathbf{C}_{j,k}^n), \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{n+1} = 0,5(\mathbf{A}_{j,k}^{*n} + \mathbf{A}_{j,k}^n) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{B}_{j,k}^n - \mathbf{B}_{j-1,k}^n) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta y} (\mathbf{C}_{j,k}^n - \mathbf{C}_{j,k-1}^n), \quad (12)$$

где Δt – шаг по времени; Δx , Δy – шаги по пространственным переменным; j – индекс узла по оси x ; k – индекс узла по оси y ; n – номер временного слоя. В расчетах применялась схема расщепления по переменным, реализуемая в виде симметричной последовательности шагов по соответствующим пространственным направлениям, позволяющая построить решение на следующем временном слое [22]:

$$\mathbf{A}_{j,k}^{n+1} = \mathbf{P}_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) \mathbf{P}_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) \mathbf{P}_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) \mathbf{P}_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) \mathbf{A}_{j,k}^n.$$

Переход с одного временного слоя t^n на новый временной слой t^{n+1} осуществляется следующим образом:

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(1)} = \mathbf{P}_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) \mathbf{A}_{j,k}^n, \quad \mathbf{A}_{j,k}^{(2)} = \mathbf{P}_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) \mathbf{A}_{j,k}^{(1)}, \quad \mathbf{A}_{j,k}^{(3)} = \mathbf{P}_y \left(\frac{\Delta t_y}{2} \right) \mathbf{A}_{j,k}^{(2)},$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{n+1} = \mathbf{P}_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) \mathbf{A}_{j,k}^{(3)}.$$

Временные шаги $\Delta t_x = \Delta t_y = \Delta t$. Процесс вычисления вектора $\mathbf{A}^{n+1}$ состоит в применении одномерного оператора $\mathbf{P}_x(\Delta t_x/2)$ по переменной x к вектору искомым функций на временном слое t^n :

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(1)*} = \mathbf{A}_{j,k}^n - \frac{(\Delta t_x / 2)}{\Delta x} (\mathbf{B}_{j+1,k}^n - \mathbf{B}_{j,k}^n);$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(1)} = 0,5(\mathbf{A}_{j,k}^n + \mathbf{A}_{j,k}^{(1)*}) - 0,5 \frac{(\Delta t_x / 2)}{\Delta x} (\mathbf{B}_{j,k}^{(1)*} - \mathbf{B}_{j-1,k}^{(1)*});$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(2)*} = \mathbf{A}_{j,k}^n - \frac{(\Delta t_y / 2)}{\Delta y} (\mathbf{C}_{j,k+1}^n - \mathbf{C}_{j,k}^n);$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(2)} = 0,5(\mathbf{A}_{j,k}^n + \mathbf{A}_{j,k}^{(2)*}) - 0,5 \frac{(\Delta t_y / 2)}{\Delta y} (\mathbf{C}_{j,k}^{(2)*} - \mathbf{C}_{j,k-1}^{(2)*});$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(3)*} = \mathbf{A}_{j,k}^{(2)} - \frac{(\Delta t_y / 2)}{\Delta y} (\mathbf{C}_{j,k+1}^{(2)} - \mathbf{C}_{j,k}^{(2)});$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{(3)} = 0,5(\mathbf{A}_{j,k}^{(2)} + \mathbf{A}_{j,k}^{(3)*}) - 0,5 \frac{(\Delta t_y / 2)}{\Delta y} (\mathbf{C}_{j,k}^{(3)*} - \mathbf{C}_{j,k-1}^{(3)*});$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{n+1*} = \mathbf{A}_{j,k}^{(3)} - \frac{(\Delta t_x / 2)}{\Delta x} (\mathbf{B}_{j+1,k}^{(3)} - \mathbf{B}_{j,k}^{(3)});$$

$$\mathbf{A}_{j,k}^{n+1} = 0,5(\mathbf{A}_{j,k}^{(3)} + \mathbf{A}_{j,k}^{n+1*}) - 0,5 \frac{(\Delta t_x / 2)}{\Delta x} (\mathbf{B}_{j,k}^{n+1*} - \mathbf{B}_{j-1,k}^{n+1*}).$$

Для системы уравнений математической модели гомогенной смеси записывались граничные и начальные условия. На границах расчетной области задавались граничные условия Дирихле для пространственных составляющих скорости смеси и граничные условия Неймана – для остальных функций [20–22]. Разбиение расчетной области составляло $n_x = 1000$ и $n_y = 100$. Подобное поперечное разбиение позволяет в достаточной мере учесть пристеночную вязкость среды в узком канале [22]. Длина канала составляла $L = 4$ м, а ширина канала – $h = 0,1$ м. Шаг по времени вычислялся из условия типа Куранта – Леви – Фридрихса [22]. Конечно-разностный алгоритм численного решения уравнений математической модели реализован в виде программного кода на языке Fortran. Ниже приведено краткое описание программной реализации явного конечно-разностного метода решения уравнений математической модели с учетом начальных физических параметров смеси и краевых условий.

Компьютерная программа имела следующую структуру:

- 1) блок задания физических параметров компонент смеси, а также начальных значений искомых газодинамических функций;
- 2) блок задания параметров области моделирования и параметров расчетной сетки, а также краевых значений газодинамических функций;
- 3) подпрограмма построения расчетной сетки;
- 4) подпрограмма вычисления всех параметров смеси через замыкающие соотношения (7)–(8);
- 5) подпрограмма, реализующая явный конечно-разностный метод, осуществляющая вычисление значений плотности газов, пространственных компонент вектора скорости и полной энергии смеси на следующем временном слое.

Вычисление значений параметров смеси, а также ее компонент на каждом следующем временном слое осуществляется последовательным применением шагов 4–5 с учетом значений газодинамических функций, вычисленных на предыдущем временном слое.

Результаты

На рис. 1 изображена ударная труба [1, 4] с начальным разделением компонент смеси. Предполагалось, что давление в одном отсеке трубы составляло $p_2 = 1078$ кПа, а давление в другом отсеке трубы $p_1 = 98$ кПа (рис. 2). Интенсивность ударной волны – $\Delta p = p_2 - p_1 = 980$ кПа = $10 p_1$ на порядок превосходит давление невозмущенного газа – $p_1 = 98$ кПа, таким образом, моделируемое ударно-волновое течение является существенно интенсивным.

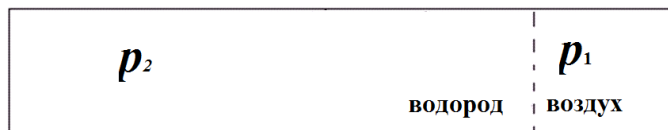


Рис. 1. Схематичное изображение ударной трубы с различными газами в камерах высокого и низкого давления

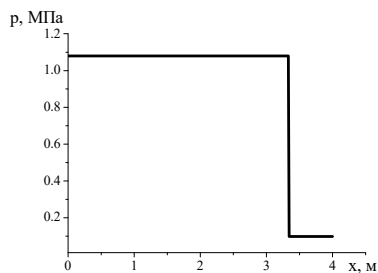


Рис. 2. Распределение давления в ударной трубе для начального момента времени

При распространении ударной волны по водородно-воздушной смеси скорость движения ударной волны имеет значение, большее, чем если бы аналогичный процесс происходил в однородном воздухе: $\theta = 812$ м/с и $\theta = 500$ м/с соответственно (рис. 3,а). В процессе отражения от твердой стен-

ки отраженная ударная волна в водородно-воздушной смеси также имеет скорость, большую, чем в однородном воздухе, при той же начальной интенсивности волны сжатия (рис. 3,б).

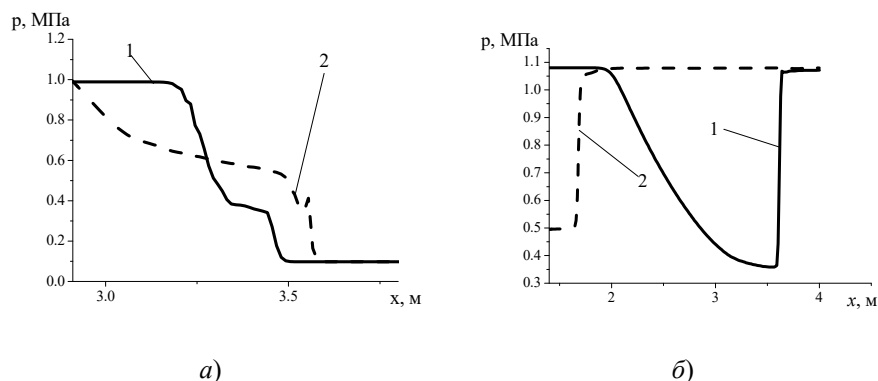


Рис. 3. Распределение давления в различные моменты времени: $a - t = 0,34$ мс; $б - t = 2,24$; 1 – распределение давления для однородного воздуха; 2 – распределение давления для водородно-воздушной смеси

Максимальное значение продольной составляющей скорости в спутном потоке газа при движении ударной волны к стенке составляет $u = 802$ м/с и $u = 335$ м/с – для водородно-воздушной смеси и однородного воздуха соответственно (рис. 4,а). Максимальное значение продольной составляющей скорости в спутном потоке газа при отражении ударной волны от твердой поверхности составляет $u = 1063$ м/с и $u = 349$ м/с – для соответствующих физических величин (рис. 4,б).

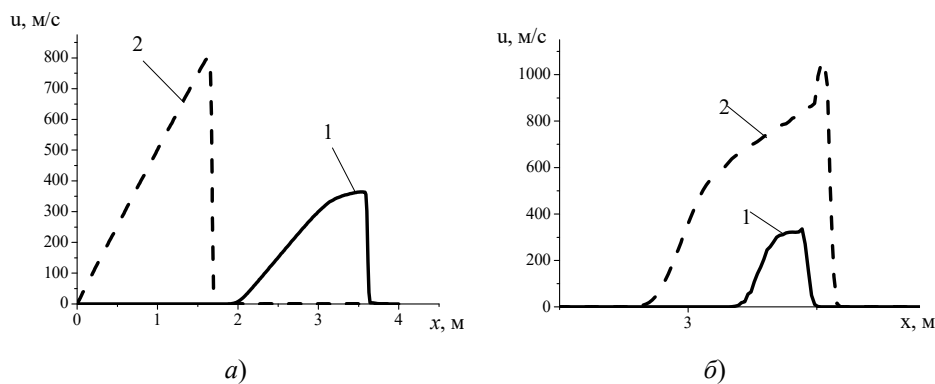


Рис. 4. Распределение продольной составляющей скорости в различные моменты времени: $a - t = 0,34$ мс; $б - t = 2,24$ мс; 1 – распределение скорости для однородного воздуха; 2 – распределение скорости для водородно-воздушной смеси

Пространственное распределение температуры в набегающей ударной волне для однородного газа (воздуха) составляет – $T = 494$ К и $T = 781$ К в водородно-воздушной смеси (рис. 5,а). Можно наблюдать, как в процессе движения ударной волны по водородно-воздушной смеси образуются два максимальных значения температуры: $T = 781$ К и $T = 642$ К. Это можно

объяснить тем, что при движении ударной волны из водорода в воздух происходит нагрев воздуха на участке контакта разнородных газов, расположенном на переднем крае ударной волны, в то время как в спутном потоке газа, движущемся за ударной волной, распространяющейся из водорода в воздух, газ прогревается до большей температуры. В отраженной ударной волне для воздуха и водородно-воздушной смеси наблюдается существенное различие $T = 671$ К и $T = 2135$ К соответственно (рис. 5,б).

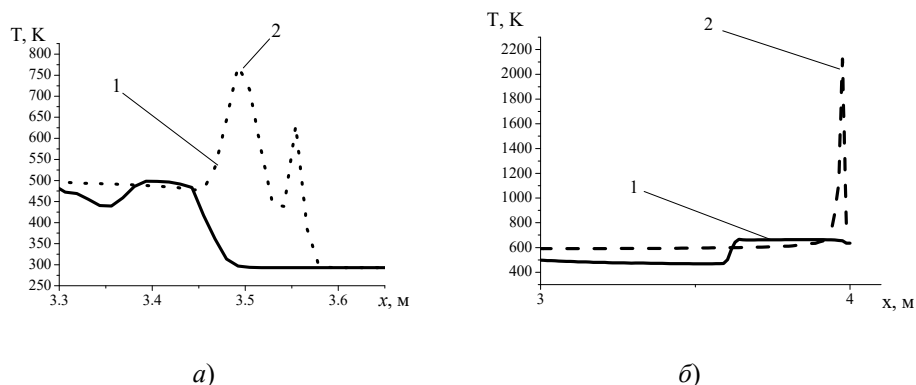


Рис. 5. Распределение температуры в различные моменты времени: $a - t = 0,34$ мс; $b - t = 2,24$ мс; 1 – распределение температуры для однородного воздуха; 2 – распределение температуры для водородно-воздушной смеси

Обсуждение

Численные расчеты выявили отличия в процессах движения и отражения ударной волны большой интенсивности, проходящей из водорода в воздух от численных расчетов аналогичных процессов в однородном воздухе при одинаковой начальной интенсивности ударной волны. Процессы движения и отражения ударной волны в водородно-воздушной смеси протекают с большей скоростью, чем в однородном газе. Скорость спутного потока газа, движущегося за ударной волной в водородно-воздушной смеси, также существенно больше, чем в однородном воздухе. При этом в процессе движения ударной волны из водорода в воздух наблюдаются два максимума температуры смеси, что можно объяснить тем, что в процессе движения ударной волны из водорода в воздух происходит увеличение температуры как в потоке водорода движущегося за ударной волной – 780 К, так и в сжимаемом воздухе, испытывающем воздействие переднего края фронта ударной волны – 620 К. Также полученная в расчетах температура отраженной ударной волны в водородно-воздушной смеси существенно выше, чем при отражении ударной волны той же интенсивности в однородном воздухе.

Выводы

В работе представлен обобщенный конечно-разностный алгоритм решения уравнений движения двухкомпонентной смеси газов, положенный в основу программной реализации решения уравнений математической модели динамики гомогенной смеси. Математическая модель учитывает вязкость,

сжимаемость, теплопроводность смеси, двухмерную геометрию течения, что важно при описании пристеночной вязкости в узких каналах. Уравнения непрерывности плотности записываются для каждой из компонент смеси. Таким образом, компьютерная программа позволяет исследовать ударно-волновые течения газовых смесей для начального неравномерного распределения плотности компонент. Численные расчеты движения и отражения интенсивных ударных волн в водородно-воздушной смеси выявили отличия от аналогичных параметров течения однородной среды при одинаковых начальных интенсивностях ударных волн. Выявленные особенности связаны с различным протеканием физических процессов в ударно-волновых течениях в однородном газе и в газовой смеси. Обнаруженные закономерности можно применить при проектировании резервуаров и трубопроводов, в которых возможно ударно-волновое истечение различных газов в полости, заполненные воздухом, или в открытую атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-48-160017\19).

Библиографический список

1. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2003. – 784 с.
2. Овсянников, Л. В. Лекции по основам газовой динамики / Л. В. Овсянников. – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. – 336 с.
3. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – Москва : Наука, 1978. – 336 с.
4. Галлеев, Р. С. Численное исследование тлеющего разряда в смеси газов $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ / Р. С. Галлеев, Р. Т. Файзрахманов // ПМТФ. – 1987. – № 5. – С. 5–10.
5. Ударные волны при разлете сжатого объема газовой смеси твердых частиц / Б. Е. Гельфанд, А. В. Губанов, С. П. Медведев и др. // Доклады АН СССР. – 1985. – Т. 281, № 5. – С. 1113–1116.
6. Козлов, В. Е. Моделирование скорости турбулентного гомогенного горения на основе «квазиламинарного» подхода / В. Е. Козлов, А. Б. Лебедев, А. Н. Секундов, К. Я. Якубовский // Теплофизика высоких температур. – 2009. – № 6. – С. 946–953.
7. Рыжков, И. И. Групповые свойства и точные решения модели вибрационной конвекции бинарной смеси / И. И. Рыжков, И. В. Степанова // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – № 4. – С. 72–83.
8. Zabelinskii, I. E. Experimental study and numerical modeling of vibrational oxygen temperature profiles behind a strong shock wave front / I. E. Zabelinskii, L. B. Ibragimova, O. P. Shatalov, U. V. Tunik // Progress in Flight Physics. Ser.: «EUCASS book series advances in aerospace sciences». – Moscow, 2011. – P. 231–242.
9. Применение детонации водородовоздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции / В. В. Голуб, Т. В. Баженова, Д. И. Бакланов, К. В. Иванов, М. С. Кривокрытов // Теплофизика высоких температур. – 2013. – № 1. – С. 147–150.
10. Роль отдельных механизмов неустойчивости пламени в водородно-воздушной смеси / В. В. Володин, В. В. Голуб, А. Е. Ельянов, А. Е. Коробов, А. Ю. Микушкин // Вестник объединенного института высоких температур. – 2018. – № 1. – С. 78–81.
11. Садин, Д. В. TVD-схема для жестких задач волновой динамики гетерогенных сред негиперболического неконсервативного типа / Д. В. Садин // Журнал вы-

- числительной математики и математической физики. – 2016. – № 12. – С. 2098–2109.
12. Глазунов, А. А. Численное исследование течения ультрадисперсных частиц оксида алюминия в сопле ракетного двигателя твердого топлива / А. А. Глазунов, Н. Н. Дьяченко, Л. И. Дьяченко // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – № 1. – С. 81–88.
 13. Прохоров, Е. С. Возбуждение ударной волны при переломлении детонации на диффузионно размытой границе реагирующего газа с инертным / Е. С. Прохоров // Сибирский физический журнал. – 2017. – № 3. – С. 100–106.
 14. Губайдуллин, Д. А. Численное исследование эволюции ударной волны в газозвеси с учетом неравномерного распределения частиц / Д. А. Губайдуллин, Д. А. Тукмаков // Математическое моделирование. – 2014. – № 10. – С. 109–119.
 15. Тукмаков, Д. А. Численное моделирование ударно-волновых течений в газозвеси с неоднородной концентрацией дисперсной фазы / Д. А. Тукмаков // Авиационная техника. – 2019. – № 1. – С. 54–59.
 16. Тукмаков, Д. А. Численное моделирование колебаний электрически заряженной гетерогенной среды, обусловленных межкомпонентным взаимодействием / Д. А. Тукмаков // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2019. – № 3. – С. 73–85.
 17. Тукмаков, Д. А. Теоретическое исследование релаксации интенсивности скачка давления на фронте ударной волны в газозвеси / Д. А. Тукмаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 3. – С. 3–11.
 18. Tukmakov, D. A. Numerical study of polydisperse aerosol dynamics with the drops destruction / D. A. Tukmakov // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – № 6. – P. 824–827.
 19. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства газов / С. Л. Ривкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
 20. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Изд-во МГУ, 1999. – 799 с.
 21. Тукмаков, А. Л. Численное моделирование акустических течений при резонансных колебаниях газа в закрытой трубе / А. Л. Тукмаков // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2006. – № 4. – С. 33–36.
 22. Флетчер, К. Вычислительные методы динамики жидкости / К. Флетчер. – Москва : Мир, 1991. – Т. 2. – 552 с.

References

1. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa, 2003, 784 p. [In Russian]
2. Ovsyannikov L. V. *Lektsii po osnovam gazovoy dinamiki* [Lectures on the basics of gas dynamics]. Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2003, 336 p. [In Russian]
3. Nigmatulin R. I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of heterogeneous media mechanics]. Moscow: Nauka, 1978, 336 p. [In Russian]
4. Galleev R. S., Fayzrakhmanov R. T. *PMTF*. 1987, no. 5, pp. 5–10. [In Russian]
5. Gel'fand B. E., Gubanov A. V., Medvedev S. P. et al. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1985, vol. 281, no. 5, pp. 1113–1116. [In Russian]
6. Kozlov V. E., Lebedev A. B., Sekundov A. N., Yakubovskiy K. Ya. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermophysics of high temperatures]. 2009, no. 6, pp. 946–953. [In Russian]
7. Ryzhkov I. I., Stepanova I. V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied mechanics and technical physics]. 2011, no. 4, pp. 72–83. [In Russian]

8. Zabelinskii I. E., Ibraguimova L. B., Shatalov O. P., Tunik U. V. *Progress in Flight Physics. Ser.: «EUCASS book series advances in aerospace sciences»*. Moscow, 2011, pp. 231–242.
9. Golub V. V., Bazhenova T. V., Baklanov D. I., Ivanov K. V., Krivokorytov M. S. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermophysics of high temperatures]. 2013, no. 1, pp. 147–150. [In Russian]
10. Volodin V. V., Golub V. V., El'yanov A. E., Korobov A. E., Mikushkin A. Yu. *Vestnik ob"edinennogo instituta vysokikh temperatur* [Bulletin of the United Institute of high temperatures]. 2018, no. 1, pp. 78–81. [In Russian]
11. Sadin D. V. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of computational mathematics and mathematical physics]. 2016, no. 12, pp. 2098–2109. [In Russian]
12. Glazunov A. A., D'yachenko N. N., D'yachenko L. I. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics]. 2013, no. 1, pp. 81–88. [In Russian]
13. Prokhorov E. S. *Sibirskiy fizicheskii zhurnal* [Siberian journal of physics]. 2017, no. 3, pp. 100–106. [In Russian]
14. Gubaydullin D. A., Tukmakov D. A. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling]. 2014, no. 10, pp. 109–119. [In Russian]
15. Tukmakov D. A. *Aviatsionnaya tekhnika* [Aviation equipment]. 2019, no. 1, pp. 54–59. [In Russian]
16. Tukmakov D. A. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika* [University news. Applied nonlinear dynamics]. 2019, no. 3, pp. 73–85. [In Russian]
17. Tukmakov D. A. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. 2019, no. 3, pp. 3–11. [In Russian]
18. Tukmakov D. A. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019, no. 6, pp. 824–827.
19. Rivkin S. L. *Termodinamicheskie svoystva gazov* [Thermodynamic properties of gases]. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 288 p. [In Russian]
20. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Izd-vo MGU, 1999, 799 p. [In Russian]
21. Tukmakov A. L. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika* [Proceedings of higher educational institutions. Aviation equipment]. 2006, no. 4, pp. 33–36. [In Russian]
22. Fletcher K. *Vychislitel'nye metody dinamiki zhidkosti* [Computational methods of fluid dynamics]. Moscow: Mir, 1991, vol. 2, 552 p. [In Russian]

Тукмаков Дмитрий Алексеевич

кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр
Российской академии наук»
(Россия, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31)
E-mail: tukmakovDA@imm.knc.ru

Tukmakov Dmitriy Alekseevich

candidate of physical
and mathematical sciences, resecher
Federal research center
«Kazan scientific center
Russian Academy of Sciences»
(2/31 Lobachevsky street, Kazan, Russia)

Образец цитирования:

Тукмаков, Д. А. Конечно-разностная модель динамики гомогенной смеси в применении к исследованию распространения и отражения ударной волны большой интенсивности в водородно-воздушной среде / Д. А. Тукмаков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 86–97. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКОЙ НИТИ

Д. А. Тарасов, А. В. Липов, А. М. Ирышков

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATIONS IN MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF A FLEXIBLE FILAMENT

D. A. Tarasov, A. V. Lipov, A. M. Irishkov

Аннотация. *Предмет и цель работы.* В настоящее время в инженерной практике все чаще находят применение композитные материалы, позволяющие учитывать работу в упругопластической области. Появляется необходимость изучения влияния физической нелинейности материала на напряженно-деформированное состояние конструкций. Это особенно важно для систем, моделирование работы которых ведется с учетом геометрической нелинейности. К таким системам можно отнести конструкции, несущую способность которых обеспечивают гибкие нити. *Методы.* Исследования проведены с помощью предложенного метода, основанного на теории математического моделирования с использованием аппарата дифференциального и интегрального исчисления функций одной и нескольких переменных, а также положений сопротивления материалов. *Результаты и выводы.* Проведен сравнительный анализ данных, полученных с помощью линейного и физически нелинейного расчета при разных величинах динамической нагрузки. Выявлены зависимости влияния пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние гибкой нити. Для определения истинного поведения от внешнего воздействия моделирование работы гибкой нити необходимо вести с учетом развития пластических деформаций материала.

Ключевые слова: напряжения, деформации, гибкая нить, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность.

Abstract. *Subject and goals.* Currently, in engineering practice, composite materials are increasingly being used, allowing for the work in the elastic-plastic area. There is a need to study the influence of physical nonlinearity of the material on the stress-strain state of structures. This is especially important for systems that are modeled using geometric nonlinearity. Such systems include structures that have a load-bearing capacity that is provided by flexible threads. *Methods.* The research was carried out using the proposed method based on the theory of mathematical modeling using the apparatus of differential and integral calculus of functions of one and several variables, as well as the positions of the resistance of materials. *Results and conclusions.* A comparative analysis of data obtained using linear and physically nonlinear calculations for different values of dynamic load is carried out. The dependences of the influence of plastic deformations on the stress-strain state of a flexible thread are revealed. To determine the true behavior from external influences, modeling of the flexible thread must be carried out taking into account the development of plastic deformations of the material.

Keywords: stresses, deformations, flexible thread, physical nonlinearity, geometric nonlinearity.

Введение

Все чаще в инженерной практике в качестве материала основных силовых элементов, обеспечивающих прочность конструкций при внешнем воздействии, находят применение композиты, работающие за пределами упругой зоны диаграммы деформирования. Таким образом, появляется необходимость оценки влияния физической нелинейности материала на возникающее напряженно-деформированное состояние (НДС) в указанных элементах. Это особенно важно для механических систем, моделирование работы которых ведется с учетом геометрической нелинейности. К таким механическим системам относятся конструкции, для которых расчетной схемой является гибкая нить. Примером подобных конструкций служат синтетические канаты, представляющие собой основные силовые элементы противотаранных устройств [1–3]. Данные устройства имеют различные конструктивные исполнения [4–7] и предназначены для защиты жизни и здоровья людей, а также охраняемых объектов путем создания физического препятствия несанкционированному продвижению транспортных средств на охраняемую территорию и их принудительной остановки. Однако в настоящее время определение НДС отдельных гибких нитей ведется без учета пластических деформаций материала с использованием известных методик, вошедших в нормативную литературу [8].

Целью настоящей работы является исследование влияния развития пластических деформаций в материале на НДС гибкой нити, испытывающей поперечный удар. Для этого проведем сравнительный анализ результатов, полученных с помощью линейного и физически нелинейного расчета при разных величинах динамической нагрузки.

Материалы и методы

Рассмотрим метод математического моделирования НДС гибкой нити, расчетная схема которой представлена на рис. 1. В основу рассматриваемого метода положена диаграмма состояния материала, представленная на рис. 2. При этом нагрузкой, вызывающей внутренние усилия и перемещения исследуемой геометрически нелинейной системы, является поперечная кратковременная динамическая нагрузка q_1 , заданная импульсом ударяющего транспортного средства (тела), движущимся в горизонтальной плоскости [9–11].

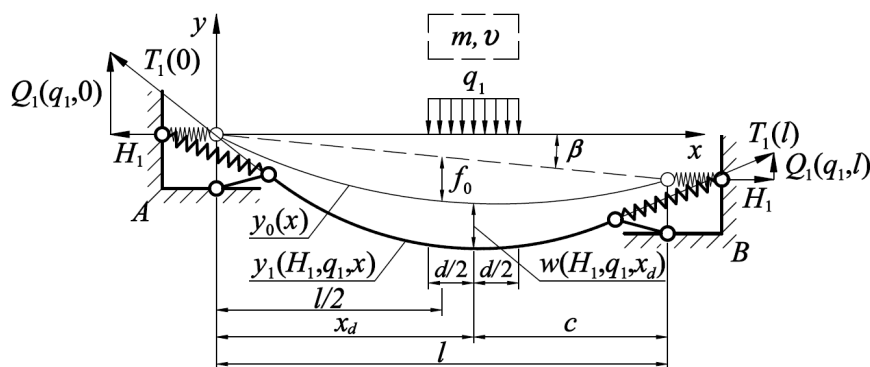


Рис. 1. Расчетная схема гибкой нити:

— — начальное состояние линии равновесия;
 — — конечное состояние линии равновесия

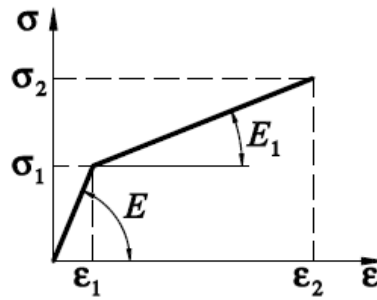


Рис. 2. Диаграмма деформирования

Кусочно-линейная диаграмма деформирования, определяющая связь между напряжениями и относительными деформациями, состоит из двух сегментов и, в зависимости от угла наклона второго сегмента, может выступать в виде диаграммы напряжений с линейным упрочнением без площадки текучести или в виде диаграммы Прандтля (упругопластическое тело). При этом необходимо указать основные параметрические точки диаграммы, такие как максимальные напряжения и соответствующие относительные деформации, граничные значения и т.п. [12].

Уравнения, характеризующие работу рассматриваемой механической системы от внешнего воздействия, описывают изменения по длине гибкой нити напряжений и деформаций, включающих кинематические перемещения. Данные уравнения имеют вид [13–15]:

– главные напряжения:

$$\sigma_1(x) = \frac{T_1(x)}{A}; \quad \sigma_2(x) = \sigma_3(x) = 0, \quad (1)$$

где $T_1(x)$ – функция продольного усилия, Н; A – площадь поперечного сечения, м²; x – текущая абсцисса ($0 \leq x \leq l$), м; l – пролет гибкой нити, м;

– перемещения:

$$w(H_1, q_1, x) = y_1(H_1, q_1, x) - y_0(x), \quad (2)$$

где $y_1(H_1, q_1, x)$ – ордината сечения конечной линии равновесия, вызванная действием поперечной кратковременной динамической нагрузки, м; $y_0(x)$ – ордината сечения начальной линии равновесия от собственного веса, м; H_1 – распор, Н; q_1 – поперечная кратковременная динамическая нагрузка, Н, при $d = 0$ м (Н/м при $d > 0$ м, здесь d – ширина зоны контакта, м).

В уравнении (1) функция продольного усилия определяется так [16, 17]:

$$T_1(x) = \sqrt{H_1^2 + (Q_1(q_1, x) + H_1 \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (3)$$

где $Q_1(q_1, x)$ – функция поперечной силы в шарнирно опертой балке пролетом l от внешнего воздействия, Н; β – угол наклона хорды AB , соединяющей точки крепления, град.

В свою очередь, главные напряжения σ_2 и σ_3 равны нулю, так как гибкая нить способна сопротивляться только растяжению, а жесткость при кручении и изгибе отсутствует. Данное допущение является общепринятым при моделировании работы таких механических систем.

В уравнении (2) в параметры функций включены распор H_1 и поперечная кратковременная динамическая нагрузка q_1 , так как они не известны на момент определения прогиба. Для нахождения указанных параметров необходимо решить систему уравнений с двумя неизвестными, состоящую из уравнения закона сохранения механической энергии и условия неразрывности деформаций, полученную в работах [13, 16]:

$$\begin{cases} \Delta\left(\frac{mv^2}{2}\right) = \frac{1}{2}q_1 \int_{x_d - \frac{d}{2}}^{x_d + \frac{d}{2}} w(H_1, q_1, x) dx; \\ L_0 + \Delta L(H_1, q_1) = L_1(H_1, q_1), \end{cases} \quad (4)$$

где m – масса ударяющего тела, кг; v – скорость ударяющего тела, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; x_d – абсцисса центра зоны контакта, м; L_0 – начальная длина, м; $\Delta L(H_1, q_1)$ – упругопластическая деформация, м; $L_1(H_1, q_1)$ – конечная длина, м.

Запишем выражения по определению всех членов уравнений, составляющих систему (4).

Уравнение, описывающее конечную линию равновесия гибкой нити, имеет вид [17, 18]

$$y_1(H_1, q_1, x) = \frac{M_1(q_1, x)}{H_1} + x \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

где $M_1(q_1, x)$ – функция изгибающего момента в шарнирно опертой балке пролетом l от внешнего воздействия, Н·м.

Кривую начального очертания, образованную под действием собственного веса гибкой нити, с достаточной степенью точности можно представить в виде уравнения параболы [17, 18]:

$$y_0(x) = \frac{4f_0}{l^2}x^2 - \frac{4f_0}{l}x - x \operatorname{tg} \beta, \quad (6)$$

где f_0 – стрела провеса от действия собственного веса в середине пролета, м.

Внутренние усилия при изгибе в однопролетной шарнирно опертой балке определяются следующим образом [13, 16]:

$$\begin{aligned} Q_1(q_1, x) = \frac{q_1 dc}{l}(x \geq 0) - q_1 \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right] \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + \\ + q_1 \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right] \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M_1(q_1, x) = \frac{q_1 dc}{l}x(x \geq 0) - q_1 \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + \\ + q_1 \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где c – расстояние от центра зоны контакта до опоры B , м.

Длина дуги кривой между точками крепления равна первоначальной длине гибкой нити и вычисляется по формуле [17, 18]

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x) \right)^2} dx. \quad (9)$$

Конечная длина равна [13]

$$L_1(H_1, q_1) = \int_0^{l - \frac{2}{u} H_1} \sqrt{1 + \left(\frac{Q_1(q_1, x)}{H_1} + \operatorname{tg} \beta \right)^2} dx, \quad (10)$$

где u – жесткость упругоподатливых опор, Н/м.

В работах [13, 15, 16] получено уравнение по определению упругих деформаций, основанное на законе Гука:

$$\Delta L(H_1, q_1) = \frac{H_1}{EA} \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_1(q_1, x)}{H_1} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx, \quad (11)$$

где E – модуль упругости, Па.

Вместе с тем определять удлинение гибкой нити за пределами упругой работы материала по формуле (11) уже нельзя.

Необходимо по диаграмме деформирования, зная напряжения, найти относительную деформацию, а по ней определить искомое удлинение.

Растягивающие напряжения определяются из выражения [10]

$$\sigma(H_1, q_1) = \frac{H_1}{AL_0} \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_1(q_1, x)}{H_1} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx. \quad (12)$$

В свою очередь, при заданной диаграмме деформирования материала гибкой нити удлинение рассчитывается следующим образом [10]:

$$\Delta L(H_1, q_1) = \begin{cases} \frac{\sigma(H_1, q_1) L_0}{E} & \text{при } \sigma(H_1, q_1) < \sigma_1; \\ L_0 \left(\frac{\sigma(H_1, q_1) - \sigma_1}{E_1} + \varepsilon_1 \right) & \text{при } \sigma_1 \leq \sigma(H_1, q_1) < \sigma_2, \end{cases} \quad (13)$$

где E_1 – модуль упрочнения на 2-м сегменте диаграммы деформирования, Па.

Модуль упрочнения материала на 2-м сегменте диаграммы деформирования определяется из уравнения [10]

$$E_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (14)$$

После того, как определены все члены уравнений, составляющих систему (4), ее можно решить одним из численных методов, например методом сопряженных градиентов.

Общая последовательность моделирования НДС гибкой нити, с учетом развития пластических деформаций в материале при действии поперечной кратковременной динамической нагрузки, отражена на рис. 3 в виде схемы. Предложенный метод реализован с помощью численных процедур решения в виде проблемно-ориентированного программного комплекса [19]. Данный

программный комплекс позволил провести расчеты и принять конструктивные решения при проектировании противотаранных устройств [4–7] с дальнейшей постановкой разработанных изделий на производство и серийным выпуском, что подтверждается сертификатами соответствия в системе ГОСТ Р (Сертификат № 0047832, Сертификат № 2116640).

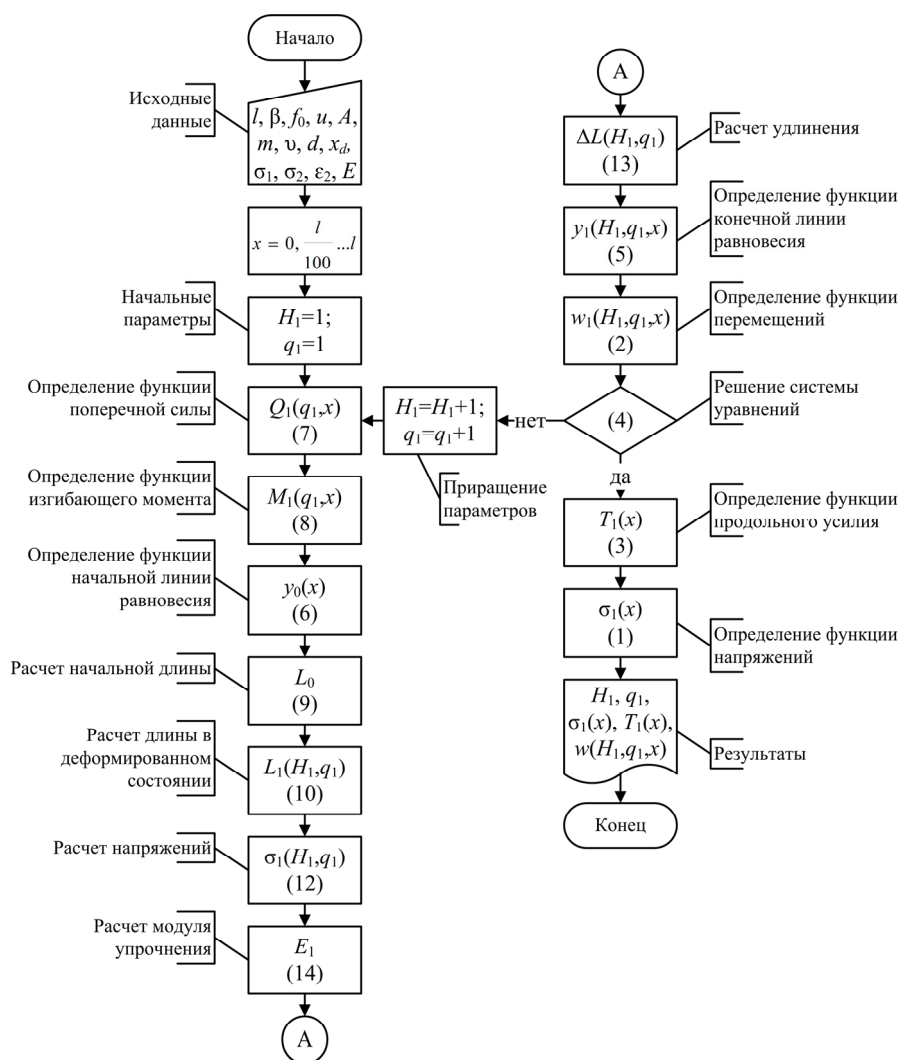


Рис. 3. Схема моделирования НДС гибкой нити

Результаты исследования

В качестве объекта исследования рассмотрим основной силовой элемент противотаранного шлагбаума [4], выполненный из синтетического каната, расчетной схемой которого является гибкая нить, первоначально прямолинейная $f_0 = 0$ м, пролетом $l = 8$ м (ширина перекрываемого проезда шлагбаумом) с жестко закрепленными опорами $u = \infty$, Н/м, расположенными на одном уровне $\beta = 0$ град, сечением $A = 2,316 \cdot 10^{-3}$ м², испытывающая поперечную кратковременную динамическую нагрузку q_1 от ударяющего транс-

портного средства (ГАЗель NEXT) массой $m = 4000$ кг в горизонтальной плоскости посередине пролета $x_d = 4$ м. Ширина зоны контакта $d = 1$ м. Характеристики материала гибкой нити: условный предел текучести $\sigma_1 = 1150$ МПа; временное сопротивление $\sigma_2 = 1350$ МПа; относительное удлинение после разрыва $\varepsilon_2 = 0,05$; модуль упругости $E = 1,471 \cdot 10^5$ МПа.

Для получения выводов рассчитанные при проведенном исследовании значения деформаций, напряжений и поперечной кратковременной динамической нагрузки приведем к следующему безразмерному виду: относительный прогиб $f = \frac{w(H_1, q_1, l/2)}{l} \cdot 100\%$; коэффициент использования прочности

$$k_{\max} = \frac{\sigma_1(l)}{\sigma_2}; \text{ коэффициент динамичности } k_d = \frac{q_1 d}{gm}.$$

Величина относительного прогиба f является критерием способности сопротивляться действию поперечной кратковременной динамической нагрузки и характеризует подверженность гибкой нити деформациям. Выражается в процентном отношении максимального прогиба к пролету.

Оценка несущей способности гибкой нити осуществляется посредством коэффициента использования прочности сечения $k_{\max}$. При этом само значение коэффициента определяет запас прочности для максимально нагруженного сечения. Если несущая способность обеспечивается с запасом, то коэффициент $k_{\max} < 1$. Значение $k_{\max} > 1$ показывает степень перегрузки.

Коэффициент динамичности k_d указывает, во сколько раз поперечная кратковременная динамическая нагрузка, возникающая вследствие удара, больше, чем нагрузка при статическом приложении веса ударяющего тела.

На рис. 4 представлен график изменения относительного прогиба в середине пролета от скорости ударяющего тела, полученный в физически нелинейной постановке задачи, с учетом развития пластических деформаций, а также в линейной постановке, основанной на законе Гука.



Рис. 4. График изменения относительного прогиба

Анализ полученных данных показывает, что в рассматриваемой гибкой нити, с заданными физическими и геометрическими параметрами, пластические деформации начинают возникать при скорости ударяющего тела, равной $v = 8,3$ м/с. После достижения указанного значения скорости при физически нелинейном расчете наблюдается значительный рост деформаций, включающих упругопластические деформации и кинематические перемещения. По аналогии с пластическим деформированием традиционных стальных конструкций, работающих на изгиб, данное состояние гибкой нити предложено называть «условным пластическим шарниром».

На рис. 5 представлен график изменения коэффициента использования прочности максимально нагруженных (приопорных) сечений гибкой нити от скорости ударяющего тела. Из графика видно, что учет развития пластических деформаций приводит к значительному снижению расчетных значений максимальных растягивающих напряжений при увеличивающейся скорости ударяющего тела.

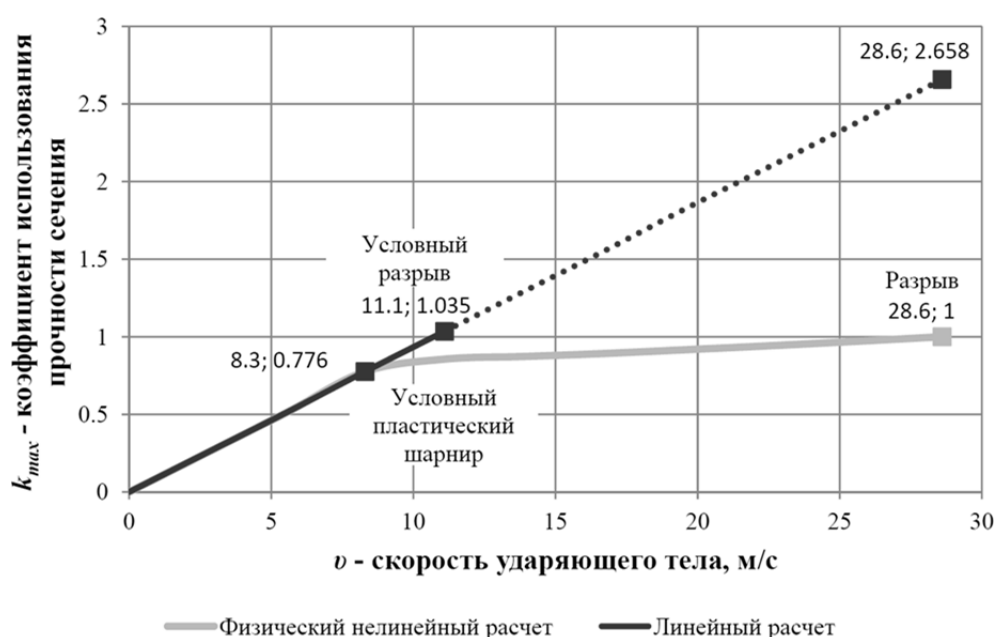


Рис. 5. График изменения коэффициента использования прочности сечения

Следует отметить, что разрыва гибкой нити в физически нелинейной постановке при скорости ударяющего тела, равной $v = 11,1$ м/с, не происходит, хотя в линейной постановке задачи при данной скорости растягивающие напряжения в материале достигают временного сопротивления разрыву. Данное состояние предложено называть «условным разрывом».

На рис. 6 представлен график изменения коэффициента динамичности от скорости ударяющего тела. Анализ графика показывает снижение поперечной кратковременной динамической нагрузки, действующей на гибкую нить в свою очередь возникающей в результате удара горизонтально движущимся телом. Данный факт обусловлен уменьшением жесткости гибкой нити и вызван развитием пластических деформаций в материале.

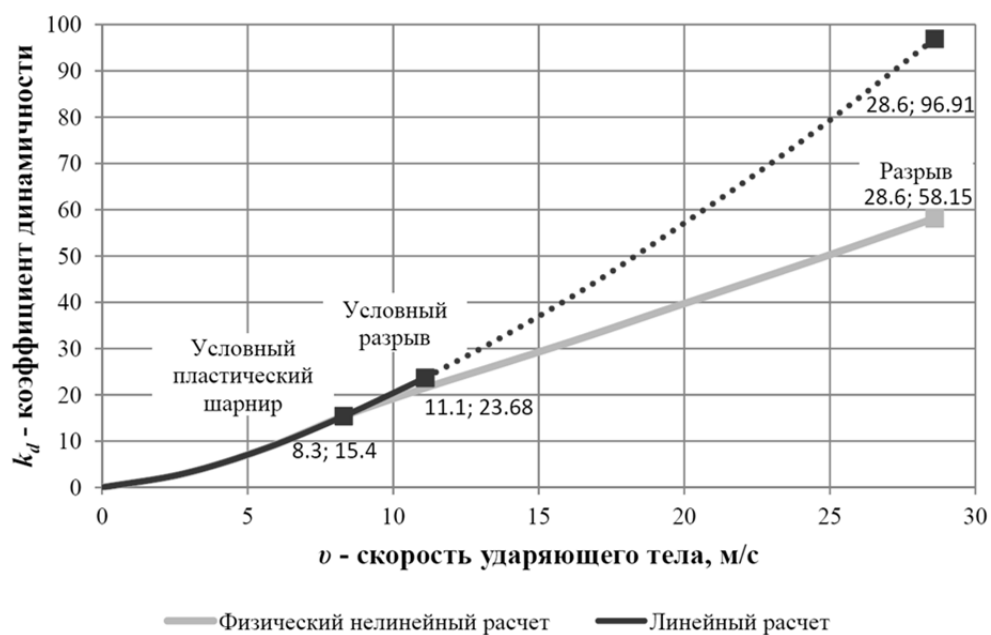


Рис. 6. График изменения коэффициента динамичности

Для обобщения выводов данные, полученные с помощью линейного расчета, использующего в своей основе закон Гука и физически нелинейный расчет, учитывающий реальные свойства материала, приведем к безразмерному виду. Для этого предложено ввести коэффициент нелинейности $k_{нел}$.

Коэффициент нелинейного поведения $k_{нел}$ гибкой нити в физически нелинейной постановке может иметь только положительное значение: равное, больше или меньше 1. Значение, равное 1, соответствует ситуации, когда напряжения, деформации или нагрузка, определяемые как в линейной, так и в физически нелинейной постановке задачи, равны. Это говорит об отсутствии пластических деформаций в материале гибкой нити. Любое другое значение показывает, во сколько раз напряжения, деформации или нагрузка, найденные за пределами упругой зоны работы материала, отличаются от этих же параметров, определенных с помощью линейного расчета, не учитывающего неупругие деформации.

Из анализа графика, представленного на рис. 7, можно сделать вывод о том, что на нелинейность поведения гибкой нити в значительной мере влияет скорость, с которой движется тело в первоначальный момент удара. Это объясняется образованием, а затем дальнейшим развитием пластических деформаций в материале. Причем нелинейность при определении напряжений и поперечной кратковременной динамической нагрузки возникает в большей степени, чем при определении деформаций.

Заключение

В целом на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что на значения возникающих напряжений и деформаций в гибкой нити, а также поперечной кратковременной динамической нагрузки, возникающей вследствие таранного удара транспортным средством, значительное

влияние оказывает развитие пластических деформаций в материале. В силу этого моделирование НДС гибкой нити, испытывающей поперечный удар, предложено вести с учетом физической нелинейности с помощью разработанного метода, отраженного на рис. 3. Это позволит определять истинное НДС гибкой нити при увеличивающейся скорости ударяющего тела и, соответственно, возрастающей поперечной кратковременной динамической нагрузке. В свою очередь, это даст возможность выявлять скрытые резервы прочности либо снижать материалоемкость изделий, а также передаваемые нагрузки на нижележащие конструкции, например, такие как фундаменты противотаранных устройств.

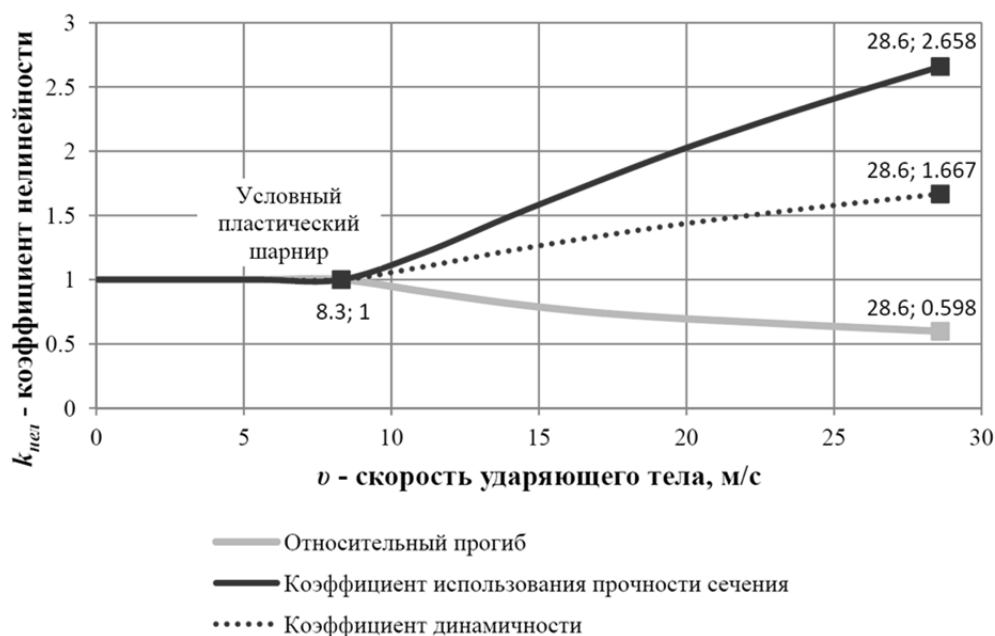


Рис. 7. График изменения коэффициента нелинейности

Библиографический список

1. Тарасов, Д. А. Конструкция защитного сооружения от удара для железнодорожных переездов / Д. А. Тарасов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1 (18). – С. 111–117.
2. Швецов, А. В. Противотаранное заградительное устройство / А. В. Швецов // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 2-3 (63-64). – С. 58–60.
3. Елисеев, В. В. Моделирование и расчет противотаранного шлагбаума / В. В. Елисеев, Е. А. Оборин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 351–357.
4. Патент № 2621774 РФ. Противотаранный барьер / П. А. Косяков, Д. А. Тарасов, Н. А. Шалашилин, О. Л. Шаповал ; заявл. 21.10.2015 ; опубл. 07.06.2017, Бюл. № 16. – 11 с.
5. Патент № 2694376 РФ. Противотаранные откатные ворота / А. А. Кодоров, Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, И. В. Васильев, О. Л. Шаповал ; заявл. 24.12.2018 ; опубл. 12.07.2019, Бюл. № 20. – 12 с.
6. Патент № 2668118 РФ. Габион / И. В. Васильев, В. А. Сигаев, Д. А. Тарасов, О. Л. Шаповал ; заявл. 22.11.2017 ; опубл. 26.09.2018, Бюл. № 27. – 11 с.

7. Патент № 191852 РФ. Противотаранное ограждение / Д. А. Тарасов, Г. С. Большаков, И. В. Васильев, О. Л. Шаповал ; заявл. 30.12.2019 ; опубл. 26.08.2019, Бюл. № 24. – 8 с.
8. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
9. Безбородов, Р. С. Исследование динамики противотаранной цепи / Р. С. Безбородов, Ю. Л. Рутман // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 4 (63). – С. 119–123.
10. Сильников, Н. М. Обзор зарубежных методик испытания и оценки противотаранных устройств / Н. М. Сильников, П. Д. Панов, А. С. Панков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 11-12 (113-114). – С. 101–108.
11. Осипенко, М. А. Задача об одностороннем контакте гибкой нерастяжимой нити и твердого тела / М. А. Осипенко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – № 1 (33). – С. 82–87.
12. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности / Д. А. Тарасов, Д. Ю. Семенов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 175–185.
13. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования работы стальных канатов при действии поперечной динамической нагрузки / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 02 (24). – С. 48–55.
14. Дремова, Н. В. Математическая модель в задачах динамических систем с гибкими нитями / Н. В. Дремова, Т. Мавлянов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (4–5 июня 2014 г.) : в 3-х т. / под ред. А. А. Горохова. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 197–201.
15. Тарасов, Д. А. Комплекс программ моделирования напряженно-деформированного состояния стальных канатов / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12 (16). – С. 114–120.
16. Тарасов, Д. А. Параметрическая оптимизация стальных канатов при действии поперечного удара / Д. А. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 02 (24). – С. 56–62.
17. Biggins, J. S. Understanding the chain fountain / J. S. Biggins, M. Warner // Proc. Roy. Soc. A. – 2014. – P. 470. – DOI 10.1098/rspa.2013.0689.
18. Herrmann, F. The chain fountain with momentum currents / F. Herrmann // Karlsruhe Institute of Technology. – 2015. – URL: http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/publication/Chain_fountain.pdf.
19. Свидетельство № 2018611086 РФ. Программа моделирования напряженно-деформированного состояния гибких нитей с учетом физической нелинейности материала / Д. А. Тарасов, А. Г. Лебедкин, О. Л. Шаповал ; заявл. 28.11.2017 ; опубл. 23.01.2018, Бюл. № 2. – 1 с.

References

1. Tarasov D. A., Konovalov V. V., Zaytsev V. Yu. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2014, no. 1 (18), pp. 111–117. [In Russian]
2. Shvetsov A. V. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport Of The Russian Federation]. 2016, no. 2-3 (63-64), pp. 58–60. [In Russian]
3. Eliseev V. V., Oborin E. A. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* [Modern mechanical engineering. Science and education]. 2014, no. 4, pp. 351–357. [In Russian]

4. Patent № 2621774 RF. *Protivotarannyy bar'er* [Patent No. 2621774 of the Russian Federation. Anti-ramming barrier]. P. A. Kosyakov, D. A. Tarasov, N. A. Shalashilin, O. L. Shapoval; appl. 21.10.2015; publ. 07.06.2017, bull. no. 16, 11 p. [In Russian]
5. Patent № 2694376 RF. *Protivotarannye otkatnye vorota* [Patent No. 2694376 of the Russian Federation. Anti-RAM sliding gates]. A. A. Kodorov, D. A. Tarasov, G. S. Bol'shakov, I. V. Vasil'ev, O. L. Shapoval; appl. 24.12.2018; publ. 12.07.2019, bull. no. 20, 12 p. [In Russian]
6. Patent № 2668118 RF. *Gabion* [Patent No. 2668118 of the Russian Federation. Gabion]. I. V. Vasil'ev, V. A. Sigaev, D. A. Tarasov, O. L. Shapoval; appl. 22.11.2017; publ. 26.09.2018, bull. no. 27, 11 p. [In Russian]
7. Patent № 191852 RF. *Protivotarannoe zagrazhdenie* [Patent no. 191852 of the Russian Federation. Anti-RAM barrier]. D. A. Tarasov, G. S. Bol'shakov, I. V. Vasil'ev, O. L. Shapoval; appl. 30.14.2019; publ. 26.08.2019, bull. no. 24, 8 p. [In Russian]
8. *Posobie po proektirovaniyu stal'nykh konstruktsiy (k SNiP II-23-81* «Stal'nye konstruktsii»)* [Manual for the design of steel structures (SNiP II-23-81* "Steel structures")]. TsNIISK im. Kucherenko Gosstroya SSSR. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 1989, 148 p. [In Russian]
9. Bezborodov R. S., Rutman Yu. L. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2017, no. 4 (63), pp. 119–123. [In Russian]
10. Sil'nikov N. M., Panov P. D., Pankov A. S. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism]. 2017, no. 11-12 (113-114), pp. 101–108. [In Russian]
11. Osipenko M. A. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Bulletin of Tomsk state University. Mathematics and mechanics]. 2015, no. 1 (33), pp. 82–87. [In Russian]
12. Tarasov D. A., Semenov D. Yu. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society]. 2017, no. 3 (23), pp. 175–185. [In Russian]
13. Tarasov D. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 02 (24), pp. 48–55.
14. Dremova N. V., Mavlyanov T. *Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. nauch. tr. 4-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (4-5 iyunya 2014 g.): v 3-kh t.* [Innovation, quality and service in engineering and technology : collection of scientific works. Tr. 4-th Intern. scientific-practical Conf. (June 4-5, 2014): in 3 vols.]. Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t, 2014, vol. 1, pp. 197–201.
15. Tarasov D. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2013, no. 12 (16), pp. 114–120. [In Russian]
16. Tarasov D. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 02 (24), pp. 56–62. [In Russian]
17. Biggins J. S., Warner M. *Proc. Roy. Soc. A*. 2014, p. 470. DOI 10.1098/rspa.2013.0689.
18. Herrmann F. *Karlsruhe Institute of Technology*. 2015. Available at: http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/publication/Chain_fountain.pdf.
19. *Svidetel'stvo № 2018611086 RF. Programma modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gibkikh nitey s uchetom fizicheskoy nelineynosti materiala* [Certificate no. 2018611086 of the Russian Federation. Program for modeling the stress-strain state of flexible filaments taking into account the physical nonlinearity of the material]. D. A. Tarasov, A. G. Lebedkin, O. L. Shapoval; appl. 28.11.2017; publ. 23.01.2018, bull. no. 2, 1 p. [In Russian]

Тарасов Денис Александрович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизированных систем
безопасности,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tarasov.denis.penza@gmail.com

Tarasov Denis Alexandrovich
candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of automated security
systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Липов Александр Викторович
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой компьютерного
проектирования технологического
оборудования,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Lipov Alexander Viktorovich
candidate of technical sciences,
head of sub-department
of computer-aided design
of technological equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ирышков Алексей Михайлович
магистрант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexei.iryshkov@yandex.ru

Iryshkov Aleksey Mihailovich
master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Тарасов, Д. А. Исследование влияния пластических деформаций при моделировании напряженно-деформированного состояния гибкой нити / Д. А. Тарасов, А. В. Липов, А. М. Ирышков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 98–110. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-8.

ПРОАКТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

И. Н. Колесников, А. Г. Финогеев

PROACTIVE EVENT MONITORING BASED ON PREDICTIVE TIME SERIES ANALYSIS

I. N. Kolesnikov, A. G. Finogeev

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Рассматриваются методы проактивного мониторинга дорожно-транспортной инфраструктуры на основе сбора и обработки больших данных о событиях на контролируемых участках дорог. В процессе мониторинга выполняется консолидация разнородных данных из множества открытых источников и извлечение характеристик событий с целью представления их динамики в виде временных рядов для предиктивного моделирования, анализа и оценки рисков возникновения и развития нештатных и аварийных происшествий с учетом влияния внешних факторов. *Методы.* Для достижения цели и задач исследований использовались методы сбора, консолидации и обработки больших данных (Big Data) с целью идентификации, классификации и кластеризации событий, сравнительного анализа спектров временных рядов характеристик и факторов влияния. Большие данные о дорожно-транспортных происшествиях поступают с фоторадарных комплексов фото- и видеофиксации правонарушений и транспортных средств, а также с открытых источников в сети Интернет и мобильных средств связи участников событий. *Результаты и выводы.* Рассмотрены методы и инструментальные средства для сбора и анализа больших данных о событиях для предиктивной аналитики, такие как Hadoop, MapReduce и NoSQL. Предложены способы сбора и консолидации разнородных данных для синтеза временных рядов, анализа и предиктивного моделирования. Приведен алгоритм обработки текстовых сообщений для перехода к векторной модели слов и машинного обучения системы прогнозирования на основе спектров временных рядов событий. Результаты мониторинга необходимы для превентивного реагирования на возможные негативные события и происшествия в дорожной среде для снижения аварийных ситуаций и оказания экстренной помощи. Рассматриваемая система проактивного мониторинга основывается на методах сбора и анализа больших данных и интеллектуального анализа данных, полученных из различных информационных источников. В системе предлагается использование прогностического моделирования рисков возникновения и развития событий за счет построения спектра временных рядов на основе векторного представления слов. Данные методы позволят системе проактивного мониторинга решать задачи оценки и рисков возникновения нештатных и аварийных событий на дорогах с учетом влияния внешних факторов, контролировать участки дорог и транспортные средства, отслеживать локации мест аварий и прочих деструктивных событий на дорогах.

Ключевые слова: большие данные, интеллектуальный анализ данных, временные ряды, предиктивная аналитика, прогностическое моделирование, Hadoop, MapReduce, NoSQL.

Abstract. *Subject and goals.* The article discusses methods of proactive monitoring of road transport infrastructure based on the collection and processing of big data about events on controlled sections of roads. In the process of monitoring, heterogeneous data is consolidated from many open sources and the characteristics of events are extracted in or-

der to present their dynamics in the form of time series for analysis and prognostic modeling of the risks of emergencies and emergencies taking into account the influence of external factors. *Methods.* To achieve the goal and objectives of the research, methods of collecting, consolidating and Big Data processing, identification, classification and clustering of events, a comparative analysis of the spectra of time series of their characteristics and influence factors are used. Big data on traffic accidents and incidents comes from distributed photo-radar photo and video recording complexes of offenses and vehicles, as well as from open sources on the Internet and from mobile means of communication of witnesses and participants in events. *Results and conclusions.* Methods and tools were selected for collecting and analyzing big data about events in a proactive monitoring system, such as Hadoop, MapReduce and NoSQL. The main methods for collecting and consolidating heterogeneous data for intelligent analysis and predictive modeling are considered. An algorithm for collecting and preparing textual data using the vector representation of words for machine learning a prediction system based on spectra of time series of events is presented. The results of proactive monitoring are necessary for a proactive response to possible negative events and incidents in the road environment to reduce emergency situations and provide emergency assistance. The proactive monitoring system under consideration is based on the methods of collecting and analyzing big data, and the intellectual analysis of data obtained from various information sources. The system proposes the use of prognostic modeling of risks of occurrence and development of events by constructing a spectrum of time series based on a vector representation of words. These methods will allow the proactive monitoring system to solve the problems of assessing and the risks of emergency and emergency events on the roads, taking into account the influence of external factors, to control road sections and vehicles, to track the locations of accident sites and other destructive events on the roads.

Keywords: big data, data mining, time series, predictive analytics, predictive modeling, Hadoop, MapReduce, NoSQL.

Введение

Современным трендом в управлении сложными системами является использование элементов искусственного интеллекта, включая методы интеллектуального анализа данных, машинного обучения и предиктивного моделирования. Данные элементы обуславливают переход к проактивной концепции управления на основе обработки больших данных [1]. Концепция позволяет предотвращать риски возникновения и развития аварий и катастроф на основе предиктивного анализа событий и синтеза упреждающих воздействий [2]. Методы проактивного управления широко используются в киберфизических системах, которые являются атрибутом четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» [3, 4]. В интеллектуальных киберфизических системах применяются технологии работы с большими данными, методы машинного обучения и прогнозирования, межмашинного (M2M) взаимодействия в среде Интернет вещей [5]. Важнейшим аспектом проактивного управления является решение прогнозных задач для синтеза превентивных мер предупреждения или минимизации рисков нештатных и аварийных ситуаций [6]. Поэтому основным принципом здесь является применение схемы действий на основе анализа данных о старых событиях (event-driven принцип) для предсказания новых событий, которая представляет собой методику обнаружить–предсказать–решить–действовать («detect–forecast–decide–act»). Типовой алгоритм работы проактивных систем управления включает этапы: а) идентификации и классификации событий, б) иден-

тификации факторов влияния для установления связи с событиями, в) анализа чувствительности событий к выявленным факторам, г) выбора прогностической модели для оценки рисков негативных событий, д) прогностического моделирования событий, е) сравнительного анализа результатов прогноза с аналогами, ж) выбора решений для минимизации рисков.

Результатом внедрения проактивных технологий является перевод лиц, принимающих решения, из подсистемы управления в подсистему конфигурирования и контроля с передачей им функций настройки, контроля и диагностики работы средств мониторинга [7]. Фактически субъект управления переходит на уровень координации и супервизорного контроля процесса оперативного мониторинга в сложных территориально-распределенных системах.

Методы сбора и обработки больших данных для анализа событий

Проведем анализ существующих подходов к мониторингу дорожно-транспортной инфраструктуры. При мониторинге дорожно-транспортной инфраструктуры используются традиционные методы и методы дистанционного мониторинга. К традиционным методам относятся:

- *регистрация проходящего автотранспорта людьми – операторами.* При этом человек должен регистрировать параметры безопасности дорожного движения и заносить свои наблюдения в полевой журнал. Для полного охвата больших территорий необходима одновременная работа большого числа операторов. На точность влияют квалификация оператора, усталость, невнимательность. Это приводит к ошибкам и некоторому искажению реальной ситуации;

- *опрос работников автотранспортных предприятий.* Этот метод позволяет достаточно быстро оценить наиболее напряженные участки дорожной сети, но имеет недостатки в точности.

К методам дистанционного мониторинга относятся:

- *регистрация проходящего автотранспорта с помощью различных датчиков.* К достоинствам можно отнести оперативность получаемой информации, а также точность измерений, которая повышается за счет автоматической регистрации, автоматической передачи данных в центр обработки, и минимизации влияния «человеческого фактора». К недостаткам можно отнести то, что единовременные затраты на установку датчиков, развитие инфраструктуры связи с центром обработки довольно высоки;

- *проактивный мониторинг дорожно-транспортной инфраструктуры.* Помимо данных с различной информацией, получаемой с различных датчиков, информация о дорожно-транспортной ситуации поступает из большого числа различных источников. Для обработки большого количества данных и использования их для прогнозирования будущей ситуации используются элементы искусственного интеллекта и методы интеллектуального анализа данных. К недостаткам можно отнести существенное усложнение системы и возможные ошибки прогнозов при неправильно выбранных моделях прогнозирования. К достоинствам – полная автоматизация процесса и возможность получения прогнозов дорожно-транспортной ситуации, позволяющая предотвращать различные инциденты.

Рассмотрим современный подход, которым является проактивный мониторинг объектов, процессов и событий в киберфизических системах с множеством пространственно-распределенных объектов. Примером систем являются интеллектуальные энергетические сети (Smart Energy Grid) [8], интеллектуальные производственные системы (Smart Manufacturing), системы интеллектуального управления городским и дорожным освещением (Smart Light), системы «умный» город (Smart City) [9], интеллектуальные системы мониторинга дорожно-транспортной инфраструктуры (Smart&Safe Road) [10]. В последнем случае объектами мониторинга являются участки дорог и компоненты дорожной инфраструктуры (знаки, остановки, переходы, устройства регулировки, устройства фото- и видеофиксации, транспортные средства, участники дорожного движения, придорожные объекты, системы дорожного освещения и т.д.) [11]. Сложность мониторинга связана с протяженностью и разбросом контролируемых объектов на большой территории. Поэтому система проактивного мониторинга должна иметь комплекс инструментальных средств сбора и анализа больших данных о событиях в дорожной среде для предиктивного анализа временных рядов событий и прогнозной оценки рисков происшествий. Примером событий являются: дорожно-транспортные происшествия, нарушения правил дорожного движения, пробки и заторы, поведение участников движения, нарушение дорожного покрытия, ремонтные работы, сбои в работе дорожного регулирующего оборудования, проблемы с уличным освещением, проблемы с дорожными знаками, ухудшение метеоусловий и т.п. Дорожно-транспортные происшествия являются наиболее массовыми негативными событиями [12]. Подобные технологии уже используются, например, для синхронизации работы светофоров и регулировки транспортных потоков на перекрестках [7], для оптимизации пропускной способности магистралей в зависимости от плотности трафика и пробок [13], для выявления скрытых закономерностей в данных о произошедших инцидентах с целью прогноза новых происшествий [14].

В данной статье решается задача сбора больших данных о событиях, представления динамики характеристик событий и внешних факторах в виде временных рядов для сравнительного анализа и прогностического моделирования рисков возникновения и развития новых инцидентов на контролируемых участках дорог. Технологии интеллектуального анализа позволяют выявлять скрытые закономерности в множестве данных и связать их с влиянием разных факторов для прогнозирования вероятности появления и развития негативных событий. В ходе предиктивного анализа временных рядов идентифицируется и прогнозируется вероятность неблагоприятного развития событий, а методы машинного обучения позволяют находить механизмы превентивного реагирования на инциденты.

Как известно, термин «большие данные» (Big Data) означает совокупность подходов, инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных огромных объемов и значительного многообразия для получения результатов, воспринимаемых человеком и эффективных в условиях их непрерывного прироста [15]. К основным свойствам больших данных чаще всего относят [16]:

1. Сверхбольшой объем информации, который генерируется, собирается и хранится от множества источников данных разных типов.

2. Высокая скорость генерации и обработки данных в режиме реального времени, которая позволяет принимать наиболее адекватные решения для конкретной ситуации с учетом воздействий на процесс управления.

3. Многообразие информации, генерируемой из множества источников в различных форматах, с разной структурой и размером, относящимся к любым категориям и аспектам управления, что требует необходимости предварительной классификации, стратификации, кластеризации, консолидации и т.д.

Исследования, проведенные в 2018 г., показали, что более 55 % компаний в мире готовы к внедрению в бизнес-процессы инструментальных средств по работе с большими данными [17]. Прежде всего такие технологии и системы могут быть использованы в финансовой сфере, в государственном секторе, в медицинской индустрии, на предприятиях IT-области и в интернет-компаниях.

Для работы с большими данными необходимы способы хранения и обработки информации, отличные от традиционных OLAP систем [18]. На первый план выходят распределенные системы обработки и хранения больших данных класса Business Intelligence. Их появление связано с развитием технологических возможностей для сбора, обработки и хранения огромных массивов данных непосредственно на сетевых узлах. Выбор средств обработки больших данных обусловлен характеристиками, которые включают объем данных, структурированность (таблицы реляционных баз данных), вид мультимедийных данных, скорость генерации, изменчивость, достоверность, актуальность, сложность и т.п. В табл. 1 приведены различия между подходами к аналитической обработке обычных и больших данных.

Таблица 1

Традиционная OLAP аналитика и аналитика больших данных

OLAP аналитика	Big data аналитика
Постепенный анализ небольших пакетов данных	Обработка сразу всего массива доступных данных
Редакция и сортировка данных перед обработкой	Данные обрабатываются в их исходном виде
Старт с гипотезы и ее тестирования относительно данных	Поиск корреляций по всем данным до получения искомой информации
Данные собираются, обрабатываются, хранятся и лишь затем анализируются	Анализ и обработка больших данных в реальном времени по мере поступления

Платформа для работы с большими данными должна обеспечивать [19]:

- горизонтальную масштабируемость вычислительной системы (реализуется через возможность модульного расширения);
- отказоустойчивость (обеспечивается путем резервирования);
- адаптивность (реализуется за счет настройки на данные из конкретной предметной области);
- локализацию (выполняется через внедрение распределенной обработки данных в местах их сбора).

Распространенным подходом на текущий момент к распределенной обработке больших данных являются схема и метод MapReduce (рис. 1) от компании Google, где в качестве модели хранилища используется нереляционная

(NoSQL) модель на платформе Hadoop [20]. Преимуществами NoSQL модели являются использование различных типов хранилищ, интегрируемость, масштабируемость.

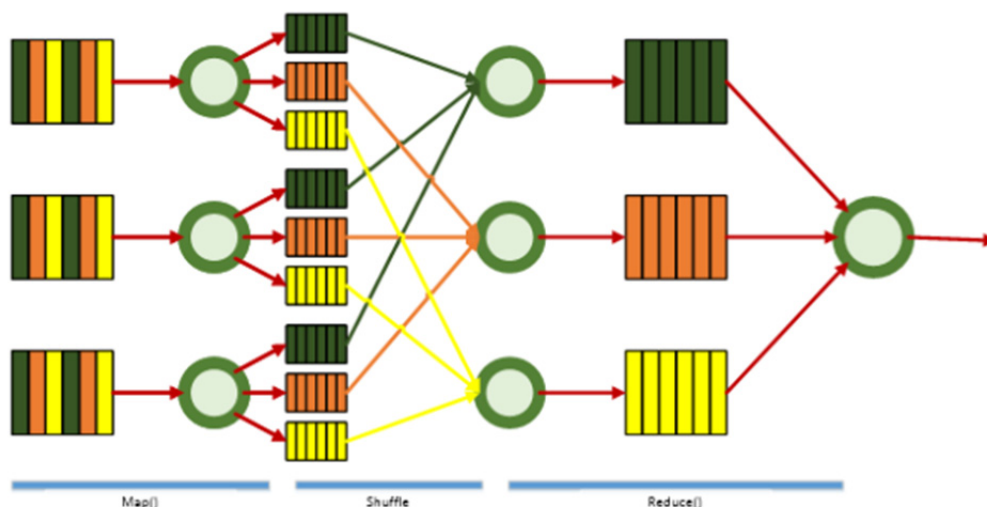


Рис. 1. Схема работы с данными MapReduce¹

Согласно модели MapReduce обработка данных выполняется в 3 этапа:

1. На первом этапе (Map) реализуется обработка и фильтрация данных с помощью функции, определяемой пользователем. Функция аналогична операции Map в программировании и применяется к входному потоку данных.

2. На втором этапе (Shuffle) результаты выполнения пользовательской функции раскладываются по корзинам, где корзина соответствует ключу для результата операции Map и служит входными данными для этапа Reduce.

3. На третьем этапе (Reduce) каждая корзина является источником данных для функции Reduce, которая задается пользователем для вычисления окончательного результата.

Платформа Hadoop для хранения и управления данными включает:

- распределенную файловую систему Hadoop Distributed File System (HDFS) для иерархического хранения неструктурированных данных;
- прикладной программный интерфейс (API) для создания приложений обработки больших данных в серверном кластере;
- систему управления данными Apache Hadoop YARN.

Платформа позволяет снизить время обработки неструктурированной информации и стоимость оборудования за счет использования типовых модулей расширения, что, в свою очередь, решает проблемы горизонтального масштабирования и отказоустойчивости.

¹ Introduction to MapReduce. – URL: <https://developerzen.com/introduction-to-mapreduce-for-net-developers-1030e070698a>.

В качестве источников больших данных в первую очередь следует отметить открытые источники в сети Интернет, такие как новостные сайты, социальные сети, мессенджеры, системы видео- и фотохостинга и т.п., где ежедневно выкладывается огромный объем мультимедийной информации. Другими источниками являются доступные данные из корпоративных информационных систем предприятий, а именно, транзакционная деловая информация, архивы, базы данных и т.п. Также к источникам следует отнести множество киберфизических объектов в сети Интернет вещей, включающих измерительные приборы, датчики, камеры видеонаблюдения, SCADA системы, мобильные средства связи. В дорожно-транспортной инфраструктуре в качестве источников больших данных выступают фоторадарные комплексы фото- и видеофиксации дорожно-транспортных происшествий (ДТП) (рис. 2), камеры видеонаблюдения, средства безопасности дорожного движения, средства навигации, интеллектуальные транспортные системы, мобильные средства связи участников дорожного движения. В разрабатываемой системе мониторинга к основным средствам сбора относятся фоторадарные комплексы, открытые источники в сети Интернет и мобильные системы свидетелей событий. Все процедуры сбора данных можно разделить:

1. Сбор данных с систем слежения за элементами дорожно-транспортной инфраструктуры (измерительных устройств, фоторадарных комплексов, дорожных камер видеонаблюдения и т.п.). Процедура представляет собой процесс автоматизированного получения сенсорных данных посредством опроса фоторадарных комплексов, камер видеонаблюдения и сенсорных узлов, расположенных на автомагистралях или вблизи них.

2. Сбор данных с внешних систем (метеорологических станций, систем навигации, интеллектуальных транспортных систем и т.п.). Примером являются данные с навигационного оборудования транспортных средств и систем реагирования (навигаторы, транспондеры, GPS/ГЛОНАСС модули, системы ЭРА-ГЛОНАСС, eCall, ЭВАК, E911 и т.п. Данная процедура позволяет выявлять факторы, влияющие на риски ДТП в зависимости от текущей обстановки на дорогах, погодных условий, состояния дорожного покрытия, времени суток, дорожного трафика и т.д.

3. Сбор данных с мобильных средств связи участников дорожного движения и сторонних наблюдателей. Такая информация часто представляет собой фотографии или видеоролики, которые затрудняют извлечение данных. Однако если они сопровождаются текстовыми сообщениями, то это облегчает задачу. Проблемой является наличие множества источников с данными об одном событии, что требует очистки недостоверной информации и исключения дубликатов.

4. Сбор данных, размещенных в источниках сети Интернет (социальные сети, форумы, мессенджеры, web-ресурсы). Процедура включает извлечение и анализ текстовых сообщений, поиск и распознавание изображений на фотографиях и видеокадрах, регистрацию событий по извлеченной информации, сопоставление данных с различных ресурсов для удаления дубликатов и подтверждения достоверности событий и т.д.

5. Сбор и обработка данных со специализированных сервисов типа Yandex-карты, Google карты, Yandex-навигатор, Navitel и т.п.

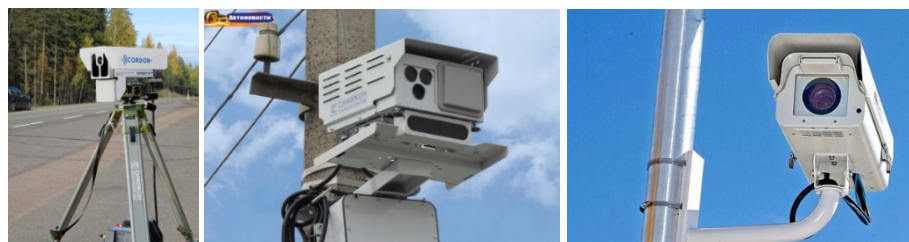


Рис. 2. Фоторадарные комплексы фото- и видеофиксации ДТП

Вся информация, полученная в рамках процедур, представляет набор больших разнородных данных, включая телеметрические (сенсорные) данные, текстовые сообщения, фотографии, кадры из видеороликов, данные мобильных приложений и онлайн сервисов. Поэтому перед анализом данных необходима очистка зашумленной информации, унификация, структурирование, консолидация данных. Консолидация данных включает: поиск ассоциаций и корреляций, нормализацию, исключение дубликатов, интеграцию текстовой и графической информации о событии, оценку актуальности и достоверности и т.п.

Методы представления данных о событиях в виде временных рядов

Для прогностического моделирования рисков негативного развития событий предлагается информацию о событиях из разных источников, а также динамику изменения факторов влияния на события представить в виде временных рядов [20, 21]. Сравнение временных рядов характеристик событий и факторов позволяет установить зависимости появления событий от влияния конкретных факторов. Временной ряд для системы мониторинга представляет собой последовательность числовых значений величин, изображений и текстов, для которых известен момент времени, в который они были получены [22]. Для предиктивного анализа событий сначала требуется определить функциональную зависимость, адекватно описывающую его временной ряд. Затем необходимо выявить фактические изменения характеристик событий во временном ряду, влияющие на формирование прогноза [23]. Таким образом можно определить интервалы с аномальными отклонениями числа ДТП от среднего значения для установления корреляции с изменениями значений факторов в соответствующих временных рядах. Сравнительный анализ временных рядов появления и развития инцидентов и временных рядов изменения факторов влияния позволяет установить корреляции между ними. Для оценки чувствительности событий к влиянию факторов применяется метод многофакторного дисперсионного анализа. Таким образом, определяются наиболее сильные факторы влияния, которые выбираются в качестве входных данных для модели прогнозирования динамики инцидентов. Методика обработки текстовых данных для представления в виде временного ряда включает следующие этапы [24]:

1. Регистрация событий на контролируемом участке дороги посредством автоматизированных средств фото- и видеофиксации либо посредством сообщений, фото- и видеоматериалов в источниках сети Интернет.

2. Фиксация информации о событии с извлечением метаданных с текстовых сообщений, фотографий и видеороликов, которые содержат временные и геопространственные метки событий для привязки описаний к временной шкале и к картографической основе.

3. Фиксация информации о параметрах факторов влияния на события (температуры, давления, влажности, скорости ветра, гололеда, времени суток, освещенности, состояния дороги и обочины, плотности трафика, количества транспортных средств и пешеходов, скоростного режима, наличия разметки, количества полос движения, наличия препятствий движению и пробок, наличия средств регулирования движения, состояния участников движения и т.д.).

4. Синтез векторной модели слов для описания события, его идентификации и классификации события по типу, подтверждение факта его появления и достоверности с помощью фото- и видеоматериалов, полученных с разных источников в фиксированный интервал времени и в конкретном местонахождении информационных источников.

5. Поиск сообщений о событии из множества источников по временной и геопространственной метке, а также по ключевым словам. Синтез множества векторных моделей текстовых сообщений о событии для формирования временного ряда векторов слов с момента появления сообщений, фиксация области распространения сообщений по карте местности и синтез динамической графовой модели распространения сообщений в социальных сетях.

6. Выбор и регистрация характеристик описания события и возможных факторов влияния на его появление и развитие события в зависимости от его типа с последующей фиксацией их значений в моменты времени для синтеза спектра временных рядов (паттерна события) для отобранных характеристик и факторов.

7. Поиск информации об аналогичных событиях в другие временные интервалы на данном участке и/или на других участках магистрали. Сравнительный анализ ранее сохраненных паттернов временных рядов с описаниями аналогов с временными рядами характеристик данного события и факторов влияния для расчета и подтверждения средней статистической вероятности корреляций между показателями временных рядов.

8. Кластеризация паттернов временных рядов схожих событий и векторных моделей текстовых сообщений о них в пространствах признаков и факторов влияния. Определение центров кластеризации и фиксация признаков события и параметров влияния на его появление. Определение наилучших соответствий временных рядов по каждому событию по формуле скользящего среднего для прогнозирования значений факторов, указывающих риски повторения аналогичных событий.

В результате имеем ряд средних прогнозных значений факторов влияния по типам и кластерам событий. Для оценки степени влияния каждого фактора они ранжируются и определяется степень важности события. Показатель важности события с набором характеристик и значений факторов влияния, изменяющихся во времени, представляется в виде спектра временных рядов (паттерна события). Комплекс паттернов событий используется для последующего сравнительного анализа (бенчмаркинга) временных рядов и представляет собой элемент обучения системы проактивного мониторинга.

Результаты представления текстовых данных о событиях в виде векторов слов

Для сокращения сложности решения задач анализа разных описаний событий, извлекаемых из множества источников, выполняется переход к представлению сообщений в виде векторов слов. Вектор слов – это численное представление группы семантически связанных слов или фраз. Метод перехода к векторной модели готовит описания событий к извлечению метаданных. Проблемой является то, что информация об одном и том же событии во множестве источников имеет разные форматы данных и неструктурированный вид. Векторное представление является компактным и унифицированным типом данных для хранения и обработки. Оно учитывает контекст и позволяет структурировать данные о событии путем представления в виде системы векторов (рис. 3).

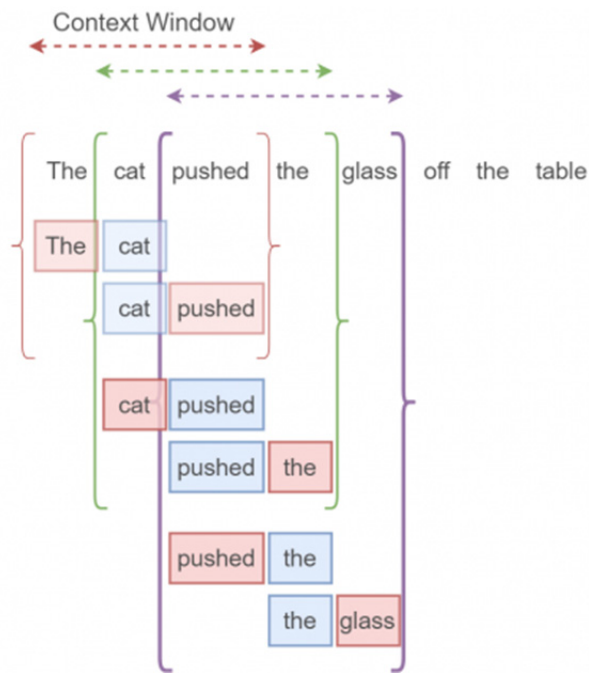


Рис. 3. Пример векторного представления фразы¹

Для представления текстовых данных в виде множеств векторов слов в системе используется алгоритм **Word2Vec**, этапы работы которого включают:

1. Синтез кортежей данных в формате [входное слово, выходное слово], где слово представлено в виде двоичного вектора длины n , где i -е значение кодируется единицей на i -й позиции и нулями – на всех остальных (код *one-hot*);
2. Синтез модели обучения, где вход и выход получает *one-hot* вектора;
3. Определение функции потерь, которая предсказывает верное слово для оптимизации модели обучения;

¹ Neurohive. Word2Vec. – URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/word2vec-vektornye-predstavlenija-slov-dlja-mashinnogo-obuchenija/>

4. Определение качественных характеристик модели после согласования векторных представлений похожих слов, т.е. определение, насколько точно, адекватно и качественно работает модель.

В ряде случаев для синтеза векторных представлений необходимо выполнить оптимизацию алгоритма *Word2Vec*. В аналогичных задачах часто в качестве критерия оптимизации алгоритма выбирается логистическая функция кросс-энтропийных потерь (*softmax cross entropy loss*). Однако использование функции для оптимизации алгоритма *Word2Vec* не является практичным, так она хорошо подходит в основном для решения бинарных задач с двумя результатами [25]. В текстовых сообщениях число слов в фразах может измеряться сотнями, поэтому для вычисления логистической функции *softmax* требуется рассчитать потери в кросс-энтропии по всем выходам. Поэтому будем использовать семплированную логистическую функцию потерь в качестве альтернативы (*sampled softmax loss*). Для ее расчета сначала вычисляется функция перекрестной энтропии между истинным значением контекста для целевого слова и значением предсказанного слова, соответствующего истинному значению контекста. Затем добавляется кросс-энтропийная потеря k отрицательных семплов (целевое слово + слово вне контекста), которые отбираются в соответствии с распределением шума. Далее определяем функцию потерь L следующим образом:

$$L = \text{SigCrEnt}(\text{Prediction}, \text{Correct Word}) + \sum_{i=1}^K E_{\text{noise}} \text{SigCrEnt}(\text{Prediction}, \text{Noise}),$$

где *SigCrEnt* – это ошибка, которую можно определить только на одном выходе. Решение задачи возможно тогда, когда словарь описания событий становится большим, как в нашем случае. Пример разбора модели представлен на рис. 4.

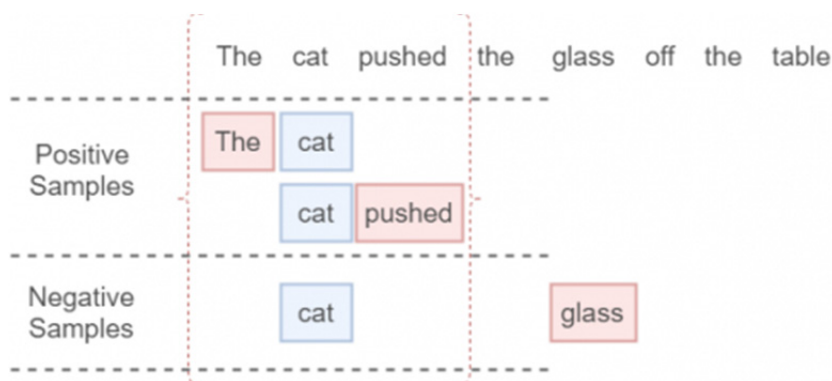


Рис. 4. Пример разбора фразы алгоритмом *Word2Vec*¹

Заключение

Целью статьи является описание процесса проактивного мониторинга на основе сбора и подготовки больших данных о событиях с различных информа-

¹ Neurohive. Word2Vec. – URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/word2vec-vektornye-predstavleniya-slov-dlja-mashinnogo-obuchenija/>

ционных источников для последующего описания их динамики в виде векторного представления слов и спектров временных рядов и прогностического моделирования рисков их возникновения и развития в зависимости от разных факторов влияния. Основными задачами проактивного мониторинга являются:

- оценка и прогнозирование рисков возникновения и развития нештатных и аварийных событий с учетом влияния внешних факторов;
- контроль участков дорог и транспортных средств;
- отслеживание изменений факторов влияния на негативные события посредством анализа и прогностического моделирования временных рядов;
- локализация мест аварий и прочих деструктивных событий и т.д.

Платформа для сбора и анализа данных использует различные инструменты, например такие, как Apache HBase, Apache Hadoop, Apache Storm, Apache Spark, библиотеки алгоритмов интеллектуального анализа и машинного обучения MLlib (Apache Spark) и Mahout (Apache Hadoop). Библиотеки MLlib и Mahout включают программные реализации алгоритмов интеллектуального анализа и прогностического моделирования с поддержкой технологии MapReduce. Интеллектуализация распределенной системы проактивного мониторинга дорожно-транспортной инфраструктуры на основе сбора и обработки больших данных о происходящих событиях необходима для повышения безопасности дорожного движения. В процессе анализа негативных событий и сравнения паттернов временных рядов происходит выявление схожих участков дорожно-транспортной инфраструктуры по количеству и виду дорожных происшествий. Кластеризация позволяет выделить критические и аварийные участки и представить их на картографической основе с цветовой дифференциацией опасных зон. В процессе анализа временных рядов с моментами инцидентов также определяются временные интервалы, в которые происходит аномальное отклонение количества происшествий от средних показателей. В результате сопоставления временных рядов выявляются факторы, которые с высокой вероятностью становятся определяющими для аномального изменения дорожно-транспортных ситуаций на контролируемых участках. Конечной целью является выявление критических пространственно-временных зон и факторов, которые вызывают возникновение и реализацию рисков дорожных инцидентов.

Результаты работы получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках грантов № 18-010-00204-а, 18-07-00975-а, 19-013-00409-а. Результаты исследований, представленные в разделе 2, получены за счет средств Российского научного фонда (проект № 20-71-10087).

Библиографический список

1. Lawrence, M. What Is Proactive Monitoring? Small Business – Chron.com. – URL: <http://smallbusiness.chron.com/proactive-monitoring-73438.html> (дата обращения: 21.01.2020).
2. Proactive Management of Complex Objects Using Precedent Methodology / A. Bakhmut, A. Krylov, M. Krylova, M. Okhtilev, P. Okhtilev, B. Sokolov // Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems / ed. by R. Silhavy. – 2019. – Vol 764.
3. Lee, E. A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models / E. A. Lee // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – P. 4837–4869.

4. Design, Modelling, Simulation and Integration of Cyber Physical Systems: Methods and Applications / P. Hehenberger, B. Vogel-Heuser, D. Bradley, B. Eynard, T. Tomiyama, S. Achiche // *Computers in Industry*. – 2016. – Vol. 82. – P. 273–289.
5. Hersent, O. The Internet of Things: Key Applications and Protocols / O. Hersent, D. Boswarthick, O. Elloumi. – Willey, 2012. – 370 p.
6. Monnin, M. Proactive Fleet Health Monitoring and Management / M. Monnin, J. Leger, D. Morel // *Engineering Asset Management* / ed. by J. Lee, J. Ni, J. Sarangapani, J. Mathew. – Lecture Notes in Mechanical Engineering. – London : Springer, 2011. – URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4993-4_28 (дата обращения: 21.01.2020)
7. Proactive behavior-based system for controlling safety risks in urban highway construction megaprojects / Li. Yongkui et al. // *Automation in Construction*. – 2018. – Vol. 95. – P. 118–128.
8. Ouzounis, G. Smart cities of the future / G. Ouzounis, Y. Portugali // *The European Physical Journal Special Topics*. – 2012. – Vol. 214 (1). – P. 481–518.
9. Multiagent Intelligent System of Convergent Sensor Data Processing for the Smart&Safe Road / A. Finogeev, A. Bershadsky, A. Finogeev, L. Fionova, M. Deev // *Intelligent System* / ed. by W. Chatchawal. – 2018. – Ch. 5. – P. 102–121.
10. Persia, L. Management of Road Infrastructure Safety / L. Persia, D. Usami et al. // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – Vol. 14. – P. 3436–3445.
11. Department for Transport, Reported road accidents and casualties, Great Britain 2011, Table RAS 30070. – URL: <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/ras30-reported-casualties-in-road-accidents>, last accessed 2020/01/21
12. Manikonda, P. Intelligent traffic management system / P. Manikonda, A. Yerrapragada, S. Annasamudram. – P. 119–122. – URL: <https://10.1109/STUDENT.2011.6089337> (last accessed: 2020/01/21)
13. Industry Article: Proactive Event Processing in Action: A Case Study on the Proactive Management of Transport Processes / Z. Feldman et al. // *Proceedings of the Seventh ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems*. – Arlington, Texas, USA, 2013. – P. 97–106.
14. eWeek / Preimesberger, Chris Hadoop, Yahoo, 'Big Data' Brighten BI Future. – URL: <https://www.eweek.com/storage/hadoop-yahoo-big-data-brighten-bi-future> (дата обращения: 02.01.2020).
15. Маликова, С. Big Data: тенденции развития, опасности и перспективы / С. Маликова // *Экономика и жизнь*. – 2018. – № 17–18 (9733). – URL: <https://www.eg-online.ru/article/372363/> (дата обращения: 24.12.2019).
16. Gantz, J. The digital universe in 2020: Big Data, Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East – United States / J. Gantz, D. Rainsel // IDC Country brief, 2013.
17. Иванов, П. Д. Технологии Big Data и их применение на современном промышленном предприятии / П. Д. Иванов, В. Ж. Вампилов // *Наука и инновации*. – 2014. – Вып. 8. – URL: <http://engjournal.ru/articles/1228/1228.pdf> (дата обращения: 03.01.2020).
18. Big Data: Принципы работы с большими данными. – URL: <https://habr.com/ru/company/dca/blog/267361/> (дата обращения: 05.01.2020).
19. Атаманов, Ю. С. Введение в Big Data / Ю. С. Атаманов, В. С. Гончарук, С. Н. Гордеев // *Молодой ученый*. – 2017. – № 11. – С. 33–34. – URL: <https://moluch.ru/archive/145/40562/> (дата обращения: 12.01.2020).
20. Кендэл, М. Временные ряды / М. Кендэл. – Москва : Финансы и статистика, 2015. – 200 с.
21. Бриллинджер, Д. Временные ряды. Обработка данных и теория / Д. Бриллинджер. – Москва, 2017. – 653 с.
22. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / В. Н. Афанасьев, М. М. Юзбашев. – Москва : Финансы и статистика : Инфра-М, 2015. – 320 с.

23. Колесников, И. Н. Прогнозирование временных рядов посредством привязки событий / И. Н. Колесников // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – № 7 (4). – С. 12–21. – DOI 10.26102/2310-6018/2019.27.4.039. – URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/Kolesnikov_4_19_1.pdf
24. Лукашин, Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю. П. Лукашин. – Москва : Финансы и статистика, 2015. – 416 с.
25. Neurohive. Word2Vec. Как работать с векторными представлениями слов. – URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/word2vec-vektornye-predstavlenija-slov-dlja-mashinnogo-obucheniya/> (дата обращения: 16.01.2020)

References

1. Lawrence M. *What Is Proactive Monitoring? Small Business* – Chron.com. Available at: <http://smallbusiness.chron.com/proactive-monitoring-73438.html> (accessed Jan. 21, 2020).
2. Bakhmut A., Krylov A., Krylova M., Okhtilev M., Okhtilev P., Sokolov B. *Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems*. 2019, vol. 764.
3. Lee E. A. *Sensors*. 2015, vol. 15, pp. 4837–4869.
4. Hehenberger P., Vogel-Heuser B., Bradley D., Eynard B., Tomiyama T., Achiche S. *Computers in Industry*. 2016, vol. 82, pp. 273–289.
5. Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. Wiley, 2012, 370 p.
6. Monnin M., Leger J., Morel D. *Engineering Asset Management*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. London: Springer, 2011. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4993-4_28 (accessed Jan. 21, 2020)
7. Yongkui Li. et al. *Automation in Construction*. 2018, vol. 95, pp. 118–128.
8. Ouzounis G., Portugali Y. *The European Physical Journal Special Topics*. 2012, vol. 214 (1), pp. 481–518.
9. Finogeev A., Bershadsky A., Finogeev A., Fionova L., Deev M. *Intelligent System*. 2018, ch. 5, pp. 102–121.
10. Persia L., Usami D. et al. *Transportation Research Procedia*. 2016, vol. 14, pp. 3436–3445.
11. *Department for Transport, Reported road accidents and casualties, Great Britain 2011, Table RAS 30070*. Available at: <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/ras30-reported-casualties-in-road-accidents>, last accessed 2020/01/21
12. Manikonda P., Yerrapragada A., Annasamudram S. *Intelligent traffic management system*. Pp. 119–122. Available at: <https://10.1109/STUDENT.2011.6089337> (last accessed 2020/01/21)
13. Feldman Z. et al. *Proceedings of the Seventh ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems*. Arlington, Texas, USA, 2013, pp. 97–106.
14. *eWeek*. Preimesberger, Chris Hadoop, Yahoo, 'Big Data' Brighten BI Future. Available at: <https://www.eweek.com/storage/hadoop-yahoo-big-data-brighten-bi-future> (accessed Jan. 02, 2020).
15. Malikova S. *Ekonomika i zhizn'* [Economy and life]. 2018, no. 17–18 (9733). Available at: <https://www.eg-online.ru/article/372363/> (accessed Dec. 24, 2019). [In Russian]
16. Gantz J., Rainsel D. *IDC Country brief*, 2013.
17. Ivanov P. D., Vampilov V. Zh. *Nauka i innovatsii* [Science and innovation]. 2014, iss. 8. Available at: <http://engjournal.ru/articles/1228/1228.pdf> (accessed Jan. 03, 2020). [In Russian]
18. *Big Data: Printsipy raboty s bol'shimi dannymi* [Big Data: Principles of working with big data]. Available at: <https://habr.com/ru/company/dca/blog/267361/> (accessed Jan. 05, 2020). [In Russian]

19. Atamanov Yu. S., Goncharuk V. S., Gordeev S. N. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2017, no. 11, pp. 33–34. Available at: <https://moluch.ru/archive/145/40562/> (accessed Jan. 12, 2020). [In Russian]
20. Kendel M. *Vremennye ryady* [Time series]. Moscow: Finansy i statistika, 2015, 200 p. [In Russian]
21. Brillindzher D. *Vremennye ryady. Obrabotka dannykh i teoriya* [Time series. Data processing and theory]. Moscow, 2017, 653 p. [In Russian]
22. Afanas'ev V. N., Yuzbashev M. M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovanie* [Time series analysis and forecasting]. Moscow: Finansy i statistika: Infra-M, 2015, 320 p. [In Russian]
23. Kolesnikov I. N. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology]. 2019, no. 7 (4), pp. 12–21. DOI 10.26102/2310-6018/2019.27.4.039. Available at: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/Kolesnikov_4_19_1.pdf [In Russian]
24. Lukashin Yu. P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov* [Adaptive methods for short-term time series forecasting]. Moscow: Finansy i statistika, 2015, 416 p. [In Russian]
25. Neurohive. Word2Vec. *Kak rabotat' s vektornymi predstavleniyami slov* [Neurohive. Word2Vec. How to work with vector representations of words]. Available at: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/word2vec-vektornye-predstavleniya-slov-dlja-mashinnogo-obuchenija/> (accessed Jan. 16, 2020) [In Russian]

Колесников Илья Николаевич

младший разработчик,
ООО «КСК ТЕХНОЛОГИИ»
(Россия, г. Пенза, ул. Суворова, 64)
E-mail: iljakolesnikoff@yandex.ru

Kolesnikov Ilya Nikolaevich

junior java developer,
LLC «KSK TECHNOLOGIES»
(64 Suvorova street, Penza, Russia)

Финогеев Алексей Германович

доктор технических наук, профессор,
кафедра систем автоматизированного
проектирования,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexeyfinogeev@gmail.com

Finogeev Alexey Germanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of computer-aided design
systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Колесников, И. Н. Проактивный мониторинг событий на основе предиктивного анализа временных рядов / И. Н. Колесников, А. Г. Финогеев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 111–125. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-9.

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Е. А. Полякова, Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина,
А. В. Бадеев, И. Е. Славкин*

INFLUENCE OF OPTICAL FIBER BENDS ON METROLOGICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF FIBER-OPTIC MEASURING TRANSDUCERS

*E. A. Polyakova, E. A. Badeeva, T. I. Murashkina,
A. V. Badeev, I. E. Slavkin*

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Основными элементами волоконно-оптических измерительных преобразователей являются оптические волокна, радиус изгиба которых существенно влияет на метрологические и эксплуатационные характеристики. Поэтому необходимо определить условия, при которых данное влияние не будет приводить к ухудшению технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей. Цель работы – улучшение технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей, определяемых механической надежностью изогнутого оптического волокна. Предметом исследования являются физические эффекты, проявляющиеся в материале оптического волокна при его неинформативных изгибах в процессе изготовления и эксплуатации волоконно-оптических измерительных преобразователей. *Методы.* Определяются максимальные значения радиусов микро- и макроизгибов оптического волокна, при которых снижается интенсивность светового потока, метрологическая и эксплуатационная надежность оптического волокна. При выполнении исследований использованы методы геометрической оптики, логарифмического дифференцирования, а также соотношения для эффекта фотоупругости при деформации оптического волокна. *Результаты и выводы.* Установлена зависимость интенсивности светового потока от изменения радиуса изгиба оптического волокна. Представлены соотношения для расчетов коэффициентов потерь, обусловленных изгибами малых и больших радиусов и вычисления граничных условий сохранения работоспособности волоконно-оптического кабеля. Определены причины и граничные условия критичности изгибов оптического волокна, при которых снижается надежность волоконно-оптического кабеля как механическая, так и метрологическая при эксплуатации в составе волоконно-оптического преобразователя. При рассмотрении процессов, происходящих в оптических волокнах в моменты их изгиба, необходимо принимать во внимание эффект фотоупругости и изменение коэффициентов преломления слоев оптического волокна. В работе определены граничные условия критичности изгибов оптического волокна, при которых снижается их механическая и метрологическая надежность. Управляя радиусом изгиба волокна, можно не только управлять интенсивностью передаваемого светового сигнала в зоне измерений волоконно-оптического преобразователя, но и добиться повышения надежности и работоспособности средства измерения.

Ключевые слова: волоконно-оптический измерительный преобразователь, оптическое волокно, интенсивность светового потока, радиус изгиба, надежность, механическая прочность, фотоупругость, коэффициент преломления.

Abstract. Subject and goals. The main elements of fiber-optic measuring converters are optical fibers, the bending radius of which significantly affects the metrological and operational characteristics. Therefore, it is necessary to determine the conditions under which this influence will not lead to a deterioration in the technical characteristics of fiber-optic measuring transducers. Purpose of work – the improvement of the technical characteristics of fiber-optic transducers, defined by the mechanical reliability of optical fiber determined from changes in the bending radius of optical fibers and reduce the mechanical reliability of optical fiber. The subject of the research is the physical effects that occur in the optical fiber material during its uninformative bends during the manufacture and operation of fiber-optic measuring transducers. **Methods.** The maximum values of the radii of micro – and macro-bends of the optical fiber are determined, which reduce the intensity of the light flux, metrological and operational reliability of the optical fiber. The research uses methods of geometric optics, logarithmic differentiation, and the ratio for the effect of photoelasticity during optical fiber deformation. **Results and conclusions.** The dependence of the intensity of the light flux on the change in the bending radius of the optical fiber is established. The relations for calculating the loss coefficients due to bends of small and large radius and calculating the boundary conditions for maintaining the operability of a fiber-optic cable are presented. The reasons for reducing the reliability of fiber-optic cable during operation as part of a fiber-optic converter are determined. When considering the processes occurring in optical fibers at the moment of their bending, it is necessary to take into account the effect of photoelasticity and changes in the refractive coefficients of optical fiber layers. The paper defines the boundary conditions for the criticality of optical fiber bends, which reduce their mechanical and metrological reliability. By controlling the bending radius of the fiber, you can not only control the intensity of the transmitted light signal in the measurement zone of the fiber-optical Converter, but also improve the reliability and performance of the measuring tool.

Keywords: fiber-optic measuring converter, optical fiber, light intensity, bending radius, reliability, mechanical strength, photoelasticity, refractive index.

Введение

Оптическое волокно (ОВ) – основной элемент волоконно-оптического кабеля (ВОК) волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОП) [1, 2]. Одним из основных критериев качества ОВ является его надежность, которая в значительной степени определяется прочностными параметрами ОВ (механическая надежность) и точностью передаваемого светового сигнала (метрологическая надежность). Радиус изгиба оптического кабеля существенно влияет на его эксплуатационные характеристики. При изгибах ОВ изменяется интенсивность светового потока, так как изменение геометрических параметров волокна меняет его физические свойства прежде всего коэффициенты преломления сердцевины и оболочки. Тем самым вызывается изменение граничных условий между сердцевиной и оболочкой, т.е. нарушается условие полного внутреннего отражения (ПВО). Изменившиеся граничные условия приводят к генерации излучательных мод, что эквивалентно модуляции оптического излучения по интенсивности [3].

В жестких условиях эксплуатации, характерных для ракетно-космической и авиационной техники, ОВ подвергаются длительному воздействию механических нагрузок, климатических, химических и радиационных факторов, что приводит к возникновению статической усталости и снижению механической прочности ОВ, в результате чего возникают потери при передаче оптического сигнала, снижается механическая и метрологическая надежность

ВОК. Известно, что в результате технологических причин изготовления ОВ, а также изгибов в процессе изготовления и эксплуатации устройств, в которых оно применяется, появляются и развиваются микротрещины на поверхности и внутри ОВ (рис. 1) [4, 5].

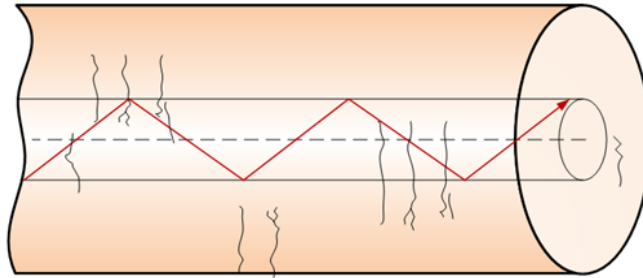


Рис. 1. Возникновение микротрещин в оптическом волокне

В результате происходит постепенное снижение прочности ОВ, что может привести не только к снижению интенсивности светового сигнала, а даже к нарушению целостности ОВ, его обрыву, вызвав отказ ВОП. Возникает необходимость определения максимальных значений радиусов микро- и макроизгибов ОВ, при которых снижаются:

- метрологическая надежность ВОП, определяемая снижением интенсивности светового потока от изменения радиуса изгиба ОВ;
- механическая надежность ВОП, определяемая надежностью ОВ.

Материал и методика

Мощность светового потока $P_{\text{вых}}$ на выходе изогнутого участка определяется выражением

$$P_{\text{вых}} = \tau_L \tau_R P_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где τ_L , τ_R – коэффициенты потерь светового потока в ОВ по длине волокна L и в зависимости от радиуса изгиба R волокна соответственно; $P_{\text{вх}}$ – мощность светового потока на входе изогнутого участка. В соответствии с [6]

$$\tau_L = e^{\chi L}; \quad (2)$$

$$\tau_R = e^{\alpha_R R} \text{ или } \tau_r = e^{\alpha_r r}, \quad (3)$$

где χ – коэффициент экстинкции материала сердцевины ОВ; α_R , α_r – коэффициенты затухания, обусловленные изгибом ОВ.

Для того, чтобы отличать коэффициенты потерь, обусловленные изгибами малых радиусов (которые в литературе называются «выпуклостями») от коэффициентов потерь, обусловленных изгибами больших радиусов R (макроизгибы), они условно обозначены α_R , α_r соответственно.

Для изгибов с большим радиусом $R \gg r_c$ [3]

$$\alpha_R = \frac{NA^2}{r_c} R; \quad (4)$$

– для изгибов с малым радиусом r , сравнимым с радиусом сердцевины ОВ r_c [3]:

$$\alpha_r = \frac{k r_{cp}^2 r_c^4 \sqrt{\left(\frac{E_{об}}{E_c}\right)^3}}{r_{об} \left(1 - \frac{n_c}{n_{об}}\right)^3}, \quad (5)$$

где k – число выпуклостей на единицу длины; r_{cp} – среднеквадратичная высота выпуклостей; $r_{об}$ – внешний радиус оболочки ОВ; n_c , $n_{об}$ – коэффициенты преломления сердцевины и оболочки ОВ соответственно; $E_{об}$, E_c – модули упругости материалов сердцевины и оболочки ОВ соответственно; NA – числовая апертура ОВ [6].

Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления, которые более предпочтительны в ВОП [7]:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_{об}^2}. \quad (6)$$

С учетом выражений (2) и (3) выражение (1) для указанных двух случаев переписывается в виде

$$P_{вых} = e^{\chi L} e^{\alpha_r R} P_{вх}; \quad (7)$$

$$P_{вых} = e^{\chi L} e^{\alpha_r r} P_{вх}. \quad (8)$$

Для повышения надежности разрабатываемых волоконно-оптических датчиков различных физических величин целесообразно использовать ВОП с открытым оптическим каналом, который в них является основным элементом [8]. Поэтому считаем, что микроизгибы в них отсутствуют и дальнейшие выкладки излагаем с позиции возможных изгибов большого радиуса R .

Обсуждение и результаты

Используя метод логарифмического дифференцирования, определим изменение ΔP мощности светового потока, вызванное большим изменением радиуса изгиба ОВ на значение ΔR , учитывая при этом, что при изгибе ОВ происходит его удлинение на значение ΔL и изменяется числовая апертура NA в соответствии с уравнением (6) на значение

$$\Delta NA = \sqrt{\Delta n_c^2 - \Delta n_{об}^2}. \quad (9)$$

Имеем

$$P_{вых} = e^{\chi L - \frac{NA^2}{r_c} R} P_{вх}; \quad (10)$$

$$\ln P_{вых} = \chi L - \frac{NA^2}{r_c} R + \ln P_{вх}; \quad (11)$$

$$\frac{dP_{вых}}{dP_{вх}} = \chi \Delta L - 2 \frac{R}{r_c} \Delta NA - \frac{NA^2}{r_c} \Delta R + \frac{dP_{вх}}{P_{вх}}. \quad (12)$$

При $dP_{\text{вх}} = 0$ окончательно имеем

$$\frac{dP_{\text{вых}}}{dP_{\text{вх}}} = \chi \Delta L - 2 \frac{R}{r_c} \Delta NA - \frac{NA^2}{r_c} \Delta R. \quad (13)$$

Изгибающая внешняя сила F действует на волокно с трехслойной структурой (рис. 2).

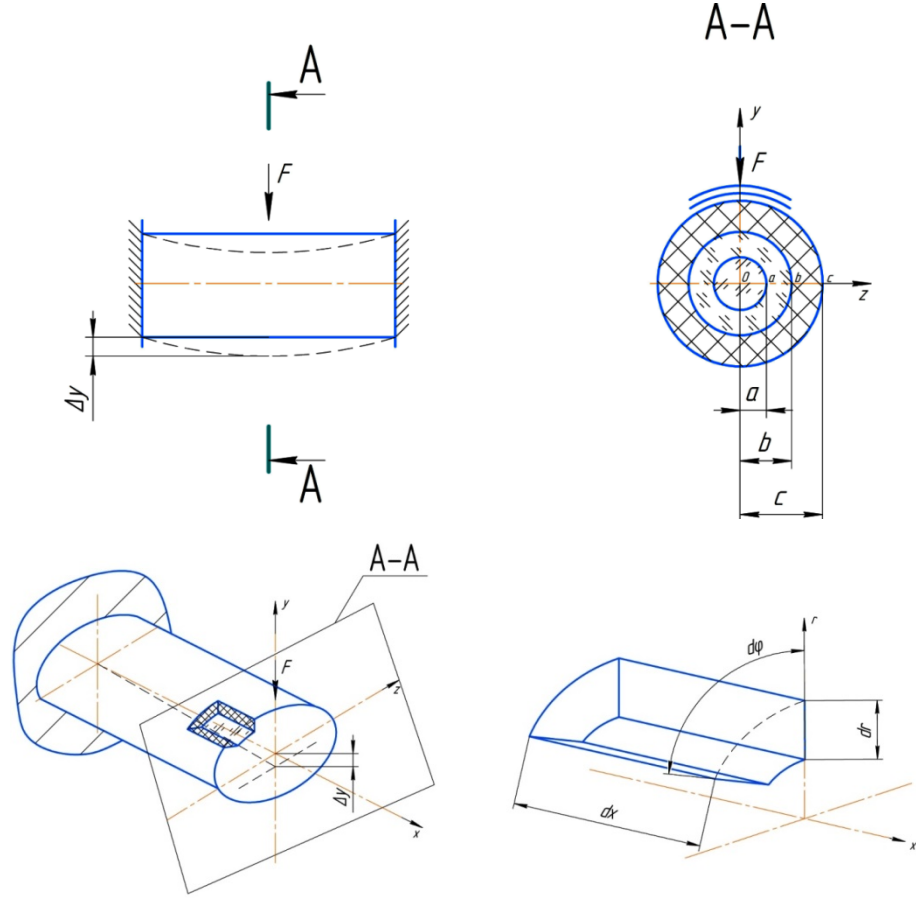


Рис. 2. Действие изгибающих внешних сил F на оптическое волокно с трехслойной структурой

При деформации ОВ проявляется эффект фотоупругости, который заключается в изменении коэффициента преломления n на значение Δn .

Изменение коэффициента преломления i -го слоя Δn_i , вносимое эффектом фотоупругости, выражается известной формулой [9]

$$\Delta n_i = -\frac{n_i^2}{2} (p_{11} \epsilon_{xi} + p_{12} \epsilon_{yi} + p_{12} \epsilon_{zi}) \quad (14)$$

или в полярной системе координат:

$$\Delta n_i = -\frac{n_i^2}{2} (p_{11} + p_{12}) \epsilon_{ri} + p_{12} \epsilon_{zi}, \quad (15)$$

где p_{11}, p_{12} – коэффициенты фотоупругости или коэффициенты Поккельса материала, подвергаемого деформации; $\varepsilon_{xi}, \varepsilon_{yi}, \varepsilon_{ri}$ – относительные деформации в поперечном сечении i -го слоя; ε_{zi} – относительная деформация i -го слоя вдоль оси волокна.

В соответствии с обобщенным законом Гука для пространственно напряженного состояния ОВ относительные деформации в поперечном сечении $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и вдоль оси Z ε_z составят

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)],\end{aligned}\tag{16}$$

где E – модуль упругости; $\mu = \varepsilon'/\varepsilon$ – коэффициент Пуассона.

Значения механических напряжений $\sigma_r, \sigma_\phi, \sigma_z$, выраженные в полярной системе координат, связываются со значениями деформаций ОВ $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi, \varepsilon_z$ следующими соотношениями [4]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{ri} \\ \sigma_{\phi i} \\ \sigma_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_i + 2\nu_i & \nu_i & \Lambda_i \\ \Lambda_i & \Lambda_i + 2\nu_i & \Lambda_i \\ \nu_i & \nu_i & \Lambda_i + 2\nu_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{ri} \\ \varepsilon_{\phi i} \\ \varepsilon_{zi} \end{bmatrix},\tag{17}$$

где i – индекс слоя ($i = 1$ – для сердцевины, $i = 2$ – для оболочки, $i = 3$ – для внешнего покрытия); Λ_i, ν_i – постоянные Ламе, связанные с модулем упругости E_i и коэффициентами Пуассона μ_i следующими выражениями [10]:

$$\begin{cases} \Lambda_i = \frac{\mu_i E_i}{(1 + \mu_i)(1 - 2\mu_i)}; \\ \nu_i = \frac{E_i}{2(1 + \mu_i)}. \end{cases}\tag{18}$$

Известно распределение напряжений внутри соосных цилиндров, каковыми являются слои оптического волокна [6]:

$$\begin{cases} \sigma_{ri} = A_i + \frac{B_i}{r_i^2}; \\ \sigma_{\phi i} = A_i - \frac{B_i}{r_i^2}; \\ \sigma_{zi} = C_i, \end{cases}\tag{19}$$

где A_i, B_i, C_i – константы, значения которых должны быть определены; r_i – радиус поперечного сечения i -го слоя.

Напряжение внутри сердцевины ОВ конечно и поэтому определяется при $B_i = 0$. Кроме того, для ОВ, имеющего три слоя, постоянные A, B, C определяются из следующих граничных условий:

$$\begin{cases}
\sigma_{ri} \Big|_{i=1, r=a} = \sigma_{ri} \Big|_{i=2, r=a}; \\
u_i \Big|_{i=1, r=a} = u_{ri} \Big|_{i=2, r=a}; \\
\sigma_{ri} \Big|_{i=2, r=b} = \sigma_{ri} \Big|_{i=3, r=b}; \\
u_{ri} \Big|_{i=2, r=b} = u_{ri} \Big|_{i=3, r=b}; \\
\sigma_{ri} \Big|_{i=3, r=c} = -F; \\
\int_0^a \int_0^{2\pi} \sigma_{zi} \Big|_{i=1} r dr d\phi + \int_a^b \int_0^{2\pi} \sigma_{zi} \Big|_{i=2} r dr d\phi + \int_b^c \int_0^{2\pi} \sigma_{zi} \Big|_{i=3} r dr d\phi = 0; \\
u_{zi} \Big|_{i=1} = u_{zi} \Big|_{i=2} = u_{zi} \Big|_{i=3},
\end{cases} \quad (20)$$

где $u_{ri} = \int \epsilon_{ri} dr$ – радиальное смещение i -го слоя.

Первые два уравнения в системе (20) означают, что радиальные напряжения и смещения на границе непрерывны. Пятое уравнение показывает, что сила F равномерно действует на ОВ. Шестое уравнение означает, что оба конца свободны. Седьмое уравнение показывает, что деформация на концах не учитывается, так как по сравнению с деформацией поверхности пренебрежимо мала (тело вытянуто вдоль оси X и его размеры по оси X гораздо больше поперечных размеров).

Результаты вычислений по формулам системы (20) подставляются в формулы системы (19). Значения σ_{ri} , $\sigma_{\phi i}$, σ_{zi} подставляются в формулу (17) для нахождения ϵ_i в зависимости от внешней силы F (давления P , температуры T и проч.). Полученные результаты необходимо подставить в выражения (14) или (15) для определения изменения значений показателей преломления материала сердцевины и оболочки. Полученные значения подставляются в выражение (9). С учетом результатов вычисления по формуле (9) находим ΔR из формулы (13). ΔL пренебрегаем в силу того, что это изменение ничтожно мало.

Известно, что, если осуществляется дифференциальное преобразование оптических сигналов непосредственно в зоне восприятия измерительной информации ВОП [2], то изменение интенсивности оптического сигнала до 20 % от номинального значения, обусловленного неинформативными изгибами оптических волокон, не приведет к возникновению дополнительной погрешности, обусловленной микро- и макроизгибами. Поэтому данное ограничение используем для определения критических изгибов оптического волокна в выражении (13).

В качестве примера проведен расчет максимально возможного изгиба ОВ в волоконно-оптическом датчике (ВОД) давления аттенюаторного типа [4], при котором мощность светового потока в двух измерительных каналах меняется не более чем на 20 %. В датчике использовалось «кварц-кварцевое» ОВ ZLWF200/240НТ//360/newН со следующими параметрами: $NA = 0,22$, $r_c = 100$ мкм, $r_{об} = 120$ мкм, $r_{ов} = 180$ мкм, $E = 0,56 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,25$. В результате расчета определено максимальное значение радиуса изгиба, при котором снижается метрологическая надежность оптического волокна $R_{\min} = 5,3$ мм.

Проверочный расчет максимального значения радиуса изгиба осуществляется исходя из условия сохранения механической прочности ОВ, ко-

торое имеет вид: $R_{\min} \geq (10...20)r_c$ [7]. Для нашего случая $R_{\min}$ должен быть более 2 мм, т.е. данное ограничение выполняется.

Окончательно при разработке ВОП принимаем минимальное значение радиуса изгиба равным 5,3 мм.

Заключение

Проведенные исследования показали, что эффект фотоупругости и изменение коэффициентов преломления слоев ОВ необходимо учитывать при рассмотрении процессов, происходящих в ОВ в момент его изгиба. Доказано, что, управляя радиусом изгиба ОВ, можно управлять интенсивностью передаваемого светового сигнала в ОВ в зоне измерений, определив условия, наилучшим образом отвечающие конкретному случаю применения ВОД, а также установить радиус изгиба, не приводящий к снижению его надежности и работоспособности. Для исключения механических информативных и неинформативных изгибов ОВ и с целью повышения надежности целесообразно использовать ВОП с открытым оптическим каналом [8].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20045.

Библиографический список

1. Бадеева, Е. А. Разработка теории распределения светового потока в оптической системе волоконно-оптических преобразователей физических величин отражательного типа : монография / Е. А. Бадеева, Н. П. Кривулин, Т. И. Мурашкина [и др.] ; под общ. ред. профессора Т. И. Мурашкиной. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2008. – 102 с.
2. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева. – Санкт-Петербург : Политехника, 2018. – Ч. I. – 187 с.
3. Волоконно-оптические датчики. Производственное издание / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ ; под ред. Т. Окоси : пер. с японского Г. Н. Горбунова. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 252 с.
4. Мурашкина, Т. И. Волоконно-оптические датчики давления аттенуаторного типа для ракетной техники : монография / Т. И. Мурашкина, А. Г. Пивкин. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2005. – 150 с.
5. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом : монография / Е. А. Бадеева, А. В. Гориш, Т. И. Мурашкина [и др.] ; под общ. ред. Т. И. Мурашкиной и А. В. Гориша. – Москва : МГУЛ, 2004. – 246 с.
6. Мурашкина, Т. И. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических измерительных приборов и систем : учеб. пособие / Т. И. Мурашкина. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 1999. – 133 с.
7. Бадеева, Е. А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники : дис. ... д-ра техн. наук / Бадеева Е. А. – Пенза, 2017. – 463 с.
8. Бадеева, Е. А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 102–113.

9. Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – Москва : Физматлит, 2005. – Т. I. Механика. – 560 с.
10. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва : Наука, 1966. – 635 с.

References

1. Badeeva E. A., Krivulin N. P., Murashkina T. I. et al. *Razrabotka teorii raspredeleniya svetovogo potoka v opticheskoy sisteme volokonno-opticheskikh preobrazovateley fizicheskikh velichin otrazhatel'nogo tipa: monografiya* [Development of the theory of light flux distribution in the optical system of fiber-optical converters of physical quantities of reflective type: monograph]. Penza: IITsPGU, 2008, 102 p. [In Russian]
2. Murashkina T. I., Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nano-tehnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Fiber-optic devices and systems: Scientific developments of the STC "Nano-technologies of fiber-optical systems" of the Penza state University]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2018, part I, 187 p. [In Russian]
3. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kyuma K., Khatate K. *Volokonno-opticheskie datchiki. Proizvodstvennoe izdanie* [Fiber-optic sensors. Production edition]: transl. from Japan. by G. N. Gorbunov. Leningrad: Enegroatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1990, 252 p. [In Russian]
4. Murashkina T. I., Pivkin A. G. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya atnyuatorsnogo tipa dlya raketnoy tekhniki: monografiya* [Fiber-optic attenuator-type pressure sensors for rocket technology: monograph]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2005, 150 p. [In Russian]
5. Badeeva E. A., Gorish A. V., Murashkina T. I. et al. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya amplitudnykh volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkrytym opticheskim kanalom: monografiya* [The theoretical basis for the design of amplitude fiber-optic pressure sensors with an open optical channel : a monograph]. Moscow: MGUL, 2004, 246 p. [In Russian]
6. Murashkina T. I. *Teoriya, raschet i proektirovanie volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh priborov i sistem: ucheb. posobie* [Theory, calculation and design of fiber-optic measuring devices and systems: textbook. stipend]. Penza: Izd-vo PenzGU, 1999, 133 p. [In Russian]
7. Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya informatsionno-izmeritel'nykh sistem raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki: dis. d-ra tekhn. nauk* [Fiber-optical pressure sensors for information and measurement systems of rocket, space and aviation equipment: dis. ... dr. techn. sciences]. Penza, 2017, 463 p. [In Russian]
8. Badeeva E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskies nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2016, no. 4, pp. 102–113. [In Russian]
9. Sivukhin D. V. *Obshchiy kurs fiziki* [The course of General physics]. Moscow: Fizmatlit, 2005, vol. I, 560 p. [In Russian]
10. Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kriger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow: Nauka, 1966, 635 p. [In Russian]

Полякова Екатерина Алексеевна
 начальник отдела надежности,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: yek.polyakova2016@yandex.ru

Polyakova Ekaterina Alekseevna
 head of department of reliability,
 Research Institute of physical
 measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Бадеева Елена Александровна
доктор технических наук, профессор,
кафедра бухгалтерского учета,
налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Мурашкина Татьяна Ивановна
доктор технических наук, профессор,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timurashkina@mail.ru

Бадеев Александр Валентинович
кандидат технических наук,
старший специалист,
Центр информационно-аналитического
обеспечения систем социально-
гигиенического мониторинга г. Пензы
(Россия, г. Пенза, ул. Куйбышева, 30)
E-mail: badeyev@mail.ru

Славкин Илья Евгеньевич
аспирант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ilya-slavkin@yandex.ru

Badeeva Elena Aleksandrovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of accounting,
taxation and auditing,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Murashkina Tatyana Ivanovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Badeev Alexander Valentinovich
candidate of technical sciences,
senior specialist,
Center for information and analytical
support of social and hygienic monitoring
systems in Penza
(30 Kuybysheva street, Penza, Russia)

Slavkin Ilya Evgenevich
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Улучшение технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей / Е. А. Полякова, Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина, А. В. Бадеев, И. Е. Славкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 126–135. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-10.