

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

4(77) 2022

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

КУЛЬГЕЙКО М. П., ЛЕПШИЙ А. П., КУЛЬГЕЙКО Г. С. Влияние магнитных свойств элементов технологической системы на эффективность магнитно-абразивной обработки плоскостей	5
КУЦЕПОЛЕНКО А. В., ПОДЫМАКО М. Э., СОБОЛЕВ М. В., СИНИЦЫН Г. С., ДАЛИМАЕВ В. А. Разработка пружинного натяжного устройства каната ограничителя скорости для лифтов с уменьшенным приямком шахты	14
ЛОВШЕНКО Ф. Г., ФЕДОСЕНКО А. С., ОЛЕНЦЕВИЧ А. С. Влияние способа формирования трехмерного объекта послойным синтезом на структуру материала изделия и пути ее улучшения	25
ПАНОВ А. Н., МРОЧЕК Ж. А., ПАШКЕВИЧ В. М. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков.....	35
ШЕЛЕГ В. К., ДОВГАЛЕВ А. М., СУХОЦКИЙ С. А. Оптимизация параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания	48

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

КОВАЛЬ А. С. К вопросу расчета циклового КПД синхронного двигателя с постоянными магнитами частотно-регулируемого привода лифта	57
--	----

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ГЕРАСИМЕНКО Н. В. Исследование водопоглощения и динамики увлажнения пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей.....	66
--	----

ГУНДИНА М. А. Выявление аномальных кластеров выборки в компьютерной системе Wolfram Mathematica	75
--	----

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЭКОЛОГИЯ

ШТЕПА В. Н., ТЫНОВЕЦ С. В., ШИКУНЕЦ А. Б. Усовершенствованная схема обработки водных растворов пищевых предприятий с использованием технологий AOPs.....	84
---	----

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЛОБАНОВА, Т. М. ПУЗАНОВА Т. В. Тенденции и проблемы развития грузоперевозок в регионе.....	92
---	----

РОМАНЬКОВА Т. В. Методические подходы к мониторингу грузовых перевозок в региональной транспортной системе.....	102
--	-----

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
- Публикуемые материалы рецензируются
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

- KULGEYKO M. P., LEPSHIY A. P., KULGEYKO G. S.**
Effect of magnetic properties of technological system elements on the efficiency of magnetic abrasive machining of planes..... 5
- KUTSEPOLENKO A. V., PODYMAKO M. E., SOBOLEV M. V., SINITSYN H. S., DALIMAEV V. A.** Development of a spring tensioning device of the speed limiter rope for elevators with a reduced shaft pit 14
- LOVSHENKO, A. S. FEDOSENKO, A. S. OLIENTSEVICH**
Effect of the technique for forming a three-dimensional object by layer-by-layer synthesis on the structure of product material and techniques to improve it..... 25
- PANOV A. N., MROCHEK Z. A., PASHKEVICH V. M.** Fractals and attractors of technical regulation and standardization of equipment and activity processes of organizations. Effective planetary development of mechanical engineering in the risk paradigm 35
- SHELEG V. K., DOVGALEV A. M., SUKHOTSKY S. A.** Optimization of parameters for the process of combined magnetodynamic rolling 48

ELECTRICAL ENGINEERING

- KOVAL A. S.** On calculating cycle efficiency of a permanent magnet synchronous motor of the elevator variable frequency drive 57

INSTRUMENT MAKING

- GERASIMENKO N. V.** Research on water absorption and moisture dynamics in polyurethane foam insulation of heat networks pipelines..... 66
- HUNDZINA M. A.** Identification of anomalous clusters of samples in the Wolfram Mathematica computer system..... 75

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. ECOLOGY

- SHTEPA V. N., TYNOVETS S. V., SHYKUNETS A. B.** Improved scheme for processing aqueous solutions at food enterprises using AOPs technologies..... 84

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

LOBANOVA T. M., PUZANOVA T. V. Trends and problems in the development of cargo transportation in the region	92
ROMANKOVA T. V. Methodological approaches to monitoring cargo transportation in the regional transport system.....	102

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_5

УДК 621.923

М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОСТЕЙ

M. P. Kulgeyko, A. P. Lepshiy, G. S. Kulgeyko

EFFECT OF MAGNETIC PROPERTIES OF TECHNOLOGICAL SYSTEM ELEMENTS ON THE EFFICIENCY OF MAGNETIC ABRASIVE MACHINING OF PLANES

Аннотация

Рассмотрены вопросы производительности магнитно-абразивной обработки плоскостей на установке с односторонним расположением магнитного индуктора. Установлена взаимосвязь удельного съема материала, факторов и параметров формирования абразивного порошкового инструмента в условиях применения элементов технологической системы – заготовок и приспособлений – с различными магнитными свойствами. Результаты исследований могут быть рекомендованы при разработке магнитных систем оборудования для обработки плоскостей инструментом, сформированным на периферии магнитного индуктора.

Ключевые слова:

магнитно-абразивная обработка, магнитная система, абразивный инструмент, параметры процесса, производительность.

Для цитирования:

Кульгейко, М. П. Влияние магнитных свойств элементов технологической системы на эффективность магнитно-абразивной обработки плоскостей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 5–13.

Abstract

The productivity of magnetic abrasive machining of planes on the installation with a unilateral location of a magnetic inductor was considered. The research established the interrelation of specific material removal, factors and parameters of abrasive powder tool formation in the conditions of using technological system elements – workpieces and fixtures – with different magnetic properties. The results of the research can be recommended for developing magnetic systems of equipment used for machining planes with a tool formed on the periphery of the magnetic inductor.

Keywords:

magnetic abrasive machining, magnetic system, abrasive tool, process parameters, productivity.

For citation:

Kulgeyko, M. P. Effect of magnetic properties of technological system elements on the efficiency of magnetic abrasive machining of planes / M. P. Kulgeyko, A. P. Lepshiy, G. S. Kulgeyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 5–13.

Введение

Обеспечение надежности и долговечности деталей машин является одной из важнейших проблем современного машиностроения. Ее решение в значительной степени лежит в области повышения функциональных свойств рабочих поверхностей деталей, о чем свидетельствуют эксплуатационный и технологический аспекты проблемы. С эксплуатационной точки зрения значимость обеспечения качества поверхности объясняется преобладающим фактором потери работоспособности деталей в результате износа и разрушения ее поверхностного слоя. Технологический аспект проблемы определяется в настоящее время целесообразностью и экономичностью повышения качества, надежности и долговечности изделий не за счет применения специальных дорогостоящих материалов, а путем создания более высоких характеристик тонкого поверхностного слоя. Таким образом, задача состоит в создании гетерогенного поверхностного материала, обладающего дифференцированными свойствами по отношению к объемно-прочностным свойствам детали [1].

Формирование физико-механических свойств поверхностного слоя деталей машин, оказывающих решающее влияние на эксплуатационные характеристики поверхности, в основном осуществляется на финишных операциях обработки деталей [2]. В результате поверхность, как особое состояние материала, образуется вследствие энергетического воздействия технологическими методами. С технологической точки зрения можно выделить четыре основных направления формирования поверхности [1]. Широкое распространение в области обеспечения заданных свойств поверхностного слоя находят комбинированные методы энергетического воздействия [3]. Определенное место в ряду таких технологий занимают магнитно-электрические методы,

в том числе отделочная магнитно-абразивная обработка (МАО) [4].

Постановка задачи

Магнитно-абразивная обработка реализует, согласно классификации [1], первое технологическое направление генерации поверхности, а именно образование поверхности путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии. Сущность МАО заключается в воздействии на обрабатываемую поверхность уплотненной в магнитном поле ферроабразивной порошковой массы, в результате которого при их относительном перемещении происходит процесс микрорезания тонких поверхностных слоев материала и сглаживание микронеровностей поверхности путем их пластического деформирования.

Метод отличается относительной простотой в осуществлении, экологической чистотой, обеспечивает высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивлению коррозии [4, 5]. Метод МАО широко применяется при отделочно-зачистной обработке поверхностей различной геометрической формы: наружных и внутренних поверхностей вращения, плоскостей, фасонных поверхностей, стандартизованных специальных профилей и др. [4, 6].

Техническое обеспечение процесса МАО предполагает наличие оборудования, содержащего следующие основные системы: механическую, магнитную и электрическую. Поэтому практическая реализация технологии осуществляется как на специально разработанных станках, так и на установках на базе серийно выпускаемого промышленностью оборудования, в основном на металлорежущих станках. В этом случае станки с некоторой доработкой оснащаются в качестве инструмента маг-

нитным индуктором или подвергаются относительно небольшой модернизации, включающей в основном дооснащение магнитной системой.

В технологии обработки плоскостей применяются различные варианты технического обеспечения, т. е. имеется ряд специально спроектированных станков, а также используются установки на базе различного серийного оборудования. Возможность реализации процесса на существующих металлорежущих станках является одним из достоинств метода MAO.

Обработка плоскостей на серийно выпускаемом оборудовании осуществляется, как правило, по схемам с односторонним расположением индуктора [6]. На таких установках можно осуществлять обработку как поверхностей тонколистовых заготовок, так и плоскостей объемных деталей. Двухстороннее размещение разноименных полюсов индуктора относительно заготовки применяется при обработке листовых материалов и требует специального оборудования.

При одностороннем расположении магнитной системы относительно обрабатываемой детали применяются в основном индукторы двух типов – с торцовой или периферийной рабочей поверхностью. По второй схеме используется индуктор, состоящий из двух oppositно расположенных полюсных наконечников, между торцовыми поверхностями которых создается магнитное поле. Режущий инструмент формируется из ферромагнитного абразивного порошка на периферии индуктора в дугообразных магнитных потоках выпучивания. При обработке индуктор вращается вокруг оси, параллельной обрабатываемой поверхности, а ферроабразивный порошок перемещается в сужающийся рабочий зазор и осуществляет абразивное воздействие на поверхность детали. Высокую эффективность обработки обеспечивает индуктор с полюсными наконечниками, образующими

наклонное межполюсное пространство [7, 8].

Магнитная система оборудования для MAO определяет параметры магнитного поля как одного из основных факторов процесса. Распределение магнитных потоков в рабочей зоне зависит от конструкции, размеров, конфигурации и магнитных свойств элементов технологической системы, в том числе от магнитных характеристик обрабатываемых деталей и приспособлений для их установки.

Целью данной работы является исследование влияния магнитных свойств элементов технологической системы на производительность процесса обработки.

Методика исследования

Установка для магнитно-абразивной обработки плоскостей создана на базе горизонтально-фрезерного станка. Магнитная система установки (рис. 1) предполагает применение одностороннего магнитного индуктора 1. Замыкание магнитного потока, создаваемого двумя электромагнитными катушками 2, осуществляется через магнитопровод 3, включающий хобот 4 станка. При этом хобот и вал с индуктором изолированы от станины станка. Обрабатываемая деталь 5 устанавливается в приспособлении 6, также изолированном от стола станка. В результате образуется полнозамкнутая [9] через рабочий зазор индуктора магнитная система. Конструкция индуктора обеспечивает формирование кольцевого абразивного инструмента на периферии цилиндрической поверхности полюсов в области дугообразных магнитных потоков выпучивания. При вращении инструмента ферроабразивный порошок перемещается в сужающийся рабочий зазор и производит абразивное воздействие на поверхность детали, осуществляя тем самым обработку поверхностного слоя путем съема обрабатываемого материала.

Особенностью применяемого индуктора является наклонное к оси вращения выполнение торцовых поверхностей полюсных наконечников. Сформированный в таком межполюсном пространстве инструмент обеспечивает увеличение ширины однопроходной обработки. Ширина же самого инструмента (абразивного кольца) регулируется за счет толщины диамагнитной прокладки, устанавливаемой в пространстве между

полюсными наконечниками. Его эффективная рабочая ширина определяется в том числе силовой характеристикой магнитного поля в рабочей зоне индуктора. Толщина абразивного слоя порошка также зависит от величины магнитного поля и распределения магнитных потоков. В зоне обработки она принимает размер рабочего зазора между периферией индуктора и обрабатываемой поверхностью.

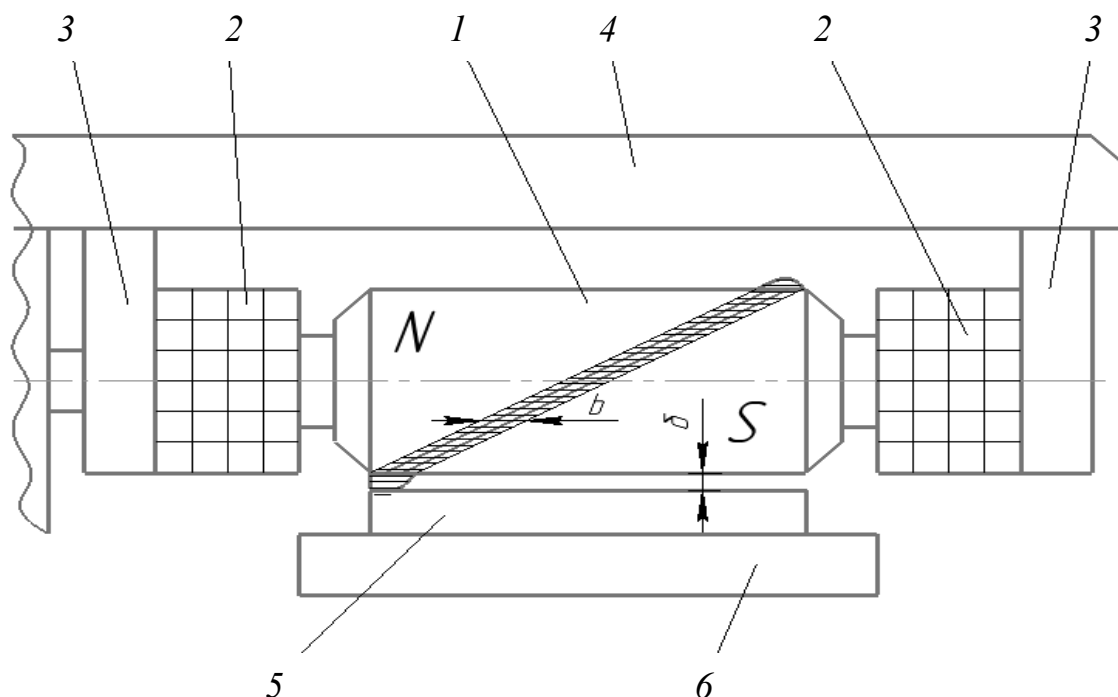


Рис. 1. Схема магнитной системы экспериментальной установки

Рассматриваемая схема МАО характеризуется кинематическим воздействием ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность [4]. Взаимодействие порошка с поверхностью изделия осуществляется как относительно продолжительное скольжение с переменным давлением, максимальная величина которого достигает в минимальном зазоре диаметральной плоскости индуктора перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Давление порошка на обрабатываемую поверхность

осуществляется за счет сил механического заклинивания и сил магнитного поля.

Важным параметром, определяющим силовую характеристику процесса и эффективность МАО, является магнитная индукция в рабочих зазорах (рабочей зоне). Общий магнитный поток, создаваемый электромагнитным индуктором (см. рис. 1), можно условно разделить на три составляющие: основной магнитный поток, пронизывающий межполюсное пространство практиче-

ски перпендикулярно торцовым поверхностям полюсов, т. е. замыкающийся по кратчайшему направлению или по пути наименьшего магнитного сопротивления; магнитный поток выпучивания, отображающийся дугообразными силовыми линиями на периферии индуктора между полюсными наконечниками и формирующий порошковый инструмент; потоки рассеивания внутри полюсных наконечников и в свободном пространстве вне сформированного инструмента. Учитывая, что формирование абразивного инструмента в данной конструкции индуктора осуществляется в потоках выпучивания, следовательно, необходимо обеспечить максимальные силовые характеристики магнитного поля в периферийной области рабочего зазора. Силы, действующие на ферромагнитный порошок, обусловлены магнитными и электрическими характеристиками магнитной среды, геометрическими и кинематическими параметрами процесса, коэффициентом заполнения зазора (рабочей зоны) порошком и другими факторами, и в конкретной точке рабочей области определяются величиной поля и его неравномерностью (градиентом магнитного поля) на границах участков с различной магнитной проницаемостью [9].

Экспериментальные исследования влияния факторов процесса на производительность МАО производились для материалов с различными магнитными свойствами при обработке с применением магнитных и немагнитных приспособлений. В качестве магнитного обрабатываемого материала использовалась сталь 45 и немагнитного – сталь X18H10T с одинаковой твердостью (НВ 200). Исходная шероховатость поверхности заготовок – Ra 1,0...1,2 мкм.

Магнитно-абразивную обработку образцов производили при следующих технологических и конструктивных параметрах процесса: межполюсное расстояние $a = 6$ мм; минимальный рабо-

чий зазор между заготовкой и периферией магнитного индуктора $\delta = 4$ мм; угол наклона торцовой поверхности полюсов $\alpha = 75^\circ$; магнитная индукция потока выпучивания в рабочем зазоре $B_e = 0,4$ Тл; зернистость порошка $\Delta = 315/200$ мкм.

Значения кинематических факторов принимались следующие: скорость подачи заготовки $S = 50$ мм/мин; скорость резания (скорость вращения индуктора) как переменный фактор принята на трех уровнях: V равна 1,5; 3,0 и 4,5 м/с.

Критерием производительности процесса принята производительность обработки Δq , мг/(см²·мин), выраженная удельным массовым (весовым) съемом материала.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты предварительных исследований производительности МАО при использовании элементов технологической системы с различными магнитными свойствами, т. е. обработка деталей из различных материалов производилась при их установке в приспособления, выполненных из магнитных и немагнитных материалов. Результаты исследований свидетельствуют о более интенсивном съеме материала при закреплении заготовок на немагнитном приспособлении. Это отмечается как для магнитных, так и немагнитных обрабатываемых материалов. Значительное увеличение обрабатываемости стали X18H10T на немагнитном приспособлении объясняется не только магнитной характеристикой технологической системы, но также физико-механическими свойствами обрабатываемого материала.

Характер зависимости удельного съема материала от скорости вращения инструмента аналогичный как при магнитных, так и немагнитных материалах заготовок и приспособлений (рис. 3).

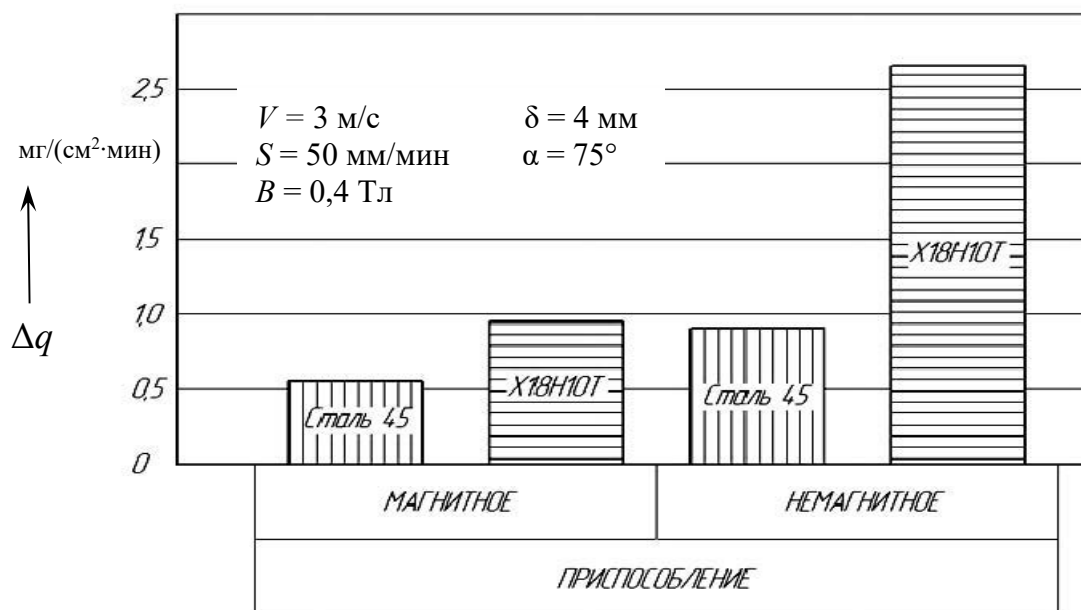


Рис. 2. Удельный съем металла в зависимости от магнитных свойств элементов технологической системы

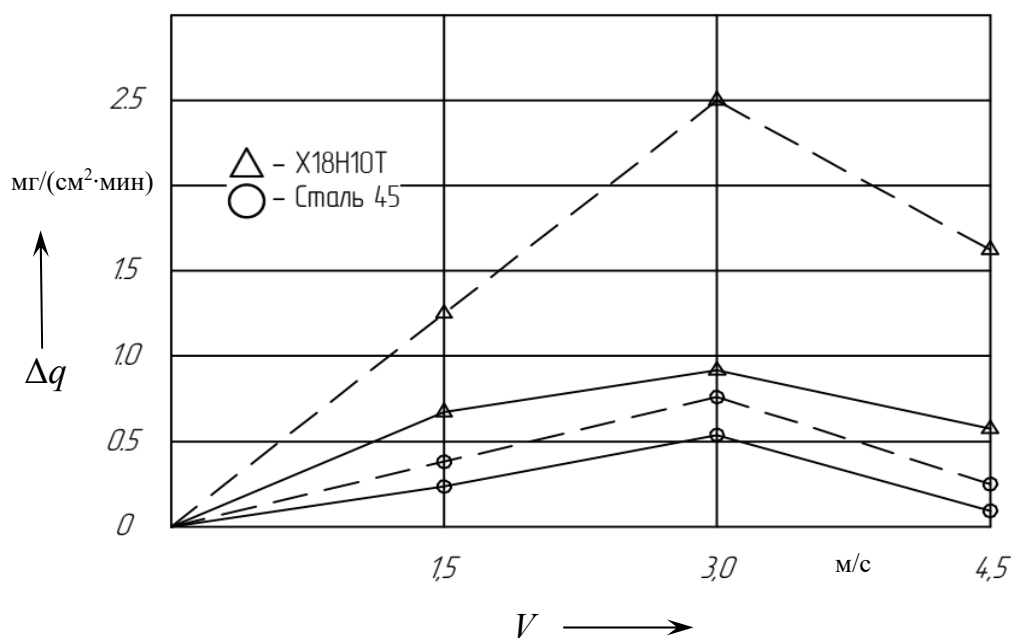


Рис. 3. Зависимость удельного съема материала от скорости вращения индуктора при различных магнитных свойствах заготовок и приспособлений: — — — — — немагнитное приспособление; — — — — — магнитное приспособление

Некоторое увеличение производительности при обработке заготовок из нержавеющей стали, закрепленных на немагнитном приспособлении, объясняется изменением условий формирования инструмента. Магнитный поток выпучивания, определяющий распределение ферроабразивного порошка в рабочей области инструмента, усиливается между полюсами индуктора за счет ослабления потоков рассеивания в пространстве вне индуктора, в том числе через немагнитные заготовку и приспособление. Вследствие этого несколько увеличивается жесткость абразивного слоя инструмента и его размеры. Известно [4–6], что жесткость инструмента и степень его силового воздействия на обрабатываемую поверхность в значительной мере определяют производительность обработки.

Нелинейный характер зависимо-

сти производительности от скорости вращения индуктора также во многом определяется условиями формирования порошкового инструмента (рис. 4). Так, представленные зависимости показывают, что при скорости до 1,5 м/с ширина абразивного слоя порошка практически не изменяется, т. к. выброс зерен порошка незначительный. При дальнейшем увеличении скорости в результате повышения интенсивности выброса порошка ширина инструмента уменьшается. Менее заметно это явление при использовании немагнитных приспособлений. Логично, что с увеличением скорости вращения инструмента увеличивается частота контактного взаимодействия отдельных зерен порошка с обрабатываемой поверхностью в единицу времени. И, как следствие, с увеличением V до 3,0 м/с удельный съем материала повышается (см. рис. 3).

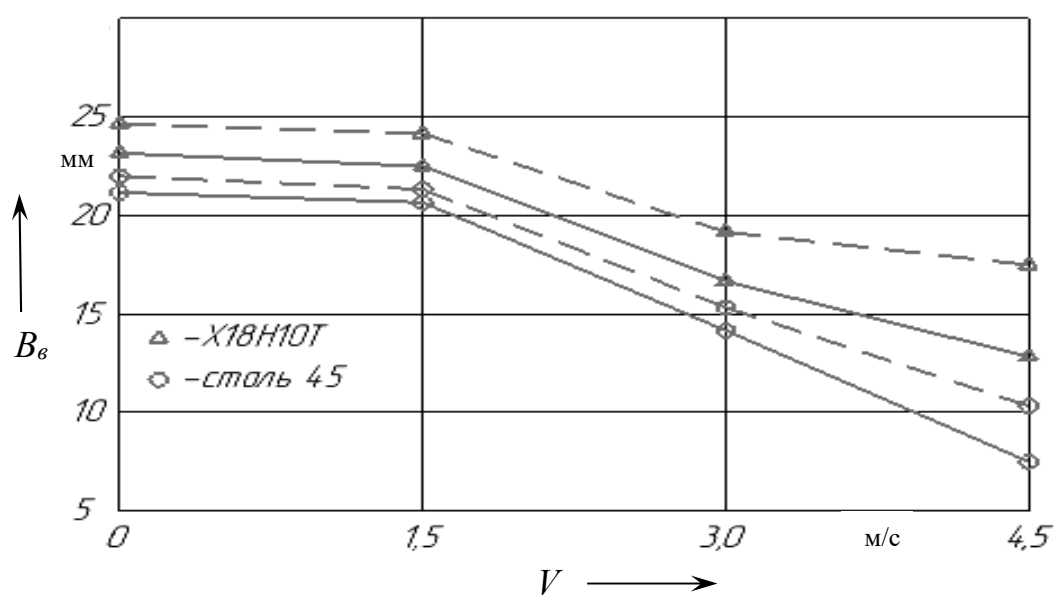


Рис. 4. Зависимость ширины абразивного слоя инструмента от скорости вращения индуктора: — магнитное приспособление; - - - немагнитное приспособление

Однако повышение скорости приводит к увеличению центробежных сил, отрывающих зерна порошка от общей массы порошкового инструмента. При этом существенно увеличивается веро-

ятность отрыва частиц порошка, расположенных дальше от торцов полюсов на периферии индуктора. С этой точки зрения в неблагоприятных условиях находятся частицы порошка по краям

ширины инструмента. В результате при достижении определенной скорости вращения (в исследуемых условиях свыше 1,5 м/с) наблюдается уменьшение ширины инструмента (см. рис. 4).

Таким образом, противоречивое действие двух факторов (увеличение скорости резания и уменьшение ширины инструмента) приводит к сложной зависимости съема материала от скорости вращения индуктора и при скорости от 3,0 до 4,5 м/с удельный съем материала уменьшается. Особенно значимо уменьшение Δq при обработке магнитных материалов, для которых наблюдается наибольший выброс порошка из рабочей зоны. То есть при V до 3,0 м/с превалирующее значение на производительность обработки имеет увеличение частоты контактного абразивного воздействия зерен порошка на обрабатываемую поверхность. При дальнейшем увеличении скорости вращения индуктора более значимо уменьшение ширины инструмента за счет выброса частиц порошка и, как следствие, наблюдается уменьшение удельного съема материала в единицу времени.

Дополнительные эксперименты позволили выявить влияние толщины заготовок из немагнитных материалов на производительность МАО. Установлено, что при их закреплении в магнитных или немагнитных приспособлениях при толщине деталей более 8 мм изменение величины съема материала практически не наблюдается.

Отсюда следует, что рассматриваемая технологическая система обеспечивает наибольшую производительность при обработке немагнитных заготовок, закрепляемых на немагнитном приспособлении, а при толщине немагнитных деталей более 8 мм, независимо от магнитных характеристик приспособления, достигается максимальный удельный съем материала. То есть в последнем случае магнитные свойства приспособлений не оказывают влияния на производительность про-

цесса обработки.

Как было отмечено выше, величина электромагнитных сил, действующих на частицы порошка, помещенные в электромагнитное поле, зависит, в том числе от плотности ферроабразивной порошковой массы. Характеристикой плотности порошкового инструмента принят коэффициент заполнения рабочей области (рабочего зазора). Давление частиц порошка за счет сил механического заклинивания зерен в узкой части рабочего зазора также в значительной степени определяется жесткостью инструмента, т. е. плотностью заполнения рабочего зазора. В связи с этим представляет интерес установление влияния плотности инструмента на производительность обработки.

Выполненные экспериментальные исследования позволили определить зависимость удельного съема материала от коэффициента заполнения рабочей зоны K_z ферроабразивным порошком. Установлено, что повышение K_z от 1,0 до 1,5...1,8 значительно влияет на съем материала, который повышается в 2–3 раза. Дальнейшее увеличение объема (порции подаваемого в рабочую зону) порошка практически не оказывает заметного влияния на производительность процесса, т. к. излишняя масса порошка выбрасывается центробежными силами из области формирования инструмента. В результате параметры инструмента достигают предельного значения, оптимального для данных условий обработки.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить влияние магнитных свойств элементов технологической системы – обрабатываемых заготовок и установочных приспособлений – на производительность процесса обработки. Изменение интенсивности удельного съема материала связано с факторами и параметрами

формирования ферроабразивного порошкового инструмента, что в значительной степени определяется магнитной системой оборудования для МАО. При практической реализации технологии магнитно-абразивной обработки

следует учитывать соотношение магнитных свойств элементов технологической системы, в том числе обрабатываемого материала, и их влияние на процесс формирования порошкового инструмента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кульгейко, М. П.** Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.
2. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 376 с.
3. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
4. **Хомич, Н. С.** Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
5. Обработка заготовок деталей машин / А. В. Миранович [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 171 с.
6. **Барон, Ю. М.** Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 176 с.
7. **Кульгейко, М. П.** Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестн. БрГТУ. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 100–103.
8. **Кульгейко, М. П.** Исследование работоспособности инструмента для магнитно-абразивной обработки плоскостей на базе обобщенной модели магнитного индуктора / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3 (68). – С. 56–64.
9. **Сакулевич, Ф. Ю.** Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.

Статья сдана в редакцию 4 ноября 2022 года

Михаил Петрович Кульгейко, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет транспорта. Тел.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Александр Парфенович Лепший, канд. техн. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-029-137-11-16. E-mail: Lepshy@gstu.by.

Галина Степановна Кульгейко, ст. преподаватель, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-791-38-69. E-mail: kulgeyko@gstu.by.

Mikhail Petrovich Kulgeyko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Transport. Tel.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Alexander Parfenovich Lepshiy, PhD (Engineering), Associate Prof., P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-029-137-11-16. E-mail: Lepshy@gstu.by.

Galina Stepanovna Kulgeyko, senior lecturer, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-044-791-38-69. E-mail: kulgeyko@gstu.by.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_14

УДК 692.66, УДК 621.86/87

А. В. Куцепенко, М. Э. Подымако, М. В. Соболев, Г. С. Сеницын, В. А. Далимаев

РАЗРАБОТКА ПРУЖИННОГО НАТЯЖНОГО УСТРОЙСТВА КАНАТА ОГРАНИЧИТЕЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ ЛИФТОВ С УМЕНЬШЕННЫМ ПРИЯМКОМ ШАХТЫ

A. V. Kutsepolenko, M. E. Podymako, M. V. Sobolev, H. S. Sinitsyn, V. A. Dalimaev

DEVELOPMENT OF A SPRING TENSIONING DEVICE OF THE SPEED LIMITER ROPE FOR ELEVATORS WITH A REDUCED SHAFT PIT

Аннотация

В статье подчеркивается актуальность уменьшения глубины приямка лифтовой шахты и акцентировано внимание на сформулированное ранее понятие минимального вертикального габарита натяжного устройства исходя из его функционального назначения. Показана зависимость вертикального габарита пружинного натяжного устройства от упругих свойств тягового элемента и от его диаметра. Предложена конструкция пружинного натяжного устройства с минимальным вертикальным габаритом и с функцией частичной компенсации упругого удлинения каната. Определена область применения предложенного натяжного устройства в зависимости от этажности здания. Предложены решения по использованию универсальных приспособлений для расширения области применимости рассматриваемого натяжного устройства.

Ключевые слова:

уменьшенный приямок лифтовой шахты, пружинное натяжное устройство каната ограничителя скорости, упругое удлинение лифтового каната, натяжение стального каната, модуль упругости стального каната, тросовый захват, талреп, устройство предотвращения свободного падения и превышения скорости.

Для цитирования:

Разработка пружинного натяжного устройства каната ограничителя скорости для лифтов с уменьшенным приямком шахты / А. В. Куцепенко, М. Э. Подымако, М. В. Соболев, Г. С. Сеницын, В. А. Далимаев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 14–24.

Abstract

The article demonstrates the relevance of reducing the depth of the elevator shaft pit and focuses on the previously formulated concept of the minimum vertical dimension of the tensioning device based on its functional purpose. The dependence of the vertical dimension of a spring tensioning device on the elastic properties of the traction element and its diameter is shown. The design of the spring tensioning device with the minimum vertical dimension and with the function of partial compensation for the elastic rope elongation is proposed. The scope of application of the tensioner proposed is determined depending on the building height. Solutions are suggested for using universal devices to expand the area of applicability of the tensioning device under consideration.

Keywords:

reduced elevator shaft pit, spring tensioning device for speed limiter rope, elastic elevator rope elongation, steel wire rope tension, steel wire rope modulus of elasticity, wire rope grip, turnbuckle, free fall and over-speed prevention device.

For citation:

Development of a spring tensioning device of the speed limiter rope for elevators with a reduced shaft pit / A. V. Kutsepolenko, M. E. Podymako, M. V. Sobolev, H. S. Sinitsyn, V. A. Dalimaev // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 14–24.

Введение

Возрастающая конкуренция в лифтовой отрасли требует от производителей лифтов анализа возможностей по повышению потребительских характеристик и улучшению интегрирования лифта в архитектурное и стилистическое решения здания. При этом, помимо многоэтажных зданий с глубиной приямка шахты 1100...2000 мм [1], лифтами все чаще оснащаются коттеджи, рестораны и другие малоэтажные застройки, для которых применяются лифты с уменьшенным приямком [2]. Для освоения производства лифтов с уменьшенным приямком необходимо эффективно использовать пространство шахты, используя новые компоновочные, а также конструктивные решения, позволяющие минимизировать размеры лифтового оборудования.

Одним из узлов, расположенных в приямке, является натяжное устройство каната ограничителя скорости, предназначенное для обеспечения натяжения каната, охватывающего шкив ограничителя скорости и соединенного с рычагом включения ловителя. Величина этого натяжения, наряду с формой канавки шкива ограничителя скорости и его материалом, должна обеспечивать возникновение такого значения силы трения между канатом и ручьем шкива ограничителя скорости при его блокировке, которое гарантирует включение ловителя [3, 4].

Проведенный коллективом научно-технического центра ОАО «Могилевлифтмаш» анализ [5] натяжных устройств позволил определить тип конструкции натяжного устройства, который целесообразно использовать в лифтах с малой глубиной приямка. Было сформулировано и записано в виде формулы [5, формула (1)] понятие минимального вертикального габарита натяжного устройства, достаточного для того, чтобы обеспечить выполнение им своего функционального назначения.

Физический смысл формулы [5, формула (1)] заключается в том, что минимальный вертикальный габарит натяжного устройства должен определяться *только* диаметром шкива устройства и его вертикальным перемещением (ходом шкива), необходимым для выбора вытяжки [5, 6] каната. Причем в формировании значения минимального вертикального габарита натяжного устройства Γ^*_{\min} значения диаметра шкива $D_{\text{шк}}(\min)$ и его хода $X_{\text{шк.полное}}$ должны учитываться не более одного раза.

Без учета толщин деталей, из которых состоит корпус натяжного устройства, а также без учета зазоров между верхней и нижней частью корпуса и шкивом в его крайних верхнем и нижнем положениях формулу [5, формула (1)] можно упростить:

$$\Gamma^*_{\min} = D_{\text{шк}}(\min) + X_{\text{шк.полное}}. \quad (1)$$

Ход шкива определяется вытяжкой каната (конструктивным удлинением), которая зависит от конструкции каната и величины усилия его натяжения.

Согласно требованиям ГОСТ 33984.1–2016 [4], отношение диаметра шкива к диаметру огибаемого каната для скоростей перемещения кабины лифта до 1,6 м/с включительно должно быть не менее 25.

Вертикальный габарит пружинного натяжного устройства можно выразить в виде функции, зависящей от диаметра и упругих свойств каната (тягово-го элемента):

$$\Gamma = f(d_k, \Delta L_k); \quad (2)$$

$$\Gamma^*_{\min} = 25d_k + \Delta L_k/2, \quad (3)$$

где d_k – диаметр каната; ΔL_k – максимально допустимая величина вытяжки каната (его остаточная деформация), при достижении которой требуется его укорачивание (рис. 1).

В техническом задании на разра-

ботку пружинного натяжного устройства в качестве прототипа было указано пружинное натяжное устройство

COMPACT TENSING PULLEY 200 фирмы Dynatech (рис. 2) [7].

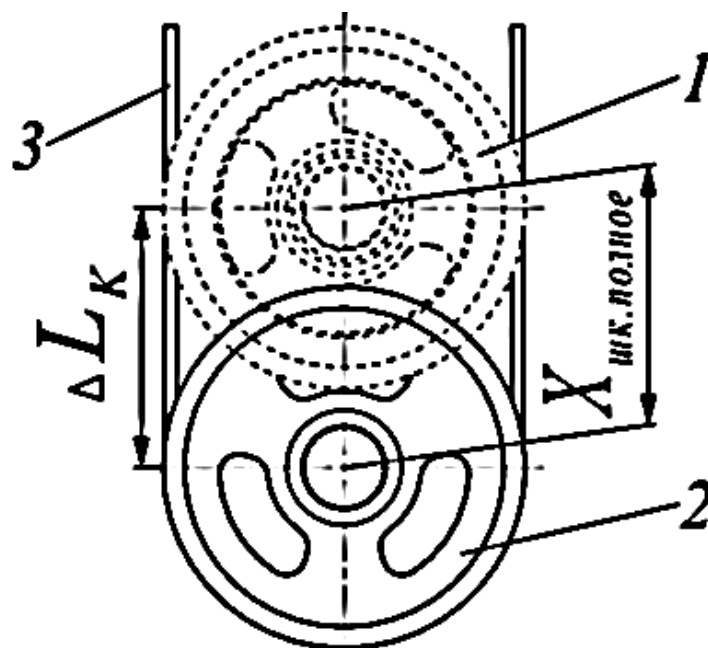


Рис. 1. Величина перемещения шкива натяжного устройства в зависимости от величины вытяжки каната ограничителя скорости: 1 – шкив в начальном положении; 2 – шкив при вытянутом канате; 3 – канат

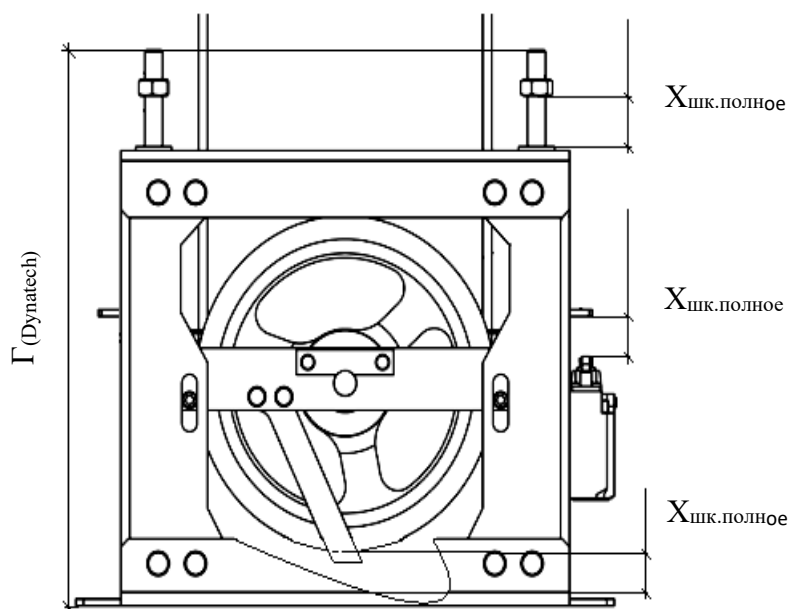


Рис. 2. Пружинное натяжное устройство COMPACT TENSING PULLEY 200 (Dynatech)

Конструкция этого натяжного устройства была проанализирована в [5, 6], где было установлено, что вер-

тикальный габарит данной конструкции формируется величиной диаметра шкива и двойным значением его перемеще-

ния вследствие вытягивания каната.

На основе анализа недостатков прототипа в ОАО «Могилевлифтмаш» была разработана и запатентована

собственная конструкция пружинного натяжного устройства (рис. 3), конструкция которого подробно описана в [6].

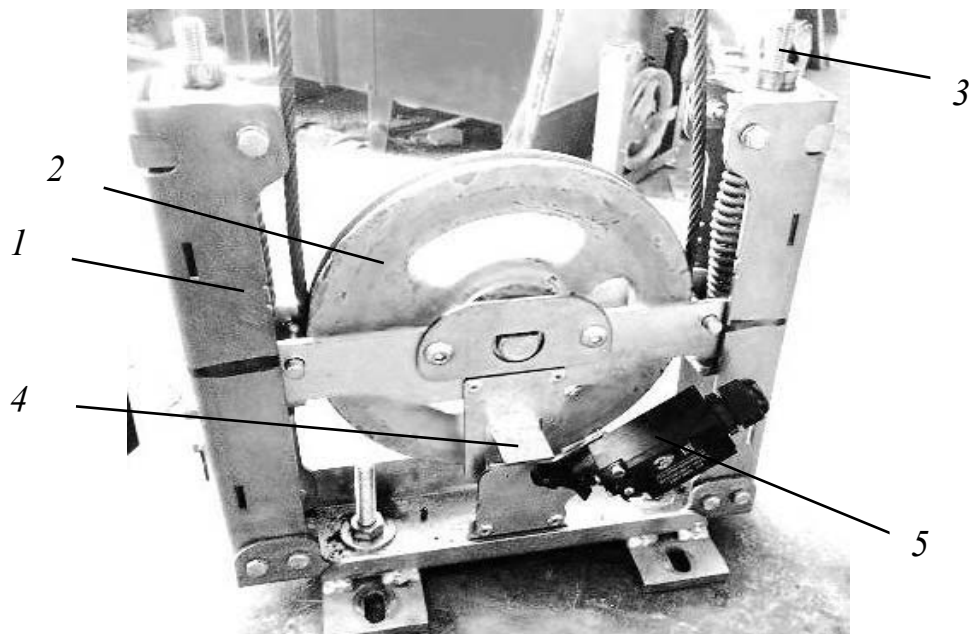


Рис. 3. Опытный образец пружинного натяжного устройства (ОАО «Могилевлифтмаш»): 1 – корпус; 2 – шкив; 3 – шпилька; 4 – лыжа; 5 – выключатель

Анализируя данную конструкцию, можно заметить, что шпильки 3 полностью расположены внутри корпуса 1. При крайнем нижнем положении шкива 2 лыжа 4 наезжает на рабочий элемент выключателя 5, что приводит к разрыву электрической цепи безопасности лифта. Эта особенность конструкции обуславливает минимальный вертикальный габарит устройства:

$$\begin{aligned} \Gamma_{(\text{ОАО «Могилевлифтмаш»})} &= D_{\text{шк}} + X_{\text{шк.полное}} + \\ &+ \Delta_1 + \Delta_2 + \sum S \approx D_{\text{шк}} + X_{\text{шк.полное}} \approx \\ &\approx \Gamma_{(\text{идеальный})}, \end{aligned} \quad (4)$$

где Δ_1 – зазор между нижним положением шкива при полностью вытянутом канате (в момент, когда требуется его

укорачивание) и нижней частью корпуса натяжного устройства; Δ_2 – зазор между верхним рабочим положением шкива (до начала вытяжки каната) и верхней частью корпуса натяжного устройства; $\sum S$ – толщина деталей, из которых состоит корпус натяжного устройства.

Исходя из назначения натяжного устройства понятно, что оно должно обеспечивать (гарантировать) величину усилия протягивания каната, достаточную для включения ловителя в случае срабатывания ограничителя скорости при любой допустимой натяжным устройством вытяжке каната ограничителя скорости (в любой момент времени). Величина усилия протягивания каната, согласно требованиям отраслевых нормативных документов [4], должна

быть не менее 300 Н или удвоенной величины усилия включения ловителя.

Усилие протягивания каната ограничителя скорости зависит от:

- 1) материала шкива ограничителя скорости;
- 2) геометрических параметров (угол) канавки;
- 3) усилия натяжения каната, создаваемого натяжным устройством.

Параметры 1-го и 2-го пунктов на предприятии унифицированы. Диапазон усилий натяжения, которые должно создавать натяжное устройство, регламентируется внутривзаводским стандартом и обосновано следующими требованиями:

- минимальное значение усилия натяжения должно гарантировать включение ловителей при срабатывании ограничителя скорости;
- максимальное значение усилия натяжения ограничено прочностными характеристиками кронштейнов, на которых устанавливается ограничитель скорости.

Для определения этого диапазона были проведены испытания опытного

образца пружинного натяжного устройства совместно с серийно изготавливаемым на предприятии ограничителем скорости.

Максимальное усилие натяжения каната, создаваемое натяжным устройством, соответствует крайнему верхнему рабочему положению шкива натяжного устройства. В этом случае пружина устройства находится в состоянии рабочего сжатия, создаваемое ею усилие равно F_2 , а запас на вытяжку каната ограничителя скорости равен зазору между шкивом натяжного устройства и нижней частью его корпуса. Минимальное усилие натяжения каната, создаваемое натяжным устройством, соответствует крайнему нижнему рабочему положению шкива натяжного устройства. В этом случае пружина устройства находится в состоянии предварительного сжатия, создаваемое ею усилие равно F_1 , а канат необходимо укорачивать.

Из [8, 9] известно, что в процессе работы лифта вытягивание каната происходит в несколько этапов (рис. 4).

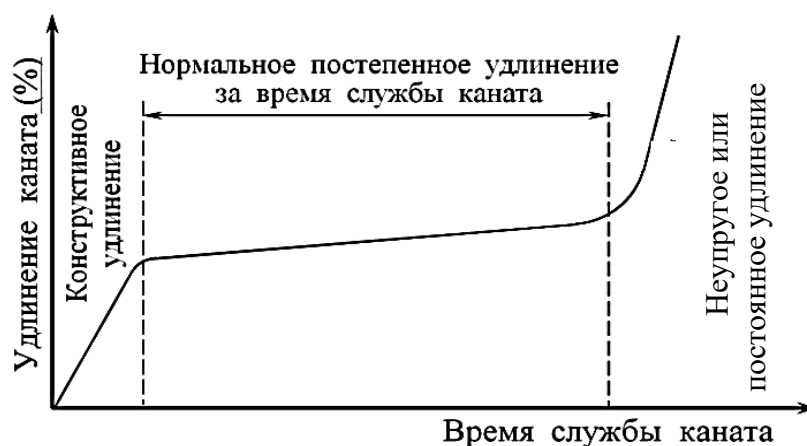


Рис. 4. Характеристика удлинения каната за время его эксплуатации

Второй этап растянут во времени и соответствует вытягиванию каната в процессе эксплуатации лифта. На первом этапе происходит предварительное вытягивание каната, обусловленное его

конструктивным удлинением (уплотнение свивки каната) [8, 9]. Производители лифтовых канатов с целью уменьшения конструктивного удлинения каната выполняют его предварительное растя-

жение и обжатие [10, 11], однако полностью от него избавиться не удастся и оно по-прежнему составляет значительную часть от общего удлинения каната. Причем конструктивное удлинение происходит за очень короткий отрезок времени, фактически при установке натяжного устройства, поэтому оно должно компенсироваться до начала эксплуатации лифта. Таким образом, технология установки натяжного устройства или его конструктивные особенности должны позволять нивелировать данное удлинение каната до запуска лифта в эксплуатацию.

Для решения этой задачи необходимо определить величину конструктивного удлинения каната в зависимости от этажности лифта при конкретном натяжном усилии, создаваемом применяющимся натяжным устройством.

В [14, 15] рассмотрено влияние на степень удлинения каната ограничителя скорости, значений диаметров шкивов натяжного устройства и ограничителя скорости при постоянной величине растягивающего усилия. Однако так как даже при малых высотах подъема лифта прямолинейный участок каната значительно превышает длину каната, огибающую шкивы ограничителя скорости и натяжного устройства, то на начальном этапе влияние диаметров натяжного устройства и ограничителя скорости на величину удлинения канатов рассматривать не будем.

С большой степенью точности можно пренебречь нелинейным характером зависимости удлинения каната от усилия натяжения каната, создаваемого натяжным устройством, и, условно заменив канат упругим стержнем, рассчитать его удлинение, применяя закон Гука [12]:

$$\Delta L = F \cdot L / (E_k \cdot A), \quad (5)$$

где A – площадь поперечного сечения каната; F – растягивающее канат усилие; E_k – модуль упругости каната;

L – начальная длина каната; ΔL – упругое удлинение каната.

При расчетах упругого удлинения стального каната в литературе используется значение модуля упругости углеродистой стали [13], однако такие расчеты носят весьма приближенный характер. Модуль упругости каната значительно отличается от модуля упругости материала его проволок и зависит от конструкции каната, а именно от углов свивки проволок в прядь, а прядей в канат. В общем виде можно записать

$$E_k = k \cdot E,$$

где E – модуль упругости стали; k – коэффициент, зависящий от конструкции каната.

Для определения модуля упругости канатов тросовой конструкции с точечным касанием проволок можно использовать формулу акад. А. Н. Динника [16]:

$$E_{\text{кан}} = E_{\text{пр}} \cdot \cos^4 \alpha_{\text{пр}} \cdot \cos^4 \beta_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где $E_{\text{пр}}$ – модуль упругости проволоки; $\alpha_{\text{пр}}$ – угол свивки проволок в прядь; $\beta_{\text{пр}}$ – угол свивки прядей в канат.

По формуле П. П. Нестерова и А. Н. Малеванного модуль упругости каната [17]

$$E_{\text{кан}} = E_{\text{пр}} (1 - \mu_r \tan \beta_{\text{пр}}) \times \cos^4 \alpha_{\text{пр}} \cdot \cos^4 \beta_{\text{пр}}, \quad (7)$$

где μ_r – коэффициент сужения каната.

Из формул (6) и (7) видно, что модуль упругости каната меньше модуля упругости углеродистой стали. Однако учесть отклонения геометрических размеров проволок, из которых состоит канат, и отличия их механических свойств, например разбег модулей упругости отдельных проволок (из-за отличий фактических пределов прочности при растяжении каждой из проволок)

[16, 18], не представляется возможным.

Поэтому производитель лифтовых канатов, используемых на ОАО «Могилевлифтмаш», по запросу предоставил данные по величине упругого удлинения своих канатов. По формуле (5) рассчитаем значение модуля упругости E_k , МПа, этих канатов:

$$E_k = (0,47...0,52) \cdot 10^5.$$

Если значение площади поперечного сечения каната не указано в каталоге производителя канатов [19], то его также можно узнать по запросу. Очевидно, что статическое усилие натяжения в верхней точке каната равно сумме усилия натяжения в нижней точке каната и веса каната, который зависит от его длины [20].

Пренебрегая изменением диаметра каната при его удлинении, рассчитаем упругое удлинение каната ограничителя скорости в зависимости от высоты подъема лифта и от усилия натяжения, создаваемого натяжным устройством:

$$\Delta L = \Delta L_T + \Delta L_Q = \frac{\Delta T_n L}{E_k A} + \frac{\gamma L^2}{2E_k}, \quad (8)$$

где ΔT_n – усилие натяжения в нижней точке каната; ΔL_T – упругая деформация каната под действием усилия ΔT_n ; ΔL_Q – упругая деформация каната под действием силы тяжести каната; γ – удельный вес каната (указывается производителем [10, 19]).

Фактически ΔT_n – это максимальное усилие натяжения каната, создаваемое натяжным устройством, равное значению усилия рабочего сжатия пружины F_2 . Начальная длина каната L определяется этажностью здания, в котором планируется устанавливать лифт, поэтому можно определить величину упругого удлинения каната ΔL в зависимости от этажности здания.

В натяжном устройстве ОАО «Могилевлифтмаш» предусмотрена возможность компенсировать упругое удлинение каната путем вертикального перемещения корпуса устройства относительно пола приямка вдоль резьбовых шпилек (рис. 5).

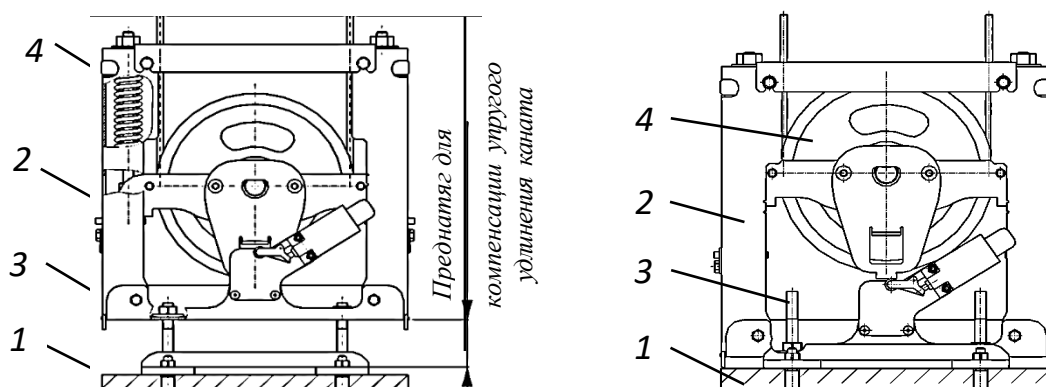


Рис. 5. Компенсация упругого удлинения каната ограничителя скорости путем перемещения пружинного натяжного устройства (ОАО «Могилевлифтмаш»): 1 – пол приямка; 2 – корпус натяжного устройства; 3 – шпильки; 4 – шкив натяжного устройства

Величина вертикального перемещения корпуса натяжного устройства относительно пола приямка должна соответствовать этажности здания в соот-

ветствии с рис. 6. Однако для того чтобы длина шпилек не влияла на формирование его вертикального габарита, она не должна превышать половину

диаметра шкива. Например, для каната ограничителя скорости диаметром 6 мм минимальный диаметр шкива – 150 мм, а максимальная длина шпилек – 75 мм. Как видно, длине шпилек 75 мм соответствует высота здания в 12,5 этажей. Повысить допустимую этажность при-

менения данного натяжного устройства, не увеличивая его габарит, можно, расположив шпильки снаружи корпуса устройства. Однако при этом их длина не должна превышать вертикальный габарит натяжного устройства.

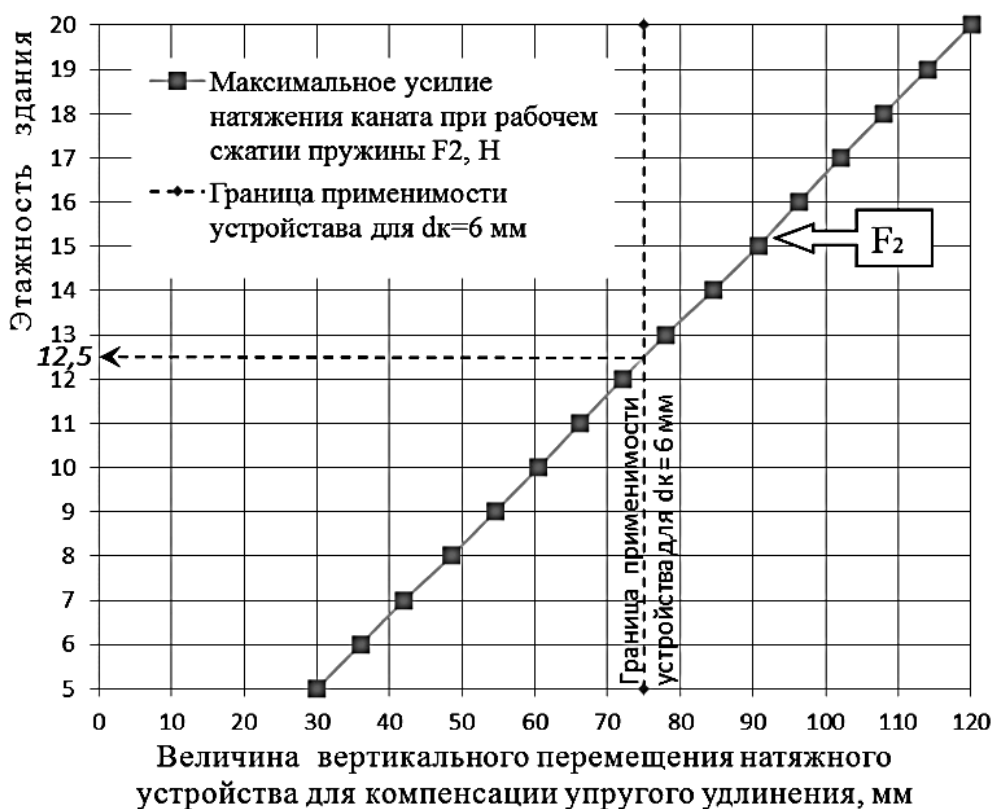


Рис. 6. Зависимость вертикального перемещения корпуса пружинного натяжного устройства (ОАО «Могилевлифтмаш») относительно пола приемки в зависимости от этажности здания

В любом случае компенсация упругого удлинения каната вертикальным перемещением корпуса натяжного устройства и, соответственно, применимость данного решения ограничена длиной шпилек.

Для использования данного натяжного устройства без ограничения этажностью нужно рекомендовать монтажным организациям оснащаться ручной лебедкой и тросовым захватом (рис. 7, а) [21]. Это позволит обеспечить выборку упругого удлинения каната при монтаже натяжного устройства без перемещения натяжного устройства и, соответствен-

но, позволит отказаться от шпилек. Для компенсации упругого удлинения каната в процессе эксплуатации лифта можно использовать талреп, соединяющий рычаг механизма включения ловителя с концом каната ограничителя, охватывающего шкив натяжного устройства (рис. 7, б) [22, 23].

На основании сопоставления себестоимости и трудоемкости изготовления пружинного натяжного устройства и натяжного устройства рычажной конструкции, выпускаемой на ОАО «Могилевлифтмаш», была подтверждена экономическая целесообразность освоения

выпуска пружинного натяжного устройства. По результатам успешных испытаний в составе лифта данное натяжное

устройство запущено в производство. На конструкцию получен патент на полезную модель ВУ 12769 [6].

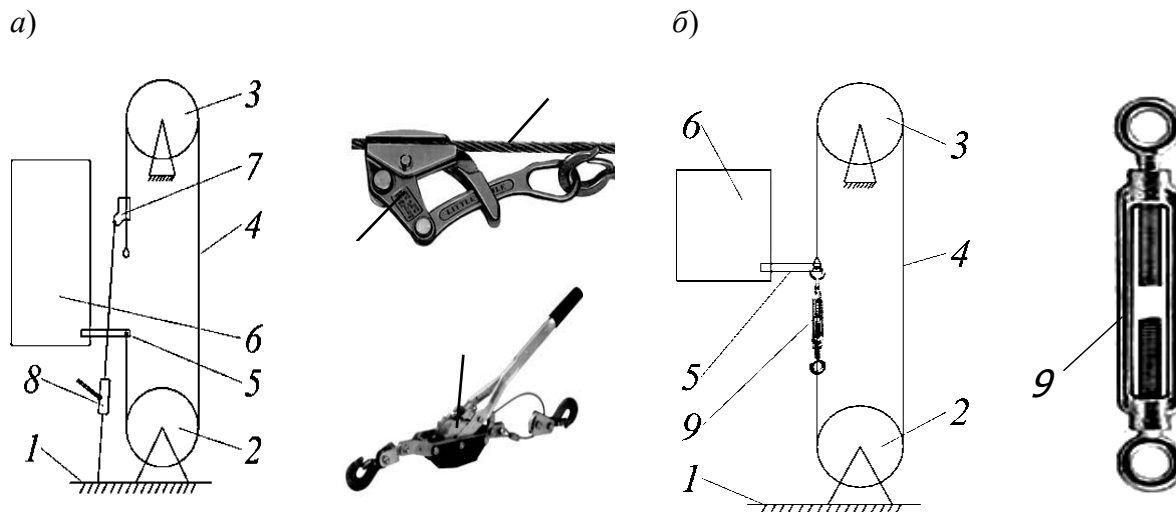


Рис. 7. Натяжение каната ограничителя скорости ручной лебедкой при помощи тросового захвата и талрепа: 1 – пол прямка; 2 – натяжное устройство; 3 – ограничитель скорости; 4 – канат ограничителя скорости; 5 – рычаг включения ловителя; 6 – кабина лифта; 7 – тросовый захват; 8 – лебедка; 9 – талреп

Уменьшение габаритов натяжного устройства любого типа небесконечно и определяется его конструкцией, необходимостью выполнения им функционального назначения, а также соответствием требованиям отраслевых стандартов. Наряду с преимуществами пружинного натяжного устройства (меньшими габаритами и экономической эффективностью), оно имеет ограничение по применению без дополнительных приспособлений (см. рис. 7) на высотах подъема более 12 этажей, около 36 м, по причине упругого удлинения каната. При этом дополнительными приспособлениями не требуется комплектовать каждый лифт, их количество определяется количеством лифтов, одновременно монтируемым организацией на объектах.

Заключение

Коллективом научно-технического центра ОАО «Могилевлифтомаш» сфор-

мулировано определение вертикального габарита пружинного натяжного устройства как функции от диаметра тягового элемента и его механических (упругих) свойств.

На основании выполненного анализа пружинного натяжного устройства COMPACT TENSING PULLEY 200 фирмы Dynatech [7] разработана собственная конструкция [6] пружинного натяжного устройства, объединяющая в себе функциональность, минимальный вертикальный габарит и гибкость встраивания в шахте независимо от компоновки лифтового оборудования, что позволяет использовать данное устройство в лифтах с малой глубиной прямка.

Учтено явление упругого удлинения каната в зависимости от этажности здания, а в конструкции натяжного устройства реализована возможность его частичной компенсации.

Предложены универсальные решения по использованию канатных за-

хватов и талрепов, позволяющие полностью компенсировать упругое удлинение каната без ограничения этажностью

и не требующие доработки конструкции натяжного устройства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лифт без машинного помещения. KONE N MonoSpace [Электронный ресурс]: каталог. – Режим доступа: https://www.kone.ru/Images/8522_KONE_N%20MonoSpace_RUS_tcm132-84628.pdf. – Дата доступа: 16.08.2022.
2. SuperDomus. Лифт MRL с минимальным приемком и оголовком [Электронный ресурс]: каталог. – Режим доступа: <https://igvlift.ru/upload/igv-superdomus-rus.pdf>. – Дата доступа: 16.08.2022.
3. Лифты: учебник / Под общ. ред. Д. П. Волкова. – Москва: АСВ, 1999. – 480 с.: ил.
4. Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке. Лифты для транспортирования людей или людей и грузов = Ліфты. Агульня патрабаванні бяспекі да устройства і устаноўцы. Ліфты для транспартавання людзей або людзей і грузаў: ГОСТ 33984.1–2016 (EN 81-20:2014). – Введ. 02.11.2018. – Минск: Госстандарт РБ, 2018. – 130 с.
5. Сравнительный анализ конструктивных схем натяжных устройств канатов ограничителей скорости и обоснование требований к ним при комплектации ими лифтов без машинного помещения и с уменьшенным приемком / А. В. Куцеполенко [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 4 (73). – С. 26–36.
6. Пружинное натяжное устройство: полз. модель ВУ 12769 / А. В. Куцеполенко, Г. С. Синицын. – Оpubл. 30.12.2021.
7. INSTRUCTIONS: Compact 200 Tensing Pulley. Cod: DYN 66.1.04 Date: 01/06/2020 Revision: 04. Dynatech [Электронный ресурс]: инструкция по эксплуатации. – Режим доступа: <https://www.dynatech-elevation.com/documentos/articulos/Reducido%20Tensora%20Compact%20200.pdf>. – Дата доступа: 16.08.2022.
8. Шилакадзе, М. Е. Лифтовые приводы с фрикционной лебедкой: монография / М. Е. Шилакадзе. – Тбилиси: Техн. ун-т, 2013. – 149 с.
9. Клыков, Н. И. Об упругом и пластическом удлинении подъемных канатов / Н. И. Клыков // Изв. Томского ордена Трудового Красного Знамени политехн. ин-та им. С. М. Кирова. – 1959. – Т. 104. – С. 3–10.
10. Стальные канаты. СеверСтальМетиз [Электронный ресурс]: каталог. – Режим доступа: <http://xn--90aisuo.xn--p1ai/docs/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D1%82%D1%8B%20%D0%A1%D0%B5%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C-%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7.pdf>. – Дата доступа: 17.08.2022.
11. Лаптева, Т. А. Повышение работоспособности подвижных канатов на основе применения калибрующего обжатия прядей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Т. А. Лаптева; Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2014. – 19 с.
12. Межецкий, Г. Д. Сопротивление материалов: учебник / Г. Д. Межецкий, Г. Г. Загребин, Н. Н. Решетник. – 5-е изд. – Москва: Дашков и К°, 2016. – 432 с.
13. Таштанбаева, В. О. Теоретическое исследование натяжения стального каната подъемной установки / В. О. Таштанбаева // Изв. вузов Кыргызстана. – 2020. – № 6. – С. 3–6.
14. О влиянии радиуса блока на натяжение канатов в системе подвески груза / М. Ф. Кулешова [и др.] // Вісн. Харківського нац. автомобільно-дорожнього ун-ту. – 2007. – № 36. – С. 102–104.
15. Лобов, Н. А. Динамика грузоподъемных кранов / Н. А. Лобов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 160 с.
16. Кошкин, А. П. Канаты для подъемных установок: учебное пособие / А. П. Кошкин, Г. Д. Трифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014. – 107 с.
17. Витчук, П. В. Обеспечение долговечности лифтовых канатоведущих шкивов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / П. В. Витчук; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2013. – 16 с.
18. Рыжиков, В. А. Теория и разработка конструкций дифференциальных натяжных устройств канатовьющих машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / В. А. Рыжиков; Урал. гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 1997. – 32 с.
19. Канатная продукция: производство и обслуживание. ООО ПФАЙФЕР: канаты и подъемные технологии. PFEIFER. 11/2012 [Электронный ресурс]: каталог. – Режим доступа: https://pfeiferrussia.ru/images/product/pdf/PFIFER_2013_comp.pdf. – Дата доступа: 18.08.2022.

20. Представление длинных упругих канатов в системах автоматического регулирования / В. А. Бейнарович [и др.] // Изв. Томского ордена Трудового Красного Знамени политехн. ин-та им. С. М. Кирова. – 1975. – Т. 285. – С. 100–104.

21. Скорая помощь при подъеме грузов. Захваты. RUCRANES [Электронный ресурс]: каталог. – Режим доступа: <https://rucranes.ru/upload/uf/d12/Zaxvatu.pdf>. – Дата доступа: 26.08.2022.

22. Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Вертикальная жесткая анкерная линия «ЛИФТ». Артикул vрго TL lift ss/zn. Руководство по монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию [Электронный ресурс]: каталог. – Режим доступа: https://alpindustria.pro/images/instructions/107_1530030047.pdf. – Дата доступа: 26.08.2022.

23. **DIN 1480:2005-09.** Spannschlossmuttern, geschmiedet (offene Form). Forged turnbuckles (open type). Lanterne de tendeur forgée (type ouvert) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.din.de>. – Date of access: 26.08.2022.

Статья сдана в редакцию 30 сентября 2022 года

Александр Владимирович Куцепенко, начальник бюро по научной работе отраслевой лаборатории лифтового машиностроения НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш», магистр технических наук. E-mail: bn_ntc@liftmach.by.

Максим Эдуардович Подымако, зав. отраслевой лабораторией лифтового машиностроения НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». E-mail: onir@liftmach.by.

Максим Валерьевич Соболев, директор НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». Тел.: +375-222-74-09-47. E-mail: liftmach@liftmach.by.

Герман Сергеевич Синицын, инженер-конструктор отдела непрофильной продукции НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». E-mail: onp@liftmach.by.

Владимир Александрович Далимаев, инженер-конструктор отраслевой лаборатории лифтового машиностроения НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш», магистр технических наук. E-mail: bn_ntc@liftmach.by.

Alexandr Vladimirovich Kutsepolenko, Head of the Scientific Research Department of STC Elevator Engineering Branch Laboratory, JSC Mogilevliftmash, MSc (Engineering). E-mail: bn_ntc@liftmach.by.

Maksim Eduardovich Podymako, Head of the STC Elevator Engineering Branch Laboratory, JSC Mogilevliftmash. E-mail: onir@liftmach.by.

Maksim Valeryevich Sobolev, Director of STC, JSC Mogilevliftmash. Tel.: +375-222-74-09-47. E-mail: liftmach@liftmach.by.

German Sergeevich Sinitsyn, design engineer of STC ONP Department, JSC Mogilevliftmash, E-mail: onp@liftmach.by.

Vladimir Aleksandrovich Dalimaev, design engineer of STC Elevator Engineering Branch Laboratory, JSC Mogilevliftmash, MSc (Engineering). E-mail: bn_ntc@liftmach.by.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_25

УДК 621.762

Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко, А. С. Оленцевич

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ОБЪЕКТА ПОСЛОЙНЫМ СИНТЕЗОМ НА СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЯ И ПУТИ ЕЕ УЛУЧШЕНИЯ

F. G. Lovshenko, A. S. Fedosenko, A. S. Olientsevich

EFFECT OF THE TECHNIQUE FOR FORMING A THREE-DIMENSIONAL OBJECT BY LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS ON THE STRUCTURE OF PRODUCT MATERIAL AND TECHNIQUES TO IMPROVE IT

Аннотация

Изложены результаты исследований, направленных на изучение структуры и свойств стальных образцов, полученных послойным нанесением конструкционного материала в виде порошка и проволоки. Отмечены пути, позволяющие уменьшить размер зерна в изделии. Показано, что измельчения структурных составляющих в материалах, изготовленных методом селективного лазерного сплавления, можно достичь использованием порошков, полученных по технологии реакционного механического легирования, а в изделиях, сформированных дуговой наплавкой, путем оптимизации режимов технологического процесса.

Ключевые слова:

реакционное механическое легирование, аддитивное производство, порошок, послойный синтез, дендритная структура, размер зерна, твердость, дуговая наплавка.

Для цитирования:

Ловшенко, Ф. Г. Влияние способа формирования трехмерного объекта послойным синтезом на структуру материала изделия и пути ее улучшения / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко, А. С. Оленцевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 25–34.

Abstract

The paper presents the results of studies aimed at studying the structure and properties of steel samples obtained by layer-by-layer deposition of a structural material in the form of a wire or as a powder. Techniques to reduce the grain size in the product are given. It is shown that the refinement of structural components in materials produced by selective laser melting can be achieved using powders obtained by reactive mechanical alloying, and in products formed by arc surfacing, it is achieved by optimizing the modes of the technological process.

Keywords:

reactive mechanical alloying, additive manufacturing, powder, layer-by-layer synthesis, dendritic structure, grain size, hardness, arc surfacing.

For citation:

Lovshenko, F. G. Effect of the technique for forming a three-dimensional object by layer-by-layer synthesis on the structure of product material and techniques to improve it / F. G. Lovshenko, A. S. Fedosenko, A. S. Olientsevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 25–34.

Введение

В настоящее время в различные отрасли промышленности активно

внедряются аддитивные технологии (АТ) [1–4], которые позволяют изготавливать детали любого уровня сложности в минимальные сроки. АТ нашли

применение в различных отраслях: от медицины до строительства. С их помощью получают элементы моделей для литья в песчано-глинистые формы, выжигаемые и выплавляемые модели любой сложности, изготавливают медицинские имплантаты и детали газотурбинных двигателей. Несомненно, что в ближайшем будущем аддитивные технологии станут незаменимы в ряде передовых отраслей промышленности.

Наиболее популярными способами производства изделий из металлов являются селективное лазерное сплавление (SLM), при котором исходный материал формируется в виде слоя толщиной не более 50 мкм, после чего оплавляется концентрированным лазерным лучом, а также способ послойной наплавки с подачей конструкционного материала непосредственно в зону плавления (DMD). Способы позволяют получать точные изделия сложной формы, однако применяемое оборудование имеет высокую стоимость и низкую производительность. На этом фоне активно развиваются способы изготовления деталей, базирующиеся на использовании классической роботизированной дуговой наплавки в среде защитных газов (технология WAAM). В качестве исходного конструкционного материала в данном случае используется проволока. Применение дуговой наплавки в среде защитных газов позволяет на порядок увеличить производительность процесса и размер получаемых изделий, а используемое оборудование отличается простотой и доступностью.

Стоит отметить, что используемые в области АТ материалы, а также технологические возможности оборудования не всегда позволяют получать детали требуемого качества. Частая причина неудовлетворительной прочности изделий связана с особенностями структуры и, в первую очередь, с образованием крупных зерен неправильной формы, что способствует сильной анизотропии механических свойств и снижает проч-

ность изделий. Улучшить структуру можно, используя исходные порошки, в составе которых присутствуют частицы тугоплавких стабильных соединений, выполняющих функцию модификаторов. К материалам такого типа можно отнести порошки, синтезируемые с применением технологии реакционного механического легирования (РМЛ). Если применение материалов, содержащих модификаторы, проблематично или невозможно, как в случае со способами дуговой наплавки, улучшения структуры и свойств изделий, получаемых послойным синтезом, можно достичь посредством подбора режимов наплавки.

Представленная работа направлена на выявление путей, позволяющих управлять структурой изделий, формируемых способами селективного лазерного сплавления и дуговой наплавкой, с целью улучшения их физико-механических свойств.

Оборудование и методика проведения эксперимента

Реакционное механическое легирование проводили в вибрационном механореакторе гирационного типа. Микротвердость измеряли по методу Виккерса с помощью микротвердомера Indentec ZHV (Германия).

Образцы изготавливали на принтере EP-M250 (Shining 3D) методом селективного лазерного сплавления. Процесс проводили в среде аргона. Печать осуществлялась на плите из нержавеющей стали, поверхность которой была предварительно прошлифована.

Дуговую наплавку осуществляли с помощью роботизированного комплекса Fanuc M-710IC/50, используя в качестве конструкционного материала низкоуглеродистую проволоку марки Св-08Г2С. В качестве защитного газа использовали смесь 80 % Ar + 20 % CO₂, диаметр проволоки 1,2 мм. Скорость наплавки варьировалась в интервале 30...60 см/мин.

Наплавку осуществляли на плиту из стали СтЗпс.

Плазменная наплавка порошковых материалов выполнялась на установке EuTronic GAP 2501 DC с горелкой GAP E150P, при силе тока 45 А, подаче порошка 5 г/мин и скорости наплавки 5 см/мин.

Травление образцов проводилось в 3-процентном спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктура исследовалась на оптическом микроскопе МКИ-2М.

Результаты экспериментов

В работе показаны результаты исследования структуры и свойств материалов, полученных послойным синтезом по технологии селективного лазерного сплавления серийно выпускаемого и разработанного механически легированного порошков аустенитной стали, а также многослойной дуговой наплавкой низкоуглеродистой стали в среде защитного газа. Результаты позволяют оценить особенности структурообразования изделий, получаемых многослойной лазерной наплавкой порошков, а также демонстрируют особенности формирования структуры объекта при многослойной дуговой наплавке в среде защитных газов.

Структура и свойства материала, полученного селективным лазерным сплавлением

Результаты изучения разработанных порошков, синтезированных РМЛ, показали, что по своим основным характеристикам, включая гранулометрический состав, сыпучесть, а также форму частиц, они принципиально не отличаются от промышленно выпускаемых аналогов, используемых для формирования трехмерных изделий. В то же время полученные порошки существенно отличаются по структуре и фазовому составу, заметно превосходят серийно

выпускаемые материалы по содержанию упрочняющих фаз. Это должно оказывать значительное влияние на структуру изделий, формируемых селективным лазерным сплавлением.

Стоит отметить, что процессы структурообразования, протекающие в результате послойного синтеза, в значительной степени аналогичны процессам, характерным для формирования плазменных газотермических покрытий. В данном случае, по аналогии с плазменными покрытиями, присутствие в исходном материале ультрадисперсных частиц, отличающихся высокой термодинамической стабильностью, заметно снижает склонность материалов к образованию крупнозернистой структуры, состоящей из сильно вытянутых дендритов, что свидетельствует о ярко выраженном модифицирующем эффекте разрабатываемых порошковых материалов.

Анализ образцов, изготовленных селективным лазерным сплавлением серийно выпускаемого порошка стали марки 316L, показал, что они отличаются типичным строением (рис. 1), характерным для изделий, получаемых послойным синтезом.

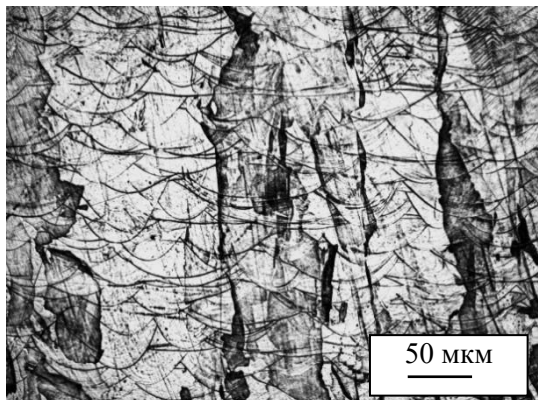
Поперечное сечение образцов, напечатанных из серийно выпускаемого порошка 316L, демонстрирует структуру, состоящую из крупных дендритов, зародившихся у модельной плиты и распространившихся на всю толщину напечатанного образца, равную порядка 0,5 см. В то же время в продольной плоскости, совпадающей с плоскостью перемещения лазерного луча, зерна имеют форму, близкую к правильной, а их поперечное сечение составляет 0,8...0,16 мм.

Формирование крупнозернистой структуры в изделиях, получаемых послойным синтезом, во многом сопряжено с отсутствием возможности управления технологическими параметрами процесса их изготовления, что является значительным недостатком существующего оборудования. В частности,

применяемые в настоящее время установки не позволяют регулировать тем-

пературу модельной плиты и теплоотвод от изделия.

а)



б)

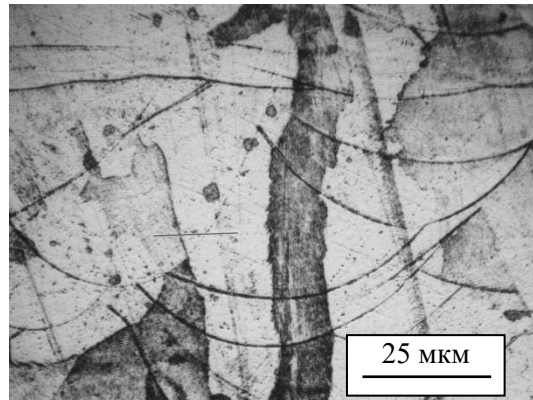


Рис. 1. Структура образца из порошка марки 316L в поперечном сечении

Как правило, отсутствует возможность управления алгоритмом движения лазерного луча, нет возможности регулировать его характеристики. Все это не позволяет оказывать влияние на структуру и, как следствие, на свойства получаемых изделий. В данном случае одним из немногих способов, позволяющих повлиять на формирование структуры, является применение специальных материалов, содержащих компоненты-модификаторы, присутствие которых способствует измельчению зерна и придает ему более правильную форму. Как показали результаты, представленные далее, такими материалами являются порошки, синтезируемые по технологии реакционного механического легирования.

Изучение образцов, полученных из механически легированных порошков, показало, что в их структуре отсутствуют крупные кристаллы, проходящие через все тело от подложки до поверхности, как это характерно для изделий из серийно выпускаемых материалов (рис. 2). В данном случае структура образцов состоит из отдельных неравноосных зерен, расположенных относительно друг друга под углами, превышающими 5 град, и ориентированных в

направлении, перпендикулярном плоскости модельной плиты. При этом они имеют границы раздела с соседними зернами со всех сторон (см. рис. 2). Наименьший и наибольший размеры в них достигают соотношения одного к трем. В поперечном сечении диаметр зерен в образцах из разработанного материала до двух раз меньше по сравнению с зернами в материале, полученном из порошка марки 316L.

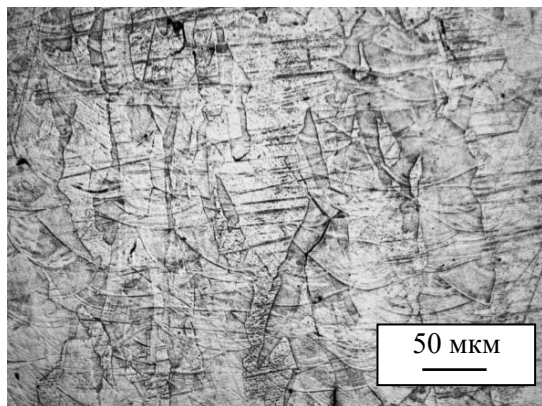
Отличительной характеристикой образцов, напечатанных как из разработанного материала, так и из серийно выпускаемого, является присутствие в их структуре зерен, состоящих из фрагментов небольшого размера, формирование которых обусловлено явлением двойникования в процессе кристаллизации сплавов (рис. 3).

Стоит отметить, что изготовленные на 3D-принтере экспериментальные образцы отличаются небольшим размером. Это исключает возможность всестороннего изучения их свойств. По этой причине на данном этапе исследований была изучена лишь микротвердость материалов из разработанного и серийно выпускаемого порошков как непосредственно после печати, так и после длительного отжига. В процессе

термообработки образцы выдерживали при заданной температуре, достигаю-

щей 900 °С, в течение 120 мин.

а)



б)

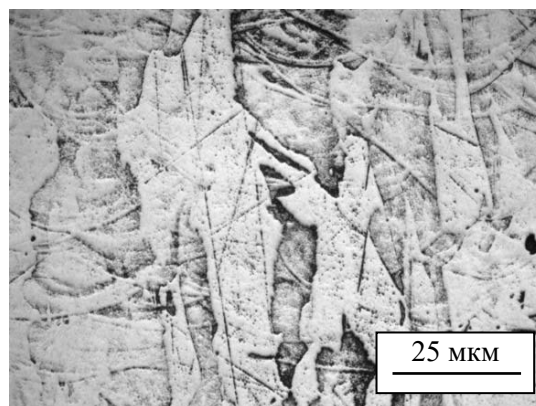
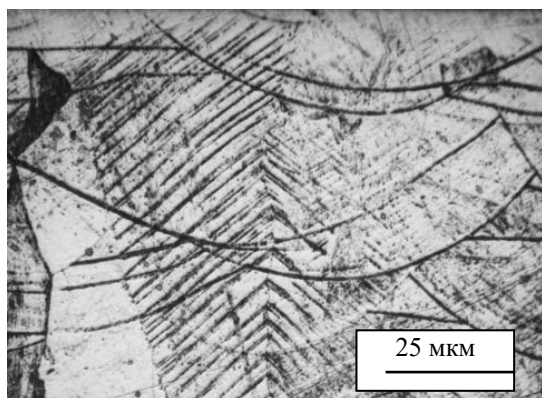


Рис. 2. Структура образца в поперечном сечении из порошка марки 12X18H10, полученного по технологии реакционного механического легирования

а)



б)

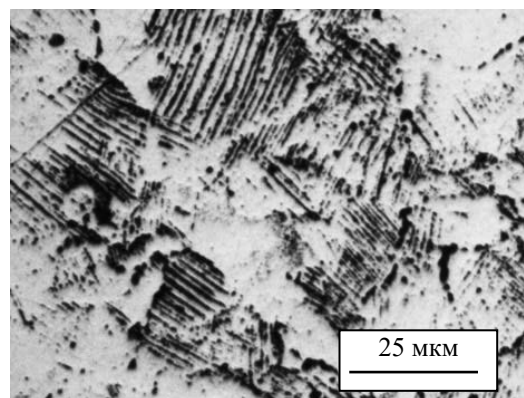


Рис. 3. Структура поперечного сечения кристаллов материалов из порошков стали 316L (а) и механически легированного (б)

Твердость образцов из разработанного и серийно выпускаемого порошков отличается как после печати, так и после отжига. Более высокое ее значение у микрошлифов из механически легированного материала, при этом образцы обладают более высокой жаропрочностью, сохраняющейся до значительных температур. Как следует из графика (рис. 4), исходная твердость напечатанных образцов из экспериментального материала 270 НВ практиче-

ски не изменяется после отжига при температуре 900 °С. Это подтверждает предположение о том, что в материале реализуются дисперсное и зернограничное виды упрочнения, обусловленные присутствием ультрадисперсных упрочняющих фаз в виде оксидов, карбидов и других соединений.

Нагрев образцов из серийно выпускаемого материала сопровождается заметным снижением их твердости. До термической обработки она состав-

ляет 240 HV, а после отжига при 900 °С снижается до 180 HV. При этом уже при 450 °С наблюдается резкое падение ее значения, что свидетельствует об отсутствии комплексного упрочнения, характерного материалам из разработанных порошков, и обусловлено уменьшением внутренних напряжений, образующихся в процессе послойной печати.

Таким образом, применение механически легированных порошков, содержащих ультрадисперсные упрочня-

ющие фазы, позволяет улучшить структуру и свойства изделий, получаемых послойным синтезом. В то же время, как ожидается, дополнительного измельчения структуры и повышения характеристик изготавливаемых деталей можно достичь подбором технологических приемов. Подтверждением этому может являться структура образцов, полученных послойным нанесением механически легированных порошков плазменной порошковой наплавкой (рис. 5).

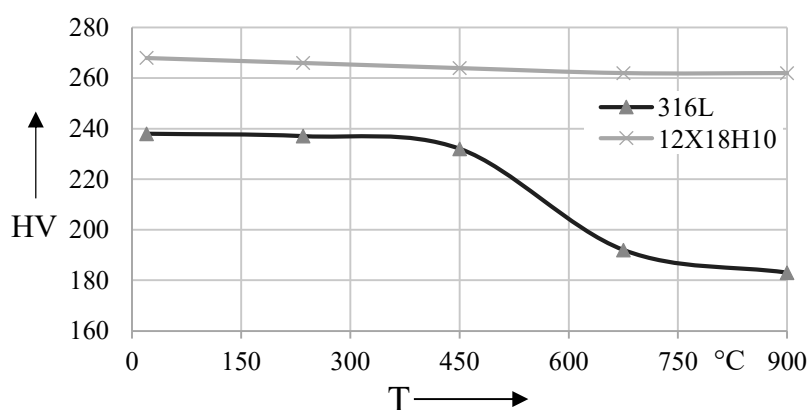


Рис. 4. Влияние температуры отжига на твердость сталей 12X18H10 и 316L

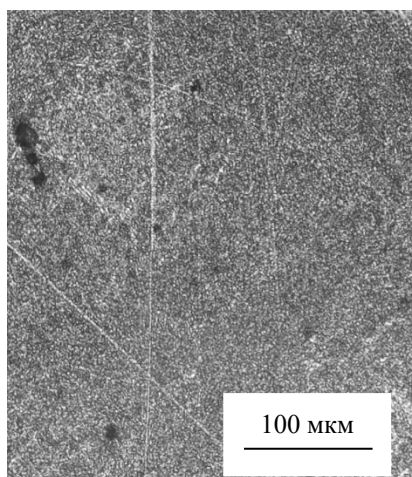


Рис. 5. Структура металла, полученного плазменной наплавкой механически легированного порошка

Как следует из представленного снимка (см. рис. 5), полученный материал характеризуется мелкозернистой структурой, форма и размер кристаллов

в которой не выявляются оптической микроскопией.

Формирование структуры материала в процессе роботизированной дуговой наплавки в защитном газе

Несмотря на положительный эффект, оказываемый механически легированным порошком на структуру изделий, получаемых послойным синтезом, способ селективного лазерного сплавления все же имеет ряд существенных недостатков, среди которых стоит отметить низкую производительность процесса и значительную ограниченность в размере получаемых изделий. Более перспективными в этом отношении являются способы дуговой наплавки в среде защитных газов. В настоящее время они лишь начинают внедряться в область аддитивных технологий, однако считаются одними из наиболее перспективных, поскольку обеспечивают высокую производительность и почти не ограничены по размерам выпускаемых изделий.

Как и в случае селективного лазерного сплавления с использованием серийно выпускаемых материалов, для дуговых способов наплавки также характерно формирование крупнозернистой структуры, состоящей из сильно вытянутых зерен, что, как уже отмечалось, негативно влияет на механические свойства материала. Однако положительной стороной использования дуговых способов наплавки является возможность управления технологическими параметрами процесса, что позволяет оказывать влияние на структуру синтезируемого изделия.

В данной части исследований основной задачей экспериментов являлся поиск технологических решений, позволяющих уменьшить средний размер зерна в формируемом изделии, способствуя повышению его физико-механических свойств.

В ходе экспериментов изучали структуру металла в зоне сплавления, основном объеме слоя, а также на периферии.

Изучение зоны, непосредственно прилегающей к основному материалу, позволило установить, что в данной части шва на удалении до 500 мкм от линии сплавления образуется область, состоящая из мелких зерен с размером до 25 мкм и формой, близкой к правильной (рис. 6, а). На данном участке величина зерна с удалением от зоны сплавления растет незначительно, однако на расстоянии более 0,5 см от подложки формируется область, состоящая из крупных, сильно вытянутых кристаллов (рис. 6, б). Их образование можно объяснить снижением интенсивности теплоотвода от формируемого слоя, что замедляет охлаждение наплавленного металла, способствуя образованию крупных неравноосных зерен, растущих в направлении, перпендикулярном плоскости теплоотвода.

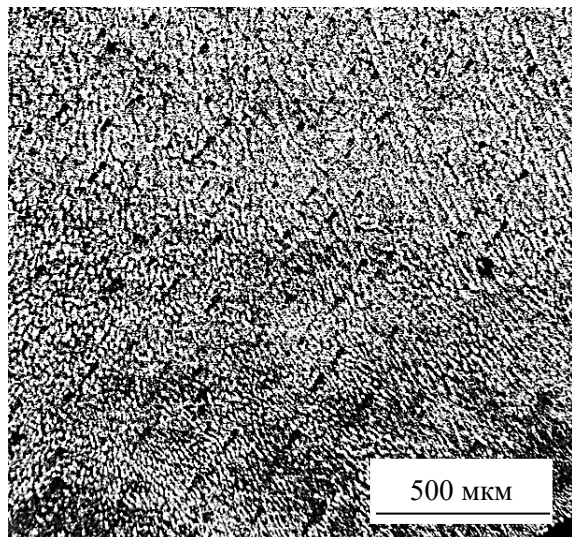
Полученные данные позволяют сделать вывод, что сформировать более мелкозернистую структуру в изделии можно путем увеличения интенсивности охлаждения наплаваемого слоя. Такой результат будет достигнут, например, при ускорении теплоотвода от наплаваемого материала либо уменьшении объема наплаваемого за один проход материала, что даст возможность снизить количество энергии, поступающей в область построения.

Изучение микроструктуры образцов, полученных многослойной дуговой наплавкой в среде защитных газов, позволило установить, что при изменении скорости наплавки в 2 раза (с 18 до 36 м/ч) размер зерна наплаваемого материала уменьшается. Минимальную величину оно имеет в зоне сплавления слоев, идущих друг за другом. Для данной области характерно образование мелкозернистой структуры. Также отсутствует зона перегрева, характерная для ЗТВ сварных швов. Каждый наплавленный слой имеет идентичную структуру – зона сплавления отличается минимальным размером зерна, размер которого увеличивается при

движении в направлении периферии (рис. 7). Немаловажным является тот факт, что при формировании многослойных материалов в исследуемых об-

разцах отсутствует эпитаксиальный рост зерен, характерный многослойным сварным швам.

а)



б)

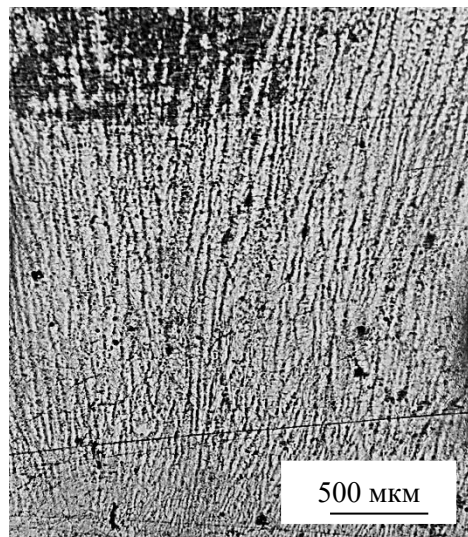
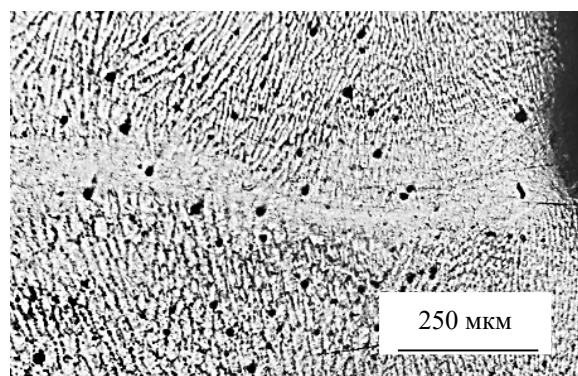


Рис. 6. Структура наплавленного металла на низкоуглеродистую сталь Ст3пс: а – область, прилегающая к основному металлу; б – дендритные зерна на максимальном удалении от зоны сплавления

а)



б)

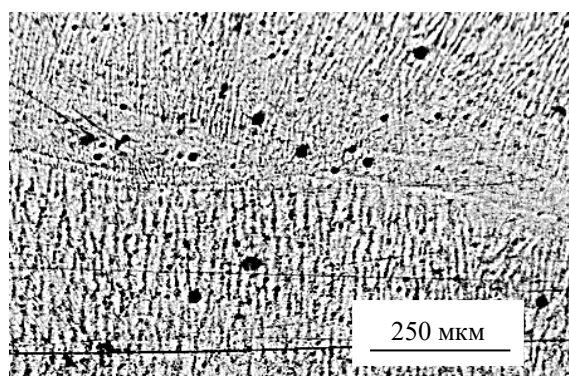


Рис. 7. Зона сплавления двух последовательно наложенных слоев: а – закаленная; б – отожженная

Изучение микроструктуры образцов, полученных многослойной наплавкой, показало, что сокращение интервала времени между наплавкой каждого последующего слоя сопровождается формированием более мелкозернистой структуры. Подобная закономерность,

вероятнее всего, связана с более полной переплавкой материала, наплавленного ранее. Это позволяет устранить область шва с крупными вытянутыми зернами и сохранить лишь относительно мелкое зерно корня шва.

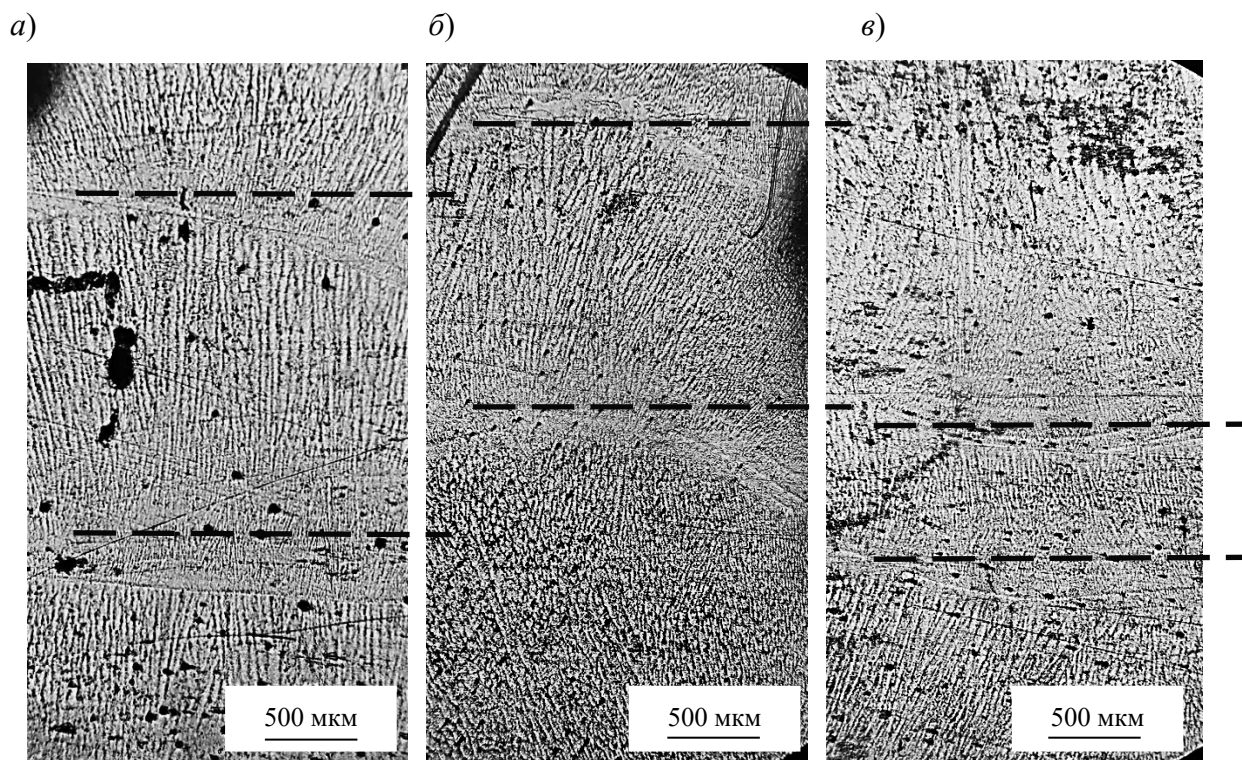


Рис. 8. Структура многослойных швов: *а* – интервал времени между наплавкой слоёв 30 с; *б* – интервал времени между наплавкой слоёв 15 с; *в* – интервал времени между наплавкой слоёв 0 с

Выводы

1. Применение порошковых материалов, синтезированных по технологии реакционного механического легирования, для получения изделий способом селективного лазерного сплавления позволяет уменьшить размер зерна в изделии по сравнению с изделиями, получаемыми из серийно выпускаемых порошков.

2. Синтезированные порошки являются композиционными материалами, обладающими модифицирующим эффектом, что способствует формированию в изделии более однородной мелкозернистой структуры, обеспечиваю-

щей изделиям более высокие физико-механические свойства.

3. Размер и форма зерна, формирующегося в процессе многослойной дуговой наплавки в среде защитных газов, существенно зависят от технологических параметров процесса. Измельчения структуры и, как следствие, улучшения физико-механических свойств изделий при многослойной дуговой наплавке можно достичь использованием более интенсивного охлаждения кристаллизующегося металла шва, уменьшением объема металла, наплавляемого за один проход, а также увеличением скорости наплавки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Additive manufacturing and foundry innovation / S. Yu-sheng [et al.] // China Foundry. – 2021. – Vol. 18. – P. 286–295.
2. Gebhardt, A. Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing / A. Gebhardt, J.-S. Hötter // Hanser Publications. – 2016. – 606 p.

3. **Thomas, D. J.** 3D Bioprinting for Reconstructive Surgery Techniques and Applications / D. J. Thomas, Z. M. Jessop, I. S. Whitaker // Elsevier. – 2018. – 451 p.

4. **Зленко, М. А.** Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2013. – 222 с.

Статья сдана в редакцию 6 октября 2022 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Алексей Сергеевич Федосенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-295-46-96-34.

Алексей Сергеевич Оленцевич, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Aleksei Sergeyeovich Fedosenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-295-46-96-34.

Aleksei Sergeyeovich Olentsevich, PhD student, Belarusian-Russian University.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_35

УДК 629.113.001

А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич

**ФРАКТАЛЫ И АТТРАКТОРЫ НОРМИРОВАНИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИИ
ТЕХНИКИ И ПРОЦЕССОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ.
ЭФФЕКТИВНОЕ ПЛАНЕТАРНОЕ РАЗВИТИЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ
В ПАРАДИГМЕ РИСКОВ**

A. N. Panov, Z. A. Mrochek, V. M. Pashkevich

**FRACTALS AND ATTRACTORS OF RATIONING AND STANDARDIZATION
OF EQUIPMENT AND PROCESSES OF ORGANIZATIONS. EFFECTIVE
PLANETARY DEVELOPMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
IN THE RISK PARADIGM**

Аннотация

Рассматривается проблема необходимости переосмысления процессов проектирования, изготовления, эксплуатации, восстановления и утилизации продукции машиностроения в связи с изменившейся парадигмой – переходом с детерминированно-вероятностного постулата проектирования на риск-ориентированный. Предлагаются основополагающие элементы методологии и модели нормирования и стандартизации техники, процессов деятельности организаций на базе изменений определений основополагающих терминов, таких как качество и стандарт. Модели необходимы для определения возможности управления рисками несоответствий продукции машиностроения и процессов организации для достижения приемлемых вероятностей несоответствия для обеспечения конкурентоспособной эффективности.

Ключевые слова:

нормирование и стандартизация, риски, продукция, качество, технология, проектирование, фракталы, аттракторы.

Для цитирования:

Панов, А. Н. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков / А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 35–47.

Abstract

The article deals with the problem of necessity to reconsider the processes of design, manufacture, operation, restoration and disposal of machine building products in connection with the changed paradigm – the transition from a deterministic-probabilistic design postulate to a risk-oriented one. Fundamental elements of the methodology and model for technical regulation and standardization of equipment and processes of organization activities are proposed based on changes in the definitions of fundamental terms, such as quality and standard. The models are needed for determining the possibility to manage risks of nonconformities of engineering products and organization processes in order to achieve acceptable probabilities of nonconformity for ensuring competitive efficiency.

Keywords:

technical regulation and standardization, risks, products, quality, technology, design, fractals, attractors.

For citation:

Panov, A. N. Fractals and attractors of rationing and standardization of equipment and processes of organizations. Effective planetary development of mechanical engineering in the risk paradigm / A. N. Panov, Z. A. Mrochek, V. M. Pashkevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 35–47.

Введение

Планетарные проблемы, такие как сокращение ресурсов, международные конфликты, мировое разделение труда, экологические деградации, а также глобальная конкуренция, создают угрозы для социально-экономического развития стран и союзов. Для снижения рисков, например, в Российской Федерации приняты федеральные законы и соответствующие указы [1–3], направленные на повышение эффективности государственной макроэкономической политики путем развития системы стратегического планирования, внедрения риск-ориентированного подхода с учетом потенциальных внешних и внутренних угроз экономической безопасности РФ. Научное обоснование реализации риск-ориентированного подхода, в том числе для различных отраслей экономики, с учетом моделей технического нормирования и стандартизации, представлено в фундаментальном многотомном издании «Безопасность России» [4–6] и требует дальнейшего развития.

Стратегии развития нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций и отраслей экономики

Функционирование отраслей экономики стран, как и международное экономическое сотрудничество, невозможно без адекватного технического нормирования и стандартизации [7–9]. Анализ действующих стратегий развития стандартизации [10–14], начиная с международных организаций, таких как ISO, МГС, и заканчивая странами, свидетельствует о том, что в основном стратегии направлены на обеспечение важных, но второстепенных функций,

таких как «сокращение технических барьеров», «цифровизация», «синхронизация», «содействие», «обеспечение», а также на совершенствование собственных процессов (например, «инфраструктура качества»). На практике, при явно заметном прогрессе в отдельных областях, имеется значительное количество свидетельств о недостижении ожиданий потребителей, таких как, например, соответствие качества продукции, достоверность аккредитации лабораторий и органов по сертификации продукции, систем менеджмента качества, а также самих процессов сертификации. Устойчивого бренда, например «Российское качество», даже не заявлено.

Анализ деятельности международных организаций по стандартизации свидетельствует об их недостаточной результативности и необходимости совершенствования их процессов. Например, основополагающий стандарт по менеджменту качества ISO 9001–2015 изначально устарел из-за методологических ошибок уже при его создании [16–18]. В 2020 г. подведенные итоги голосования стран по пересмотру данного стандарта показали, что с небольшим перевесом победила позиция «ничего неделания», что его не следует пересматривать. При этом отметим, что в процессе голосования страны-участники, как экономически незначимые, так и мировые лидеры, имеют по одному голосу. Методологию, основанную на достижении такого неадекватного консенсуса, необходимо признать непригодной. Следует отметить, что проведенные исследования [17] показали наличие сильной корреляции между ростом ВВП страны на душу населения и количеством организаций страны, использующих стандарты по менеджменту качества. Следовательно, такой тип

совершенствования деятельности организаций является результативным для обеспечения конкурентоспособности страны. Традиционное заявление о выполнении «высоких стандартов качества» – своеобразная лакмусовая бумага, свидетельствующая о выполнении либо неучастии в деятельности по совершенствованию. Отметим, что роль нормирования и стандартизации как инструмента обеспечения минимальных требований, по меньшей мере, не только недооценена, но и может являться движущей силой экономического развития. Это возможно за счет обеспечения высокого научно-технического уровня, необходимого для функционирования на рынке, и эффективности на основе применения оптимальных организационно-технических решений.

Размещение какой-либо значимой информации в нормы, стандарты, во-первых, свидетельствует, что достигнута наивысшая степень проверки на практике и признания знаний и данных соответствующими истине. Как критерий развития научного обеспечения отрасли страны предлагается использовать показатель – интенсивность участия организаций, отраслей экономики этой страны в разработке норм и стандартов. Во-вторых, нормы могут оказаться прокрустовым ложем и препятствием экономическому развитию отрасли. В-третьих, неадекватные нормы и стандарты могут быть первопричиной техногенных, природных и социальных ущербов. Традиционное достижение оптимального соотношения «качество – цена» широко используется в повседневной жизни, но не демонстрируется явно как критерий при разработке стандартов. Следует признать, что наличие нормирования и стандартизации является критерием фактического существования экономики в стране, влияет на ее скорость развития, а также стратегические перспективы отрасли.

Необходимо отметить, что существующие фундаментальные основы

нормирования и стандартизации продукции базируются на детерминированном («обеспечение 100 % качества») и статистическом («процент брака») подходах, локальном применении вероятностного подхода («гарантия»), а также на незначительном использовании (например, в системах менеджмента качества – ISO 9000, ISO 9001) мышления, основанного на рисках. Показано [4–6, 16–18], что указанные модели нормирования и стандартизации неадекватны риск-ориентированному подходу. Для реализации эффективного экономического развития стран, обеспечивающего их планетарное лидерство, существующие стратегии стандартизации и нормирования ISO, МГС, органов по стандартизации стран не соответствуют уровню, определяемому руководством стран и союзов. Следовательно, необходима разработка научно обоснованных представлений о рисках социально-экономического развития стран и союзов в связи с существующими стратегиями нормирования и стандартизации для соответствующей корректировки.

Синтез эффективного развития машиностроения на основе парадигмы рисков

Основопологающие термины «стандарт», «стандартизация» (согласно ISO/IEC Guide 2:2004 [15] (табл. 1)) определяют не ограничения, а основополагающий критерий – достижение оптимальной степени упорядоченности, т. е. минимума ресурсов для достижения цели применения норм и стандартов. Отметим, что существующее определение термина «качество» не связано с логикой определения термина «риск», хотя и имеет вероятностную степень соответствия.

Используемые, согласно законодательству и стандартам РФ, определения (см. табл. 1) указанных терминов не содержат вышеобозначенного оптимизационного критерия. К тому же и не

содержат идеи риск-ориентированного мышления, хотя любая деятельность сопровождается созданием несоответствий (побочные продукты жизнедеятельности, отходы, загрязнения и т. п.) для объектов как живой природы, так и

человеческого общества. В результате проведенных исследований сформулированы предложения по развитию, например, риск-ориентированного проектирования [16–20].

Табл. 1. Термины и определения

Определение термина	Источник
Стандарт – документ, принятый на основе консенсуса и одобренный признанным органом, который обеспечивает для общего и многократного использования правила, руководства или характеристики деятельности или ее результатов, направленные на достижение оптимальной степени упорядоченности в данном контексте	Iso/iec guide 2:2004 [12]
Стандартизация – деятельность по установлению условий для общего и многократного использования в отношении существующих или потенциальных проблем, направленная на достижение оптимальной степени упорядоченности в данном контексте	Iso/iec guide 2:2004 [12]
Документ по стандартизации – документ, в котором для добровольного и многократного применения устанавливаются общие характеристики объекта стандартизации, а также правила и общие принципы в отношении объекта стандартизации	ФЗ РФ [5]
Стандартизация – деятельность по разработке (ведению), утверждению, изменению (актуализации), отмене, опубликованию и применению документов по стандартизации и иная деятельность, направленная на достижение упорядоченности в отношении объектов стандартизации	ФЗ РФ [5]
Риск – воздействие неопределенности	ISO 9000
Качество – степень соответствия набора присущих характеристик объекта требованиям	ISO 9000
Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования ...	ГОСТ 27.002–89

Предлагается фундаментальное изменение определений терминов, позволяющее эффективным образом обеспечивать достижение целей в риск-ориентированной фрактально-аттракторной парадигме: «**Стандарт** – документ, обеспечивающий оптимальным образом упорядоченную, повторяющуюся деятельность и ее результативность **при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами**»; «**Стандартизация** – деятельность, направленная на оптимальную упорядоченность процессов и их результатов **при достижении приемлемых рисков заинтересованными сто-**

ронами»; «**Качество** – степень соответствия набора присущих характеристик объекта установленным требованиям, **достигнутая при приемлемом риске для заинтересованных сторон в жизненном цикле объекта**»; «**Надежность** – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования, **при приемлемом риске для заинтересованных сторон в жизненном цикле объекта**».

Часто используемый аргумент о необходимости минимизировать риски считаем неадекватным с точки зрения ни математического обоснования, ни экономической целесообразности. На рис. 1 проиллюстрирована логика достижения приемлемых рисков для любых случайных процессов, а также показано, что несоответствующая информация является коренной причиной техногенных, природных и, соответственно, социальных ущербов. Следовательно, нормы и стандарты, как наиболее широко применяемый на практике вид информации, являются признаками недостижения целей как организациями, так и странами. Таким образом, анализ рисков необходимо направлять на получение пригодной информации для предупреждения и парирования уязвимости продукции, процессов, социотехнических систем, а также проектов и организаций. При возникновении угроз для достижения приемлемых ущербов следует осуществлять управление рисками на основе моделирования сценариев событий, вариаций и бифуркаций в процессах применения продукции и реализации проектов (рис. 2). Необходимо отметить, что основной причиной использования человечеством риск-ориентированного подхода является глобальное сокращение ресурсов, рост числа техногенных и экологических катастроф и т. д., которые усиливают скорость деградации экологической системы планеты [4, 5]. Возникло понимание, что условия существования, развития и даже прогресса во взаимосвязи с природной средой возможны при управлении рисками (нестабильности, наличие вариаций и бифуркаций в процессах и др.). В указанных условиях для достижения целей заинтересованных сторон с приемлемой вероятностью и с приемлемыми ущербами [4, 5] управление деятельностью возможно, если, во-первых, анализировать риски вероятных событий, вариаций и бифуркаций в процессах различного уровня, а во-вто-

рых, учитывать редкие гипотетические сценарии (см. рис. 2). Следует отметить, что все вышеобозначенное необходимо рассматривать и как взаимодействие сложных массивов взаимодействующих факторов, обладающих характеристиками с существенной нелинейностью [4, 5].

В истории развития теории и практики машиностроения можно выделить глобальные парадигмы, которые используются для достижения соответствия требованиям продукции, например, машиностроения. Из наиболее значимых основ следует выделить четыре блока:

1) в основе **инженерного мышления** – детерминированный, статистический и вероятностный подходы и использование в конструкторско-технологической документации соответствующей подходам информации;

2) используемые методы **анализа причин отказов** техники и технологий основаны на иерархической декомпозиции при проведении расчетов, испытаний машин и процессов их изготовления от целого – машины до уровня компонентов (например, деталей машин);

3) применяемые **методы анализа достижения** получаемых характеристик техники в процессах ее тиражирования основаны на детерминированном, статистическом и вероятностном подходах (например, процент брака);

4) на практике используются детерминированные и вероятностные **критерии достижения соответствия качества продукции в ее жизненном цикле** – для обеспечения надежности, такие как «запасы прочности», «достигнутая надежность» и т. п.

В настоящее время для результативного применения риск-ориентированного подхода, в первую очередь в машиностроении, предложена [19–22] пятикомпонентная модель «вероятность – ущерб», «качество – цена», «вариация – ущерб» (рис. 3). На этой основе предлагается системно развить все четыре упомянутых блока.

Первый блок – путем введения в конструкторско-технологическую документацию идентификаторов рисков – значимости (приоритетности) характеристик для заинтересованных сторон (рис. 4) [16–22].

Второй блок – путем обязательного при проектировании проведения

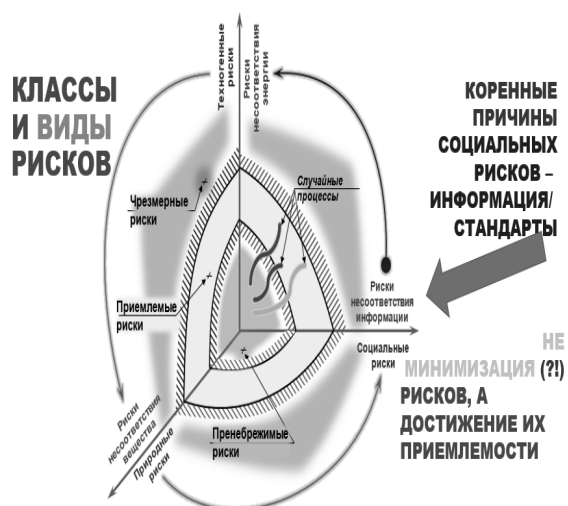


Рис. 1. Классификация и виды рисков, коренные причины

анализа корневой причины отказов (с учетом приоритетности) до уровня декомпозиции первопричины, определенной актуальным, на момент проектирования, знанием науки, техники и технологий.

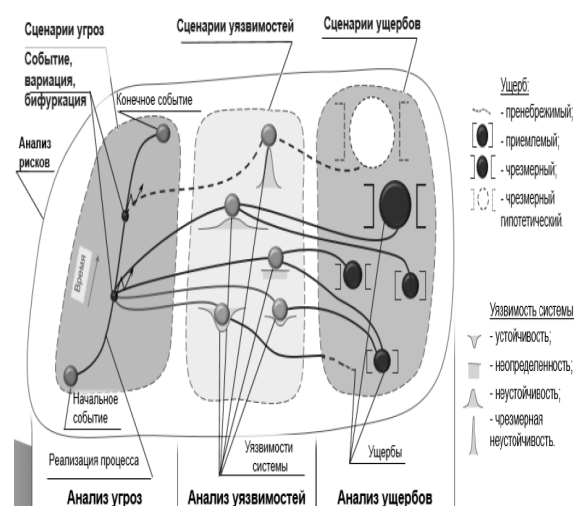


Рис. 2. Модель анализа рисков продукции, процессов и проектов

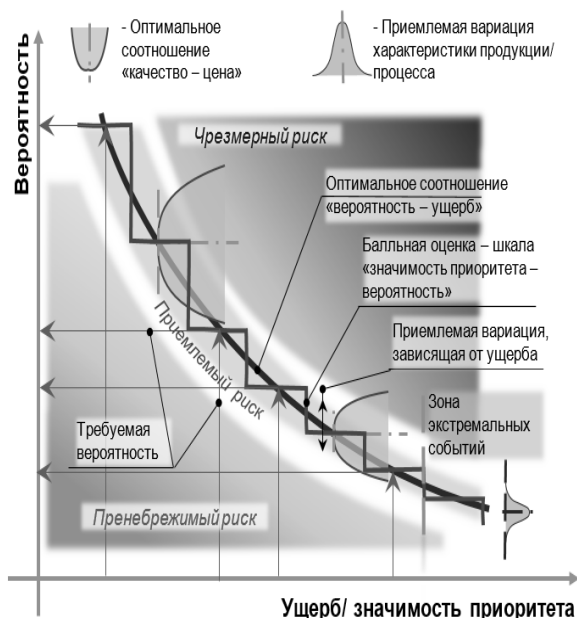


Рис. 3. Фундаментальная пятикомпонентная модель оптимизации рисков

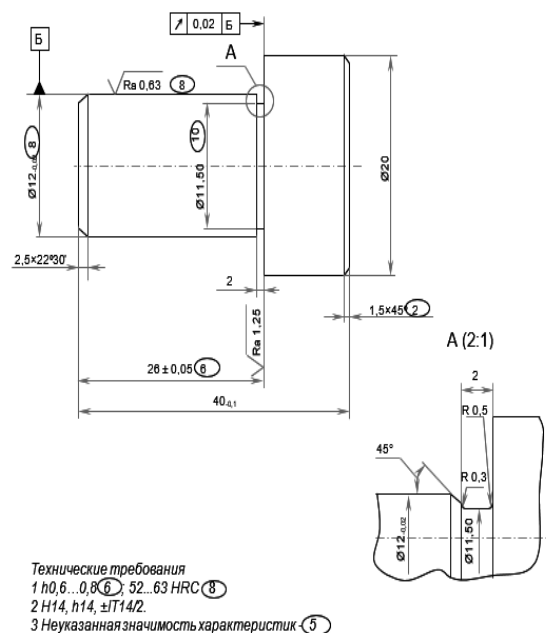


Рис. 4. Пример идентификации приоритетности характеристик в документации

Третий блок – введением риск-ориентированного подхода и осуществлением анализа процессов жизненного цикла машины при проектировании по сценариям угроз (события, вариации, бифуркации) для идентификации уязвимости и возможных ущербов для заинтересованных сторон. Четвертый блок – установлением критерия качества:

- обеспечение не просто соответствия показателя типа продукции техническому заданию, а оценивание величины соотношения «ущерб – вероятность» недостижения соответствия типа продукции требованиям заинтересованных сторон;

- достижение при тиражировании/восстановлении процессов утилизации техники не статистики попадания характеристики в поле допуска, а «достижение приемлемого риска» анализируемого типа процесса.

Предлагается (см. рис. 3) пятикомпонентная гиперболическая модель, которая определяет требования о достижении чрезмерных ущербов с малой вероятностью и возможности малых ущербов с большой вероятностью для продукции из-за несоответствий их номинальных величин требованиям. Вариация при тиражировании продукции также определяется величиной потенциального ущерба и снижается в связи с ростом приоритета характеристики для заинтересованных сторон. Оптимальное соотношение «цена – качество» при тиражировании определяется переменной величиной параболы, что позволяет не увеличивать и не снижать величину вероятности достижения соответствия продукции.

На практике обратная аппроксимация гиперболы (см. рис. 3) ступенчатой функцией позволяет оптимальным образом использовать идентификацию приоритетов в технической документации. Для эффективного достижения соответствия при риск-ориентированном подходе предложена [16–18] трехком-

понентная модель оптимальных затрат при проектировании, что и обеспечивает приемлемые риски при создании продукции [16]. Символ балла приоритета (например, 8) в графическом овале (см. рис. 4) позволяет при проектировании в конструкторско-технологической документации взаимосвязано идентифицировать и достигать приемлемости рисков на всех этапах жизненного цикла продукции [16–22] (например, первопричина приведет к полному отказу выполнения процессов машиной и соответствующему интегральному ущербу). Введение в конструкторско-технологическую и в связанную с ней документацию идентификаторов значимости (приоритетности) характеристик для заинтересованных сторон (см. рис. 4) фактически является фундаментальным решением – базисом при создании объектов второй (рукотворной) природы для практического, а не формального применения в культуре человечества управления рисками на основе знаний. Значимость/приоритетность основана на научно-техническом обосновании влияния на заинтересованные стороны вероятности и величины ущерба в процессах деятельности человечества. Обозначение на чертеже соответствует предложенным определениям терминов «качество» и «надежность».

На основе методологии фрактальных аттракторов предлагается (рис. 5) глобальная концептуальная риск-ориентированная модель взаимосвязанного нормирования и стандартизации менеджмента рисков социотехнических систем, установления требований, выделения ресурсов «сверху вниз», верификации и валидации результатов «снизу вверх» для уровней: планетарного, стран и союзов, отраслей, организации и проектов, персонала и технических систем. Модель (см. рис. 5) взаимосвязанного нормирования и стандартизации менеджмента рисков социотехнических систем начинается от анализа угроз, уязвимости и ущербов – последствий

для человечества на планетарном уровне – первый уровень модели. Декомпозиция до уровня нормирования/стандартизации объектов второй природы позволит достигать развития экономики и социально-культурного уровня эффективным образом. Нормированию, на основе культуры, знаний и ресурсов человечества, подлежат угро-

зы на этапах развития цивилизации, уязвимости (вещество, энергия, информация) и потенциальные ущербы (техногенный, природный и социальный). Для уровня цивилизации предлагается управление осуществлять, например, Организации Объединенных Наций / Лиге Наций.

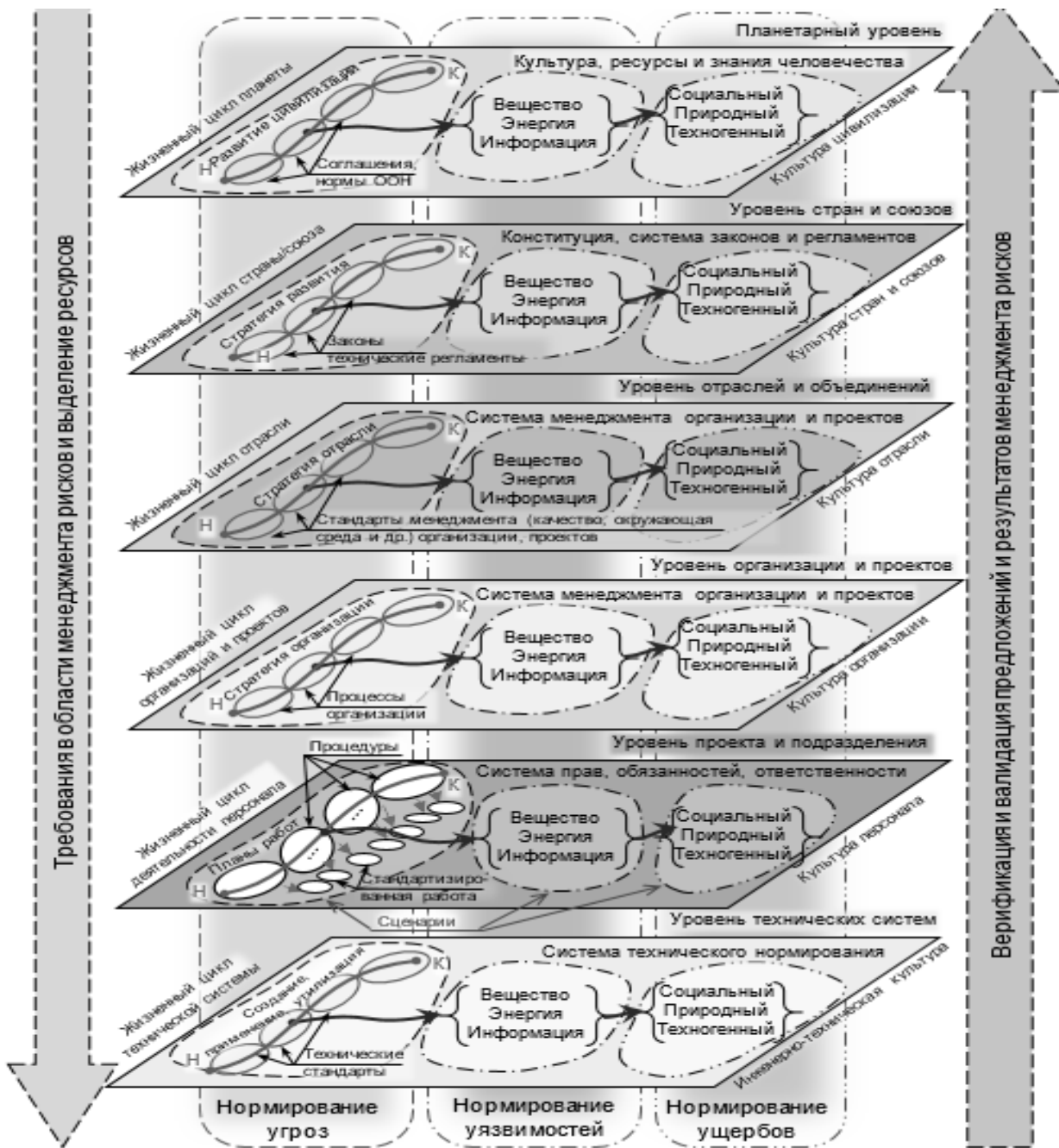


Рис. 5. Модель взаимосвязанного нормирования менеджмента рисков социотехнических систем, выделения ресурсов, верификации и валидации результатов

Ответственность за управление на втором уровне нормирования и стандартизации предлагается устанавливать для международных организаций, стран и союзов, что определяет снижение уязвимости систем, процессов и продукции на региональном уровне. Нормирование угроз, уязвимостей и ущербов для стран и союзов соответствующим образом устанавливает требования для третьего уровня нормирования – для отраслей экономики деятельности страны в соответствующих законодательных нормах (в настоящее время в РФ, ЕАЭС и др. такие нормы называют техническими регламентами).

Четвертый уровень в предложенной модели определяет требования к стандартам на системы менеджмента организаций (качества, экологии и т. д.) и проектов, в том числе отдельных аспектов (например, качества в проектах). Пятый уровень устанавливает нормы по управлению наибольшим вкладом в риски организации и проектов – персон

налом, т. е. человеческим фактором (см. ISO 9000). Для этого необходимо разрабатывать процедуры для процессов деятельности организации, инструкции персоналу при обеспечении их адекватности вероятности и значимости ущербов для организации, проектов. Шестой уровень – уровень нормирования и стандартизации на продукцию и процессы (ГОСТы и т. п.). На новой парадигме стандарты предназначены для установления значимости приоритетов характеристик создаваемой продукции и процессов (см. рис. 3 и 4), вероятности их обеспечения, а также интегральных ущербов из-за последствий несоответствий.

Предложено повысить результативность системы анализа и управления рисками путем совершенствования системы мотивирования заинтересованных как юридических, так и физических сторон – стран, отраслей, организаций, проектов, создателей и потребителей (рис. 6).

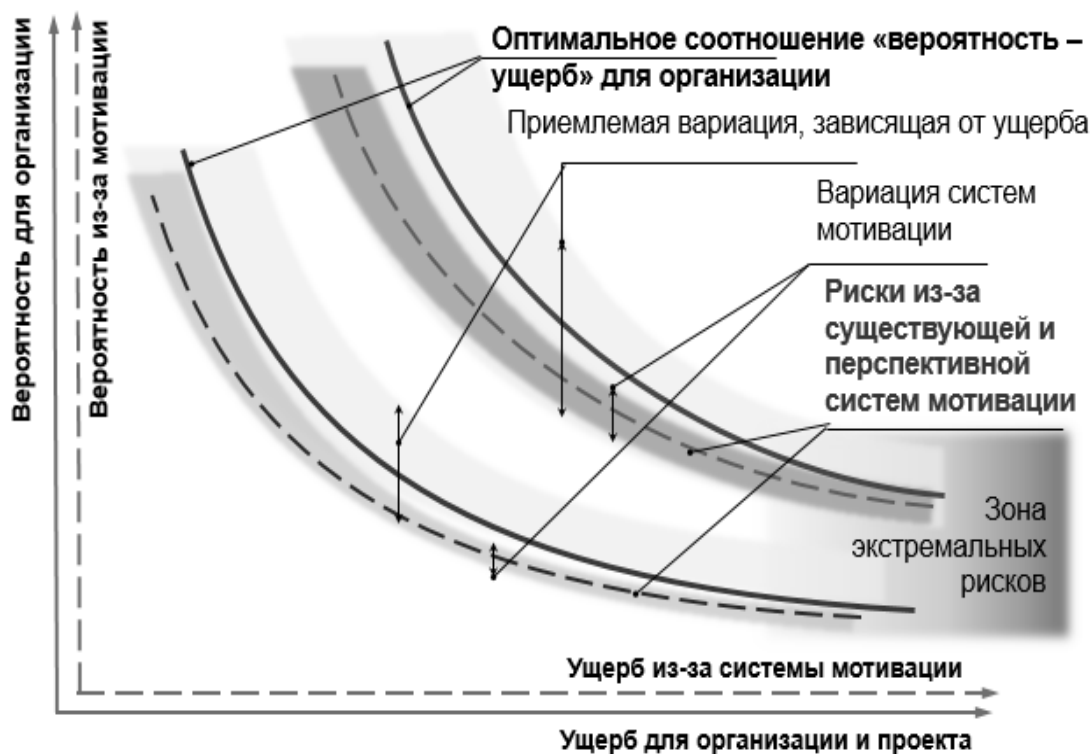


Рис. 6. Модель управления рисками систем мотивирования для достижения работоспособности систем нормирования/стандартизации

Предложена модель «вероятность – ущерб», соответствующая вероятности и значимости компенсации созданного интегрального ущерба, а также вариации мотивации в зависимости от конкретной ситуации. Следует проводить анализ рисков адекватности системы мотивации ожиданиям заинтересованных сторон, что позволит обеспечить ее пригодность (см. рис. 6). Очевидно, что любые изменения, в том числе такие, как изменение постулатов мышления, требуют адаптации культуры организации (табл. 2) как основы производительной силы экономики. Развита

предложенные [23] модели:

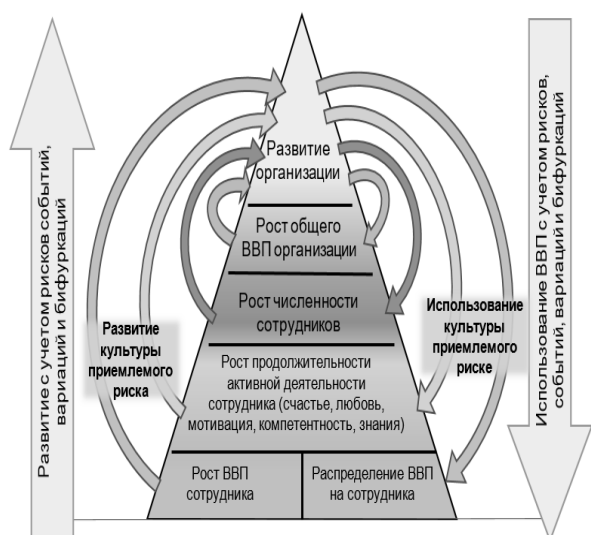
а) стратегических приоритетов устойчивого социально-экономического развития организации на основе риск-ориентированной проектно-процессной культуры менеджмента (рис. 7);

б) обеспечения безопасности существования организации на основе риск-ориентированной проектно-процессной культуры менеджмента (рис. 8).

Использование данных моделей позволяет обеспечить результативное и эффективное функционирование, развитие и безопасность для существования организации.

Табл. 2. Термины и определения

Определение термина	Источник
Культура организации (organization culture) – исторически определенный уровень развития организации, ее творческих сил и способностей, выраженный в типах и формах ее процессов жизни и деятельности, а также создаваемых ею материальных и духовных ценностях	Собственная разработка
Мотив (motive) – противоречие/различие/причина/повод/потребность между существующим психофизиологическим состоянием, экономическим и/или социальным положением и желаемым и/или вынужденным (для снижения опасности) состоянием, побуждающее к действиям социум (биологический объект/человек, группа людей, организация и др.) и основанное на законах природы, общества, представляющими для него ценность исходя из присущей ему культуры в данный момент времени	Собственная разработка



ВВП – валовой внутренний продукт

Рис. 7. Модель устойчивого социально-экономического развития организации



Рис. 8. Модель обеспечения безопасности организации

Выводы

Показано, что дальнейшее планетарное развитие, в том числе отдельных стран, результативно и эффективно может быть только в зоне приемлемого риска, поскольку на практике уже невозможно существование человечества с использованием парадигмы абсолютных безопасности, качества и надежности. Следует отметить, что, например, федеральные законы и указы главы РФ предусматривают достижение целей социально-экономического развития страны на основе научно обоснованных методологии и методов применения риск-ориентированного подхода как для стратегического планирования, так и прогнозирования. Сделан вывод, что действующие стратегии и широкая практика технического нормирования и стандартизации как международных организаций, так и союзов, стран СНГ неадекватны не только для парирования существующих планетарных экономических, политических угроз, но и успешного экономического развития.

Предложены методологические и практические решения выявленных несоответствий. Во-первых, концептуальные изменения определений терминов «стандарт», «стандартизация», «качество», «надежность» как парадигмы-фракталы и аттракторы для всех уровней применения, начиная от международного. Указанное создает фрактально-аттракторную основу для широкого внедрения риск-ориентированного проектно-процессного подхода, устраняет имеющиеся противоречия для повышения результативности, эффективности деятельности. Во-вторых, показано, что первоисточником как техногенных, природных, так и социальных рисков является несоответствующая информация, а также нормы и стандарты как фундаментальная основа для применения достоверных знаний в широкой практике. В-третьих, предложено управление рисками осуществлять на основе

анализа сценариев: угроз среды; уязвимости объектов (продукции, процессов, проектов и организаций, территории и т. д.); ущербов для заинтересованных сторон. Наиболее значимым для дальнейшего принятия решений является управление по приоритетным ущербам путем снижения уязвимости объектов второй природы. В-четвертых, разработаны: пятикомпонентная модель оптимизации рисков, определяющая стратегии приемлемости рисков для продукции, процессов, метрологического обеспечения и др.; модель оптимальных затрат на достижение приемлемых рисков при создании продукции. В-пятых, предложено ввести в документацию третью риск-ориентированную характеристику продукции в дополнение к номинальной величине, допуску – значимость приоритета. Указанное позволяет управлять последствиями несоответствия продукции, проектов и организации в целом. В-шестых, на основе методологии фракталов и аттракторов предложена глобальная концептуальная риск-ориентированная модель взаимосвязанного нормирования и стандартизации менеджмента рисков социотехнических систем, установления требований для уровней: планетарного, стран и союзов, отраслей, организации и проектов, персонала и технических систем. Модель может быть положена в основу разработки стратегий нормирования и стандартизации международных организаций, стран, союзов и отраслей. В-седьмых, предложена модель управления рисками мотивирования достижения целей нормирования/стандартизации для заинтересованных сторон. В-восьмых, поскольку изменение практики возможно при изменении культуры организации, разработаны модели культуры использования менеджмента рисков как для социально-экономического развития, так и обеспечения безопасности функционирования организации. В-девятых, разработанные методология, модели риск-ориентиро-

ванного подхода апробированы в широкой практике, в том числе при разработке межгосударственных, государственных стандартов, а также стандар-

тов организаций и методик проектирования и производства в цепях поставок [4, 5, 17, 18].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О безопасности: Федеральный закон от 28 дек. 2010 г. № 390-ФЗ.
2. О стратегическом планировании в Российской Федерации: Федер. Закон, 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ.
3. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ, 2 июля 2021 г. № 400.
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности / Н. А. Махутов [и др.]; под общ. ред. Н. А. Махутова. – Москва: Знание, 2015. – 936 с.: ил.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Н. А. Махутов [и др.]; под общ. ред. Н. А. Махутова. – Москва: Знание, 2018. – 1016 с.: ил.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта». Техногенная безопасность подвижного состава железнодорожного транспорта. Раздел II. Науч. рук. издания чл.-корр. РАН Н. А. Махутов / Н. А. Махутов [и др.]. – Москва: Знание, 2020. – 488 с.
7. О техническом регулировании: Федер. Закон, 27 дек. 2002 г. № 184-ФЗ.
8. О стандартизации в Российской Федерации: Федер. Закон, 29.06.2015 г. № 162-ФЗ: в ред. от 30.12.2020 г.
9. О техническом нормировании и стандартизации: Закон Респ. Беларусь: в ред. от 24.10.2016 г.
10. Стратегия развития ISO до 2030 г.
11. Стратегия развития Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации на период до 2030 года.
12. Об утверждении программы национальной стандартизации на 2022 г.: приказ Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии, 1 нояб. 2021 г. № 2459.
13. Стратегия развития стандартизации Республики Беларусь на период до 2030 г. от 16.09.2019 г.
14. Стратегические направления развития евразийской экономической интеграции до 2025 г. от 11.12.2020 г.
15. **ISO/IEC GUIDE 2:2004.** Стандартизация и смежные виды деятельности. Общий словарь.
16. **Панов, А. Н.** Как победить в конкурентной борьбе. Гармоничная система качества – основа эффективного менеджмента организации / А. Н. Панов. – Москва: Стандарты и качество, 2003. – 272 с.
17. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / А. Н. Панов [и др.]; под общ. ред. А. Н. Панава. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.: ил.
18. **Горбачевич, М. И.** Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / М. И. Горбачевич, А. Н. Панов, С. М. Минюкович; под общ. ред. А. Н. Панава. – Минск: Технопринт, 2005. – 264 с.: ил.
19. **Панов, А. Н.** Перспективное планирование качества продукции – основа для проектирования технологических процессов при риск-ориентированном подходе / А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 1 (70). – С. 31–50.
20. **Панов, А. Н.** Анализ рисков несоответствий продукции машиностроения и технологических процессов ее изготовления при проектировании / А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 3 (72). – С. 46–58.
21. **Панов, А. Н.** Методология и модели риск-ориентированного проектирования, производства, эксплуатации, обслуживания и утилизации – новая фундаментальная система обеспечения конкурентоспособности машиностроения / А. Н. Панов, Ж. А. Мрочек, В. М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 49–63.
22. Технологическое обеспечение машиностроительного производства: учебное пособие / В. А. Логвин [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск: РИВШ, 2021. – 560 с.: ил.

23. **Махутов, Н. А.** Научные основы анализа стратегических приоритетов и рисков развития России: информационно-аналитическая справка по проблемам стратегического прогнозирования, планирования и программирования в целях устойчивого социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности / Н. А. Махутов. – Москва: Знание, 2018. – 95 с.

Статья сдана в редакцию 24 сентября 2022 года

Александр Николаевич Панов, канд. техн. наук, ООО «Юрс-Русь». E-mail: a.panov@tut.by.

Жорж Адамович Мрочек, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: Vikt@bntu.by.

Виктор Михайлович Пашкевич, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: pvm@bk.ru.

Aleksandr Nikolayevich Panov, PhD (Engineering), URS-Russia, LLC. E-mail: a.panov@tut.by.

Zhorzh Adamovich Mrochek, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: Vikt@bntu.by.

Viktor Mikhailovich Pashkevich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: pvm@bk.ru.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_48

УДК 621.787

В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ

V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, S. A. Sukhotsky

OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR THE PROCESS OF COMBINED MAGNETODYNAMIC ROLLING

Аннотация

Представлены результаты оптимизации параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитных деталей. Получены оптимальные значения режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания: частоты вращения комбинированного инструмента и индукции вращающегося магнитного поля, действующей на поверхностный слой ферромагнитной детали. Определен оптимальный диаметр деформирующих шаров комбинированного инструмента, предназначенного для совмещенной отделочно-упрочняющей обработки внутренней цилиндрической поверхности стальных деталей.

Ключевые слова:

оптимизация параметров, отделочно-упрочняющая обработка, деформирующий шар, комбинированный инструмент, вращающиеся магнитные поля, ферромагнитная деталь.

Для цитирования:

Шелег, В. К. Оптимизация параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 48–56.

Abstract

The paper presents results of optimizing the parameters for the process of combined magnetodynamic rolling of an inner cylindrical surface of ferromagnetic parts. The optimal values for modes of the process of combined magnetodynamic rolling were obtained — the rotational speed of a combined tool and the induction of a rotating magnetic field, which acts on the surface layer of a ferromagnetic part. The optimal diameter for deforming balls of the combined tool designed for combined finishing and hardening treatment of inner cylindrical surfaces of steel parts was determined.

Keywords:

parameter optimization, finishing and hardening treatment, deforming ball, combined tool, rotating magnetic fields, ferromagnetic part.

For citation:

Sheleg, V. K. Optimization of parameters for the process of combined magnetodynamic rolling / V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, S. A. Sukhotsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 48–56.

Введение

Большинство выходов из строя современных машин и механизмов связа-

но с износом поверхностей входящих в них ответственных деталей. Это делает актуальной задачу разработки и применения новых эффективных технологий

поверхностного упрочнения деталей машин. Особая роль отводится созданию инновационных методов поверхностного пластического деформирования, обеспечивающих комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой ферромагнитных деталей [1]. В Белорусско-Российском университете разработан метод совмещенной отделочно-упрочняющей обработки поверхностей (внутренних, наружных и плоских) ферромагнитных деталей концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и динамическим поверхностным пластическим деформированием (далее – метод совмещенного магнитно-динамического накатывания) [2, 3]. Согласно методу на упрочняемую поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем с индукцией $0,10 \dots 1,20$ Тл и колеблющимися деформирующими шарами (получающими энергию от периодически действующего магнитного поля), осуществляющими импульсно-ударное деформирование [4–6].

Комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхностный слой ферромагнитной детали позволяет существенно повысить качественные характеристики и эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей [7–9].

Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по назначению режимов процесса совмещенной отделочно-упрочняющей обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. В связи с этим при назначении режимов процесса совмещенной обработки требуется проведение большого объема экспериментальных исследований, дающих возможность установить влияние параметров процесса на качественные характеристики упрочненной поверхности. Это не позволяет устанавливать оптимальные параметры процесса совмещенного упрочнения и сдерживает его внедрение в производство.

Постановка задачи

Учитывая сложившиеся обстоятельства, актуальным является проведение оптимизации параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания внутренних цилиндрических поверхностей ферромагнитных деталей.

Основная часть

При проведении оптимизации совмещенную отделочно-упрочняющую обработку внутренней цилиндрической поверхности колец вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием осуществляли на вертикальном консольно-фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400CNC с применением комбинированного инструмента [6]. В качестве обрабатываемых деталей использовали кольца из стали 45 ($30 \dots 35$ HRC) с размерами ($D \times d \times l$) $125 \times 110 \times 12$ мм. Поверхность отверстия колец предварительно получали растачиванием с обеспечением шероховатости по параметру Ra $3,2 \dots 3,0$ мкм.

Параметры комбинированного инструмента: диаметр $d_{ш}$ деформирующих шаров – 7, 9, 12, 15, 17 мм; материал деформирующих шаров – ШХ15 ($60 \dots 62$ HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов – NdFeB; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары, – 22 шт.; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых колец, – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст3. В качестве СОЖ использовали масло промышленное 45. Упрочнение внутренней поверхности колец осуществляли на режимах, указанных в табл. 1.

Как показали результаты исследований шероховатости поверхности [10], основными параметрами процесса СМДН, оказывающими наибольшее

влияние на шероховатость обработанной поверхности ферромагнитных деталей, являются частота вращения комбинированного инструмента n , мин^{-1} , диа-

метр деформирующих шаров $d_{ш}$, мм, и величина магнитной индукции B , мТл, действующего на поверхность вращающегося магнитного поля.

Табл. 1. Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Фактор	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Натуральный уровень фактора, соответствующий кодированному				
			-1,682	-1	0	+1	+1,682
n – частота вращения, мин^{-1}	x_1	400	3330	3600	4000	4400	4670
$d_{ш}$ – диаметр деформирующих шаров комбинированного инструмента, мм	x_2	3	7	9	12	15	17
B – индукция вращающегося магнита, мТл	x_3	50	46	80	130	180	214

Зависимость шероховатости поверхности деталей $Ra = f(n, d_{ш}, B)$ от основных факторов процесса СМДН аппроксимируем полиномом второй степени.

Так как в процессе проведения эксперимента неизвестно, что ведет к нахождению области оптимума зависимости шероховатости $Ra = f(n, d_{ш}, B)$ – увеличение или уменьшение анализируемого фактора, то целесообразно использовать центральный композиционный план, отвечающий требованию ротатбельности. Такой план позволит получить математическую модель, способную предсказать значение параметра оптимизации с одинаковой точностью независимо от направления изменения фактора. Эксперимент проводили по программе центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка [11, 12].

Центральный композиционный план второго порядка для трех факторов состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^3 (опыты с 1 по 8), шести опытов в «звездных точках» (опыты с 9 по 14) и шести опытов в центре плана (опыты с 15 по 20) [11, 12].

По результатам опытов, выполненных в соответствии с принятым пла-

ном эксперимента, оцениваем коэффициенты уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (1)$$

где y – математическое ожидание искомой величины (Ra); $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – теоретические коэффициенты уравнения регрессии; x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов ($n, d_{ш}, B$).

Принятые при исследовании уровни и интервалы варьирования факторов процесса СМДН указаны в табл. 1.

Эксперимент по исследованию изменения шероховатости внутренней цилиндрической поверхности колец осуществляли в соответствии с матрицей планирования, представленной в табл. 2. В качестве результатов опытов в таблицу заносились средние арифметические значения пяти измерений шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra .

Табл. 2. План и результаты эксперимента по исследованию изменения шероховатости поверхности упрочненных деталей из стали 45 (30...35 HRC)

Опыт	Фактор в кодированных обозначениях			Фактор в натуральном выражении			Примечание	Ra, мкм
	x_1	x_2	x_3	$n, \text{мин}^{-1}$	$d_{ш}, \text{мм}$	$B, \text{мТл}$		
1	+	+	+	4400	15	180	Ядро плана эксперимента	1,94
2	+	+	-	4400	15	80		0,74
3	+	-	+	4400	9	180		1,61
4	+	-	-	4400	9	80		0,69
5	-	+	+	3600	15	180		2,1
6	-	+	-	3600	15	80		0,8
7	-	-	+	3600	9	180		1,72
8	-	-	-	3600	9	80		0,7
9	+1,682	0	0	4670	12	130	Плечо плана эксперимента	0,78
10	-1,682	0	0	3330	12	130		0,86
11	0	+1,682	0	4000	17	130		0,96
12	0	-1,682	0	4000	7	130		0,68
13	0	0	+1,682	4000	12	214		2,71
14	0	0	-1,682	4000	12	46		1,01
15	0	0	0	4000	12	130	Центр плана эксперимента	0,54
16	0	0	0	4000	12	130		0,47
17	0	0	0	4000	12	130		0,56
18	0	0	0	4000	12	130		0,53
19	0	0	0	4000	12	130		0,47
20	0	0	0	4000	12	130		0,49

Теоретические коэффициенты уравнения регрессии $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ определяли по методике [11]. С учетом количества факторов $k = 3$ формулы имеют вид:

$$b_0 = 0,16666 \cdot \sum_{j=1}^{20} y_j - 0,05694 \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij} \cdot y_j; \quad (2)$$

$$b_i = 0,07322 \cdot \sum_{j=1}^{20} x_{ij} \cdot y_j; \quad (3)$$

$$b_{ik} = 0,125 \cdot \sum_{j=1}^{20} x_{ij} \cdot x_{kj} \cdot y_j; \quad (4)$$

$$b_{ii} = 0,06254 \cdot \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 \cdot y_j + 0,00695 \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{20} x_{ij}^2 \cdot y_j - 0,05694 \cdot \sum_{j=1}^{20} y_j. \quad (5)$$

Используя формулы (2)–(5), найдем коэффициенты уравнения регрессии и подставим их в уравнение (1). Тогда зависимость шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra в кодированном виде

$$y = 0,506 - 0,035 \cdot x_1 + 0,097 \cdot x_2 + 0,534 \cdot x_3 - 0,013 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,025 \times x_1 \cdot x_3 + 0,070 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,127 \cdot x_1^2 + 0,127 \cdot x_2^2 + 0,495 \cdot x_3^2. \quad (6)$$

Перевод натуральных значений в кодированные значения факторов осуществляем по выражениям

$$x_1 = \frac{n - n_0}{\varepsilon_1} = \frac{n - 4000}{400};$$

$$x_2 = \frac{d - d_0}{\varepsilon_2} = \frac{d - 12}{3};$$

$$x_3 = \frac{B - B_0}{\varepsilon_3} = \frac{B - 130}{50}, \quad (7)$$

где n_0 , d_0 , B_0 – основные уровни факторов в натуральных выражениях; ε_1 , ε_2 , ε_3 – интервалы варьирования факторов.

Перейдем от кодированных значений к натуральным значениям факторов и получим зависимость шероховатости обработанной внутренней цилиндрической поверхности колец по параметру Ra от режимов процесса СМДН и диаметра деформирующих шаров комбинированного инструмента

$$Ra = 16,07 - 5,97 \cdot 10^{-3} \cdot n - 0,324 \cdot d - 4,14 \cdot 10^{-2} \cdot B - 1,08 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot d - 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot B + 4,67 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot B + 0,79 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 1,41 \cdot 10^{-2} \cdot d^2 + 1,98 \cdot 10^{-4} \cdot B^2. \quad (8)$$

Проверку гипотезы адекватности математической модели проведем с помощью расчетного критерия Фишера [11]

$$F_p = \frac{S_{AD}^2}{S_y^2}, \quad (9)$$

где S_{AD}^2 – дисперсия параметра оптимизации; S_y^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

Дисперсию воспроизводимости эксперимента S_y^2 определяем по результатам опытов, проведенных в центре плана.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - y_{cp})^2}{n_0 - 1}, \quad (10)$$

где n_0 – число параллельных опытов в центре плана; y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте; y_{cp} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в n_0 опытах; u – номер параллельного опыта в центре плана.

$$S_y^2 = \frac{0,0074}{6 - 1} = 0,0015.$$

Определяем сумму S_R квадратов отклонений расчетных y_p значений функции отклика от экспериментальных y_i по формуле

$$S_R = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{pi})^2, \quad (11)$$

где y_i – экспериментальное значение параметра оптимизации в i -м опыте; y_{pi} – расчетное значение параметра оптимизации в i -м опыте.

Сумма квадратов отклонений шероховатости от среднего значения (определена расчетом) составила $S_R = 0,0398$.

Определим сумму S_E квадратов отклонений экспериментальных значений y_u функции отклика от среднего значения в центре плана:

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - y_{pu})^2 = 0,0075. \quad (12)$$

Дисперсию параметра оптимизации S_{AD}^2 рассчитываем как

$$S_{AD}^2 = \frac{S_R - S_E}{N - k' - (n_0 - 1)}, \quad (13)$$

где k' – число статистически значимых коэффициентов уравнения регрессии.

$$S_{AD}^2 = \frac{0,0398 - 0,0075}{20 - 10 - (6 - 1)} = 0,0065.$$

Определяем расчетный критерий Фишера:

$$F_p = \frac{0,0065}{0,0015} = 4,3.$$

Так как расчетный критерий Фишера меньше табличного значения ($F_T = 5,1$ [11]) при 5-процентном уровне значимости, то гипотезу адекватности модели принимаем.

Графическое изображение полученной математической модели, показывающее зависимость шероховатости (по параметру Ra) обработанной поверхности детали от двух факторов (при значении третьего, находящегося на основном уровне), представлено на рис. 1–3.

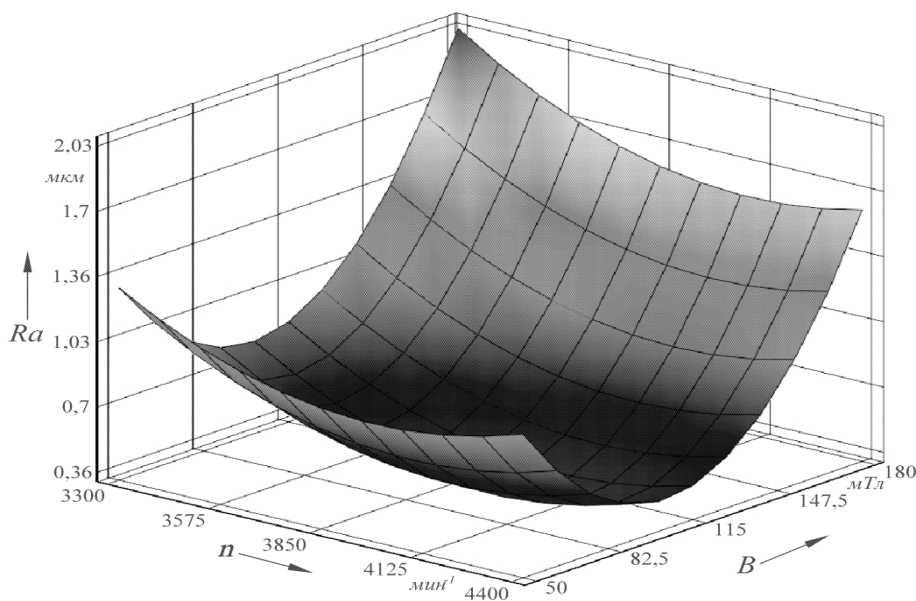


Рис. 1. Влияние индукции B вращающегося магнитного поля, частоты вращения n инструмента и диаметра d_u деформирующих шаров на шероховатость упрочненной поверхности детали из стали 45 (30...35 HRC) ($d_u = 12$ мм)

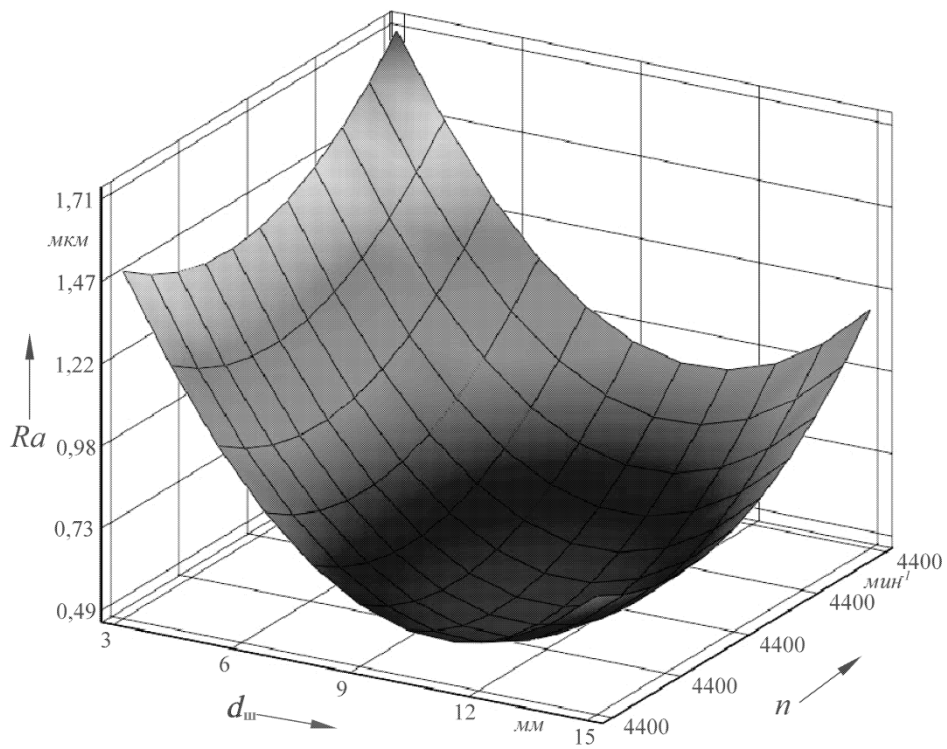


Рис 2. Влияние диаметра d_m деформирующих шаров и частоты вращения n комбинированного инструмента на шероховатость упрочненной поверхности детали из стали 45 (30...35 HRC) ($B = 130$ мТл)

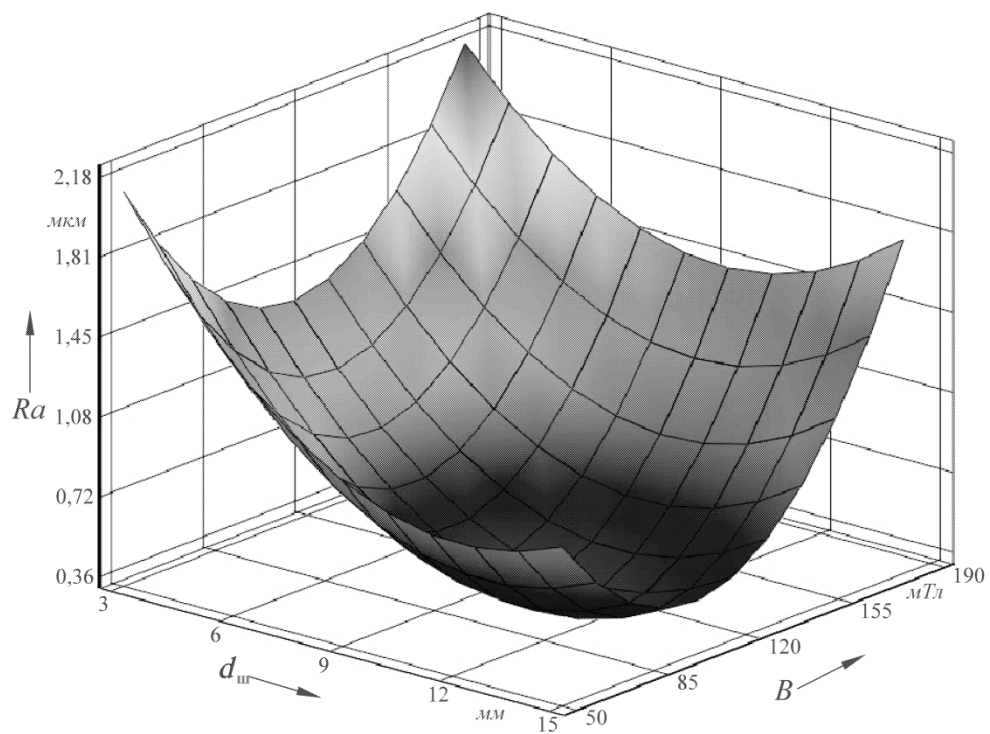


Рис 3. Влияние диаметра d_m деформирующих шаров и индукции B вращающегося магнитного поля на шероховатость упрочненной поверхности детали из стали 45 (30...35 HRC) ($n = 4000$ мин⁻¹)

Заключение

Полученные диаграммы (см. рис. 1–3) позволяют определить значения режимов процесса СМДН внутренних цилиндрических поверхностей деталей из стали 45 (30...35 HRC) и диаметр деформирующего шара для обеспечения заданной чертежом шероховатости поверхности. Анализ полученных диаграмм показывает, что оптимальными режимами процесса СМДН внутренней цилиндрической поверхности деталей из

стали 45 (30...35 HRC) являются частота вращения инструмента $n = 4050 \text{ мин}^{-1}$ ($V = 1399 \text{ м/мин}$), индукция действующего на поверхность детали вращающегося магнитного поля $B = 100...105 \text{ мТл}$, при которых обеспечивается снижение исходной шероховатости поверхности с $Ra = 3,2...3,0$ до $0,45...0,36 \text{ мкм}$. Из диаграмм видно, что наибольшее снижение шероховатости обработанной поверхности имеет место при диаметре $d_{ш}$ деформирующих шаров комбинированного инструмента, равном 11,5 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2012. – 528 с.
2. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2068770 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.11.1996.
3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2089373 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.03.1997.
4. Способ и устройство для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия в ферромагнитной детали: пат. ВУ 22193 / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, А. А. Жолобов, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий, М. В. Мовчан. – Опубл. 30.08.2020.
5. Довгалев, А. М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей: монография / А. М. Довгалев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
6. Довгалев, А. М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.
7. Шелег, В. К. Повышение эффективности процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 1–8.
8. Шелег, В. К. Исследование основных характеристик процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 3. – С. 81–89.
9. Шелег, В. К. Получение на поверхности ферромагнитных деталей антифрикционных твердосмазочных покрытий совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Актуальные вопросы машиностроения. – 2021. – Вып. 10. – С. 15–21.
10. Шелег, В. К. Влияние параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания на шероховатость поверхности / В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 1. – С. 71–80.
11. Солонин, Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения / Н. С. Солонин. – Москва: Машиностроение, 1972. – 215 с.
12. Пашкевич, В. М. Научные основы технологии машиностроения. Обработка и анализ экспериментальных данных: учебное пособие / В. М. Пашкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – 236 с.

Статья сдана в редакцию 4 ноября 2022 года

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: +375-296-98-92-64.

Александр Михайлович Довгалеv, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-45-40-56. E-mail: rct@bru.by.

Сергей Александрович Сухоцкий, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-295-43-21-50.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Tel.: +375-296-98-92-64.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian Russian University. Tel.: +375-293-45-40-56. E-mail: rct@bru.by.

Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-295-43-21-50.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_57

УДК 62-83:621

А. С. Коваль

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ЦИКЛОВОГО КПД СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ЛИФТА

A. S. Koval

ON CALCULATING CYCLE EFFICIENCY OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR OF THE ELEVATOR VARIABLE FREQUENCY DRIVE

Аннотация

На основе использования выражений для ускорения и скорости при пуске и торможении оптимальной s -тахограммы изменения скорости лифта (синусоидальный закон изменения рывка) предложена методика и приведен пример расчета циклового КПД синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ).

Ключевые слова:

синхронный двигатель с постоянными магнитами, электропривод лифта, управляемые электромагнитные переменные потери, оптимальная s -тахограмма изменения скорости лифта, цикловой КПД.

Для цитирования:

Коваль, А. С. К вопросу расчета циклового КПД синхронного двигателя с постоянными магнитами частотно-регулируемого привода лифта / А. С. Коваль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 57–65.

Abstract

A technique is proposed and an example of calculating the cycle efficiency of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is given, based on the use of expressions for acceleration and speed during start-up and braking of the optimal s -tachogram of elevator speed change (sinusoidal law of jerk change).

Keywords:

permanent magnet synchronous motor, elevator electric drive, controlled electromagnetic variable losses, optimal s -tachogram of elevator speed change, cycle efficiency.

For citation:

Koval, A. S. On calculating cycle efficiency of a permanent magnet synchronous motor of the elevator variable frequency drive / A. S. Koval // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 57–65.

Постоянно расширяется область применения пассажирских лифтов, не требующих машинного помещения для размещения силового электрооборудования. Специфика электропривода

таких лифтов – отсутствие редуктора в механической подсистеме привода лифта и использование в лифтовых лебедках высокомоментных тихоходных электродвигателей асинхронных корот-

козамкнутых (к. з.) либо синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе. Для этих двигателей отсутствуют в открытых источниках литературы полноценные технические данные, в частности, значения КПД двигателей. Необходимо отметить, что расчетные значения к КПД этих двигателей имеют низкие значения [1]. Объясняется тем, что потери в них в сравнении с двигателями аналогичных габаритов сохраняются при значительном снижении полезной мощности из-за снижения частоты вращения [1]. С учетом цикличности работы лифтов актуальна разработка аналитических способов оценки их циклового КПД. Оценка циклового КПД высокомоментных тихоходных асинхронных электродвигателей предложена в [2] для привода лифта при управлении в пускотормозных режимах с формированием рывка по оптимальному синусоидальному закону. Представляет интерес оценка циклового КПД для лифтовых синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе и сравнение этого показателя с цикловым КПД высокомоментных тихоходных асинхронных лифтовых электродвигателей.

Выражение для циклового КПД [3] при работе в двигательном режиме имеет вид:

$$N_{\text{ц}} = \frac{A_1}{A_2}, \quad (1)$$

где A_1 – электроэнергия, преобразуемая за цикл в механическую работу; A_2 – электроэнергия, потребляемая электродвигателем за цикл.

Электроэнергия, преобразуемая за цикл в механическую работу:

$$A_1 = \int_0^{t_u} |M(t) \cdot \omega(t)| dt. \quad (2)$$

Потребляемая электродвигателем за цикл энергия определяется [3]

по формуле

$$A_2 = \int_0^{t_u} |M(t)\omega(t)| dt + \int_0^{t_{nm}} \Delta P_1(t) dt + \int_0^{t_c} \Delta P_{\text{ycm}}(t) dt + \int_0^{t_u} \Delta P_{\text{mex}}(t) dt, \quad (3)$$

где $\Delta P_1(t)$ – управляемые электромагнитные потери в двигателе в пускотормозных режимах работы; $\Delta P_{\text{ycm}}(t)$ – управляемые электромагнитные потери в двигателе в установившемся режиме работы; ΔP_{mex} – механические потери электродвигателя; t_u – время работы за цикл; t_{nm} – время пускотормозных режимов за цикл; t_c – время работы в установившемся режиме за цикл; $\omega(t)$ – частота вращения вала двигателя; $M(t)$ – момент на валу двигателя.

При работе двигателя в генераторном режиме к валу подводится механическая мощность (в лифтах – энергия неуравновешенного груза в кабине лифта), вычитая из которой мощность всех потерь получаем отдаваемую мощность в сеть. Соответственно, в выражении (1) A_1 – электроэнергия, отдаваемая за цикл в сеть, а A_2 – энергия механической мощности, подводимой к валу двигателя.

Управляемые электромагнитные потери в пускотормозных режимах работы СДПМ переменного тока складываются как и у АД с к. з. ротором из потерь в сердечнике двигателя (потери на гистерезис и потери от вихревых токов) и омических потерь в обмотках статора.

При учете только потерь в сердечнике от вихревых токов, зависящих от частоты в квадратичной зависимости, управляемые электромагнитные потери могут быть определены [4] по выражению

$$\Delta P_{\text{упр.}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} \alpha^2(t) + \Delta P_{\text{пер.ном}} k^2, \quad (4)$$

где k – коэффициент загрузки, $k = \frac{I}{I_{ном}} \approx \frac{M}{M_{ном}}$; $\Delta P_{ст.ном}$ – номинальные потери в сердечнике от вихревых токов; $\Delta P_{пер.ном}$ – номинальные переменные омические потери.

Для СДПМ переменные номинальные омические потери могут быть выражены через момент двигателя в осях $d-q$ следующим образом (с учетом коэффициента $\sqrt{\frac{3}{2}}$ при переходе к естественной трехфазной системе координат и $I_{ном} = I_{1q}$):

$$\Delta P_{пер.ном.} = 3I_{ном}^2 R_1 \frac{M^2}{M_{ном}^2} = \frac{3I_{ном}^2 R_1}{\left(\sqrt{3}pI_{ном}\sqrt{\frac{3}{2}}\Psi_{ном}\right)^2} M^2 = \frac{2}{3} \frac{R_1}{p^2 \Psi_{ном}^2} M^2,$$

где $\Psi_{ном}$ – номинальный поток двигателя; p – число пар полюсов; R_1 – сопротивление статора.

Общее выражение управляемых электромагнитных потерь (1) можно переписать в виде

$$\Delta P_{упр.} = \Delta P_{ст.ном} \frac{\omega^2}{\omega_{ном}^2} + 3I_{ном}^2 R_1 \frac{M^2}{M_{ном}^2} = \Delta P_{ст.ном} \frac{\omega^2}{\omega_{ном}^2} + \frac{2R_s M^2}{3p^2 \Psi_{ном.}^2}. \quad (5)$$

Постоянные номинальные потери в стали $\Delta P_{ст.ном}$ могут быть учтены, как и в асинхронных двигателях, потерями на резисторе R_f в схеме замещения [5]. В установившемся режиме эти потери имеют вид:

$$\Delta P_{ст.ном} = \frac{U_m^2}{R_f} = \frac{\Psi_{rd}^2 \omega_{эл.ном}^2}{R_f} = \frac{3}{2} \frac{\Psi_{ном}^2 \omega_{ном}^2 p^2}{R_f}, \quad (6)$$

где U_m – напряжение на концах индуктивности намагничивания в эквивалентной схеме замещения в осях $d-q$; R_f – сопротивление, параллельно включенное к индуктивности намагничивания в схеме замещения в осях $d-q$ и учитывающее мощность потерь в сердечнике.

С учетом (6) выражение управляемых электромагнитных потерь, зависящих от скорости и момента в пуско-тормозных режимах работы, запишем следующим образом:

$$\Delta P_{упр.} = \frac{3}{2} \frac{\Psi_{ном}^2 p^2}{R_f} \omega^2 + \frac{2}{3} \frac{R_s M^2}{p^2 \Psi_{ном}^2}. \quad (7)$$

Переменные потери в обмотке статора в момент пуска с учетом коэффициента $\sqrt{\frac{3}{2}}$ при переходе к естественной трехфазной системе координат находим по выражению

$$\Delta P_0 = \frac{3}{2} R_s I_{max}^2,$$

где I_{max} – предельно допустимый ток двигателя при пуске.

Механические потери $\Delta P_{мех}(t)$ могут быть определены [4] по формуле

$$\Delta P_{мех} = \Delta P_{мех.ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2, \quad (8)$$

где $\Delta P_{мех.ном}$ – номинальные механические потери электродвигателя;

$\omega_{ном}$ – номинальное значение частоты вращения двигателя.

Общие пускотормозные потери в частотно-регулируемом СДПМ с постоянным магнитным потоком, выраженные через скорость и момент двигателя, имеют вид:

$$\Delta P_{\text{упр.ном}} = \frac{3}{2} I_{\text{max}}^2 R_s + \frac{3}{2} \left(\frac{\Psi_{\text{ном}}^2 p^2}{R_f} \omega^2 \right) + \frac{2}{3} \frac{R_s M^2}{p^2 \Psi_{\text{ном}}^2} + \Delta P_{\text{мех.ном}} \frac{\omega^2}{\omega_{\text{ном}}^2}. \quad (9)$$

Выражение для общих пускотормозных потерь в частотно-регулируемом СДПМ может быть получено и из соответствующих выражений для асинхронного двигателя. Известно [6] выражение управляемых пускотормозных потерь (потери в сердечнике от вихревых токов, зависящие от частоты в квадратичной зависимости и омические потери) для асинхронного двигателя при векторном частотном управлении при постоянном магнитном потоке и выраженное через частоту вращения и момент двигателя:

$$P_{\text{пот.ад}} = k_1 \Psi_r^2 + k_4 \frac{M}{\Psi_r^2}, \quad (10)$$

где $k_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right)$; $k_4 = \frac{2}{3 p^2} \times \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right)$; M – момент двигателя.

Все параметры в выражениях (9) и (10) соответствуют параметрам схемы замещения для асинхронного двигателя.

Выражение (10) можно записать следующим образом:

$$P_{\text{пот}} = \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2 L_{12}^2}{R_f L_r^2} \right) \Psi_r^2 + \frac{2}{3 p^2} \left(\frac{R_s L_r^2}{L_{12}^2} + R_r \right) \frac{M^2}{\Psi_r^2}. \quad (11)$$

С учетом обозначений, применяемых при использовании модели СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе в осях $d-q$, и значений соответствующих параметров схемы замещения при неучете индуктивностей рассеивания статора и ротора асинхронного двигателя ($L_r = L_1 = L_{12}$; $R_r = 0$) коэффициенты k_1 и k_4 в выражении (10) могут быть преобразованы к следующему виду:

$$k_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} + \frac{p^2 \omega^2}{R_f} \right); \quad k_4 = \frac{2 R_s}{3 p^2}.$$

Преобразуем составляющую $\frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} \right) \Psi_r^2$ в выражении (10):

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \left(\frac{R_s}{L_{12}^2} \right) \Psi_r^2 &= \frac{3}{2} \frac{R_s p^2}{L_{12}^2 p^2} \Psi_r^2 = \frac{3}{2} \frac{R_s c^2}{L_{12}^2 p^2} = \\ &= \frac{3}{2} \frac{R_s c^2 I_{\text{max}}^2}{c^2} = \frac{3}{2} R_s^2 I_{\text{max}}^2, \end{aligned}$$

где c – постоянная величина для СДПМ, связывающая электромагнитный момент с действующим значением тока статора, $c = \frac{M}{I_1}$ [7].

С учетом этих коэффициентов и выражения для механических потерь (8) выражение управляемых потерь в пускотормозных режимах в частотно-регулируемом СДПМ имеет вид, аналогичный (9):

$$P_{pot} = \frac{3}{2} R_s I_{max}^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{p^2 \omega^2}{R_f} \right) \Psi_r^2 + \frac{2}{3} \frac{R_s}{p^2 \Psi_r^2} M^2 + \Delta P_{мех.ном} \frac{\omega^2}{\omega_{ном}^2},$$

где M – момент двигателя, $M = M_s \pm \frac{Jd\omega}{dt}$; M_s – статический момент нагрузки; J – приведенный к валу двигателя момент инерции привода.

Таким образом, с учетом знака в выражении для момента двигателя – двигательный режим (+), генераторный режим (–) – управляемые потери в пускотормозных режимах в функции скорости и момента для СДПМ могут быть записаны как

$$P_{pot} = \frac{3}{2} R_s I_{max}^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{p^2 \omega^2}{R_f} \right) \Psi_r^2 + \frac{2}{3} \frac{R_s}{p^2 \Psi_r^2} \times \left(M_s \pm \frac{Jd\omega}{dt} \right)^2 + \Delta P_{мех.ном} \frac{\omega^2}{\omega_{ном}^2}. \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет рассчитать эти потери в установившемся режиме при номинальной нагрузке

$$P_{ном.пот} = \frac{3}{2} R_s I_{ном}^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{p^2 \omega_{ном}^2}{R_f} \right) \Psi_r^2 + \frac{2}{3} \frac{R_s}{p^2 \Psi_r^2} (M_{ном})^2 + \Delta P_{мех.ном}. \quad (13)$$

При пуске в соответствии с оптимальной s -образной тахограммой разгона привода лифтов (рывок меняется по

синусоидальному закону) линейная скорость кабины лифта меняется по закону [8] $V(t) = A_0^* \cdot t - A_1^* \sin(\Omega t)$, ускорение – $a(t) = A_0^* (1 - \cos(\Omega t))$, а рывок – $R(t) = r_m \cdot \sin(\Omega t)$. При торможении, соответственно, $V(t) = V_0 -$

$-A_0^* t + A_1^* \sin(\Omega t)$; $a(t) = \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1)$; $R(t) = -r_m \cdot \sin(\Omega t)$. В этих выражениях

$A_0^* = \frac{r_m}{\Omega}$; $A_1^* = \frac{r_m}{\Omega^2}$; r_m – номинальное значение рывка; $\Omega = \frac{2\pi}{T}$; T – время разгона (при пуске) и торможения (при останове).

Для безредукторного электропривода лифта с диаметром канатопроводящего шкива D соответствующий закон изменения частоты вращения вала двигателя определяется через радиус канатопроводящего шкива $R_{шк} = \frac{D}{2}$ как

$$\omega(t) = \frac{V(t)}{R_{шк}}.$$

Выражение для потерь (12) с учетом известного закона изменения скорости, ускорения двигателя и величины статического момента нагрузки (загрузка кабины лифта) позволяет рассчитать потери в двигателе. Используя методику расчета управляемых потерь [8] для асинхронного двигателя при известных законах изменения скорости и ускорения в приводе лифта, для привода с СДПМ при этих же законах изменения скорости и ускорения (рывок меняется по синусоидальному закону) выражения управляемых потерь имеют вид:

– потери при торможении в генераторном режиме работы

$$P_{пот.торм.ген} = \frac{3}{2} R_s I_{max}^2 + \frac{2}{3} \Psi_r^2 \left[\frac{k^*}{\Psi_r^4} [(M_s + JA_0) - JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* \left[(A_1^* - tA_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

– потери при торможении в двигательном режиме работы

$$P_{pot. торм. дв.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \psi_r^2 \left[\frac{k^*}{\psi_r^4} [(M_s - JA_0) + JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* \left[(A_{1*} - tA_0) + \frac{A_0}{\Omega} \sin \Omega t \right]^2 \right];$$

– потери при пуске в генераторном режиме работы

$$P_{pot. пус. ген.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \psi_r^2 \left[\frac{k^*}{\psi_r^4} [(M_s - JA_0) + JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right];$$

– потери при пуске в двигательном режиме работы

$$P_{pot. пус. дв.} = \frac{3}{2} R_s I_{\max}^2 + \frac{2}{3} \psi_r^2 \left[\frac{k^*}{\psi_r^4} [(M_s + JA_0) - JA_0 \cos \Omega t]^2 + n^* A_0^2 \left(t - \frac{1}{\Omega} \sin \Omega t \right)^2 \right],$$

где $n^* = \frac{9p^2}{4R_f}$; $k^* = \frac{R_s}{p^2}$.

Отличие в потерях для асинхронного двигателя и СДПМ связано с отсутствием потерь в роторе у СДПМ и отличием в параметрах двигателей. Для расчета циклового КПД двигателя, работающего и в двигательном и в генераторном режимах, необходима оценка механической работы на валу двигателя. Механическая работа $M(t) \cdot \omega(t)$ двигателя складывается из механической работы при пуске, торможении и движении кабины лифта с установившейся скоростью. При известном законе изменения скорости и ускорения при пуске и, например, генераторном режиме работы привода лифта, подводимая механическая мощность от неуравновешенного груза к валу двигателя может быть определена [8] по формуле

$$\begin{aligned} P_{мех. пус.} (t) &= \omega_n(t) M(t) = \\ &= \omega_n(t) (M_s - Ja_n(t)) = \\ &= \omega_n(t) (M_s - JA_0^* (1 - \cos(\Omega t))). \end{aligned}$$

Соответственно, при торможении и генераторном режиме работы привода

$$\begin{aligned} P_{мех. мор.} (t) &= \omega_{мор}(t) M = \\ &= \omega_{мор}(t) (M_s - Ja_{мор}(t)) = \\ &= \omega_{мор}(t) \left(M_s - J \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1) \right). \end{aligned}$$

При работе привода в двигательном режиме механическая работа двигателя при пуске лифта может быть определена

$$\begin{aligned} P_{мех. пус.} (t) &= \omega_n(t) M(t) = \\ &= \omega_n(t) (M_s + Ja_n(t)) = \\ &= \omega_n(t) (M_s + JA_0^* (1 - \cos(\Omega t))). \end{aligned}$$

Соответственно, при торможении лифта и двигательном режиме работы

$$P_{\text{мех.тор}}(t) = \omega_{\text{тор}}(t)M =$$

$$= \omega_{\text{тор}}(t)(M_s + Ja_{\text{тор}}(t)) =$$

$$= \omega_{\text{тор}}(t) \left(M_s + J \frac{r_m}{\Omega} (\cos(\Omega t) - 1) \right).$$

В установившемся режиме работы механическая работа двигателя в двигательном режиме (она же подводимая механическая мощность в генераторном режиме) вычисляется по формуле

$$P_{\text{мех.уст.}}(t) = \omega_{\text{ном.}} M.$$

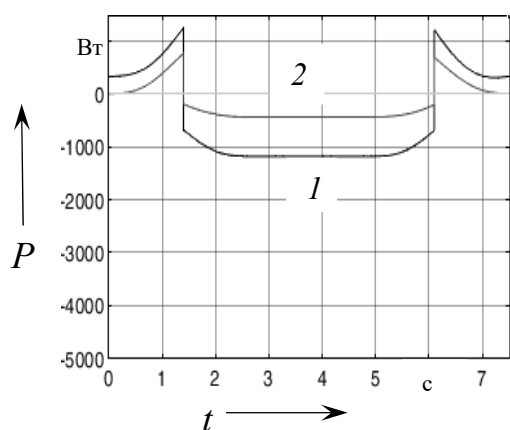
В качестве примера для высокомоментного лифтового СДПМ (табл. 1) –

пассажирский лифт со скоростью перемещения 1 м/с, расчетные значения для двигателя: КПД = 0,55, $R_f = 237,9$ Ом, $M_{\text{наз.}} = 247$ Н·м, $J = 18,85$ кг·м² – при перемещении, например, пустой кабины лифта вверх (время рабочего цикла – 7,51 с, одинаковое время пуска и торможения – 2,5 с) были рассчитаны: изменение циклового КПД двигателя в течение времени цикла, энергия, преобразуемая электродвигателем за цикл (рис. 1 и 2). При этом часть времени цикла (при скорости меньшей 0,6 от номинальной) привод работает в двигательном режиме (см. рис. 1. б, буква Д) [9], а другая часть отрабатывается в генераторном режиме работы привода (буква Г).

Табл. 1. Расчетные параметры СДПМ использованные при моделировании

R_1 , Ом	$M_{\text{ном.}}$ Н·м	$I_{\text{ном.}}$ А	$P_{\text{ном.}}$ Вт	$Lq = Ld$, Гн	$\Psi_{\text{ном.}}$ Вб	$\Omega_{\text{ном.}}$ с ⁻¹	D , м	r_m , м/с ²
0,652	710	12,4	3400	0,065	4,87	4,88	0,32	1

а)



б)

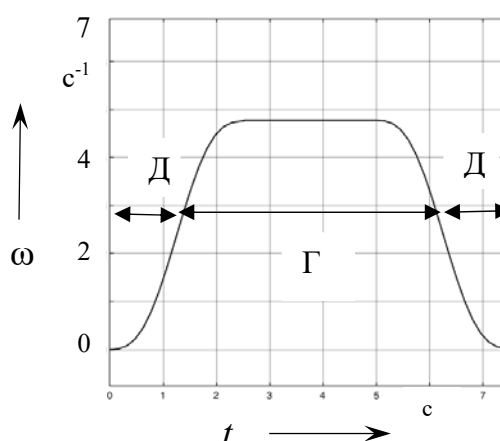


Рис. 1. Мощность, потребляемая за цикл 1 (преобразуемая в механическую работу – двигательный режим или подводимая к валу двигателя – генераторный режим) и мощность за цикл 2 (отдаваемая в сеть – генераторный режим или преобразуемая в работу на валу – двигательный режим) (а) и тахограмма частоты вращения двигателя привода лифта за цикл работы (б)

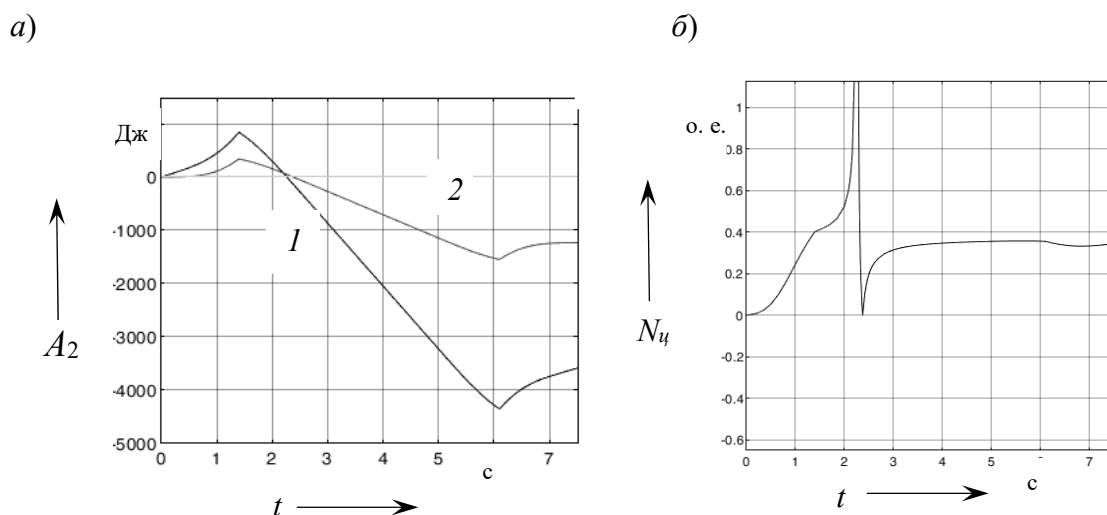


Рис. 2. Энергия за цикл 1 (потребляемая –двигательный режим или подводимая к валу двигателя – генераторный режим) и энергия за цикл 2 (отдаваемая в сеть – генераторный режим или потребляемая на валу – двигательный режим) (а) и изменение расчетного циклового КПД двигателя за рассматриваемый цикл работы (б)

На рис. 2 приведены расчетные графики энергии потребляемой (двигательный режим работы) или подводимой к валу двигателя (генераторный режим работы) и преобразуемой в механическую работу или отдаваемой в сеть за рассматриваемый цикл работы. Значение циклового КПД двигателя за рассматриваемый цикл работы

$$N_{\text{ц}} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{1235}{3600} = 0,34.$$

Выводы

Специфика электропривода лифтов без машинного помещения – отсутствие редуктора в механической подсистеме привода лифта и использование в лифтовых лебедках высокомоментных тихоходных синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе. С учетом цикличности работы лифтов актуальна разработка аналитических способов оценки их

энергетических характеристик, в частности циклового КПД, с учетом задаваемой оптимальной тахограммы разгона и торможения кабины лифта (s-тахограмма формирования скорости кабины лифта с синусоидальным изменением рывка при пуске и торможении). Для этого случая получены выражения для расчета циклового КПД синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе в частотно-регулируемом безредукторном приводе лифта. Приведен пример расчета циклового КПД синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами на роторе для цикла (перемещение пустой кабины вверх на три этажа). Цикловой КПД двигателя для рассматриваемого цикла работы – 0,34 при его расчетном значении в установившемся режиме – 0,55, что соответствует оценке возможных значений цикловых КПД высокомоментных двигателей для безредукторных лифтовых лебедок [1].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кругликов, О. В.** Асинхронные частотно-регулируемые электродвигатели для привода безредукторных лифтовых лебедок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / О. В. Кругликов; НИУ МЭИ. – Москва, 2015. – 22 с.
2. **Коваль, А. С.** К вопросу определения циклового КПД асинхронного двигателя частотно-регулируемого привода лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 2. – С. 41–48.
3. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
4. **Фираго, Б. И.** Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 4. – С. 287–289.
5. **Борисевич, А. В.** Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями / А. В. Борисевич. – Москва: ИНФРА-М, 2017. – 102 с.
6. **Stumper, J.-F.** Loss Minimization of Induction Machines in Dynamic Operation / J.-F. Stumper, A. Dotlinger, R. Kennel // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2013. – Vol. 28 (3). – P. 726–735.
7. **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
8. **Коваль, А. С.** К вопросу расчета управляемых электромагнитных потерь в двигателе в пуско-тормозных режимах работы регулируемого асинхронного электропривода лифта / А. С. Коваль // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1. – С. 49–55.
9. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов при регулируемой номинальной скорости движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.

Статья сдана в редакцию 2 сентября 2022 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_66

УДК 53.083.92

Н. В. Герасименко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И ДИНАМИКИ УВЛАЖНЕНИЯ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

N. V. Gerasimenko

RESEARCH ON WATER ABSORPTION AND MOISTURE DYNAMICS IN POLYURETHANE FOAM INSULATION OF HEAT NETWORKS PIPELINES

Аннотация

Представлены результаты исследований водопоглощения, коэффициентов диффузии и динамики увлажнения теплоизоляционного слоя из жесткого пенополиуретана. Оценка скорости диффузии влаги дана на основе математической модели, представленной одномерным уравнением диффузии.

Полученные результаты могут быть использованы при исследованиях и моделировании процессов, связанных с диагностикой трубопроводов тепловых сетей методами рефлектометрии и пороговыми детекторами сопротивления.

Ключевые слова:

ППУ-изоляция, влажность, водопоглощение, дистанционный контроль, тепловые сети.

Для цитирования:

Герасименко, Н. В. Исследование водопоглощения и динамики увлажнения пенополиуретановой изоляции трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Герасименко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 66–74.

Abstract

The paper presents results of the research on water absorption, diffusion coefficients and moisture dynamics in a heat-insulating layer made of rigid polyurethane foam. The moisture diffusion rate is estimated based on a mathematical model represented by the one-dimensional diffusion equation.

The results obtained can be used in research and modeling of processes of diagnosing heat networks pipelines by applying reflectometry methods and threshold detectors of resistance.

Keywords:

PUF insulation, humidity, water absorption, remote control, heating networks.

For citation:

Gerasimenko, N. V. Research on water absorption and moisture dynamics in polyurethane foam insulation of heat networks pipelines / N. V. Gerasimenko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 66–74.

Введение

Жесткие пенополиуретаны (ППУ) получают в промышленности путем химической реакции компонента А, представляющего собой смесь простых полиэфиров, вспенивающих химических добавок и компонента Б – полимерного дефинилметандиизоцианата.

Химическая реакция указанных компонентов протекает с выделением теплоты и активным выделением вспенивающего газа. В результате образуется мелкодисперсная эмульсия, происходит нарастание вязкости, повышается температура смеси. Постепенное отвердевание пенополиуретановой смеси приводит к образованию трехмерной полимерной структуры. Плотность и, как следствие, пористость получаемого пенополиуретанового состава зависят от типа используемых компонентов [1].

В работе рассматриваются пенополиуретаны, получаемые в процессе реакции компонентов Изолан А350 (или А350ф для фасонных изделий) и Vorapate М229, а также Эластопор Н2130 и IsoPMDI 92140. Целью исследования является получение информации о динамике увлажнения слоя ППУ-изоляции при наличии дефектов основной трубы. Эти сведения необходимы для теоретических и экспериментальных исследований режимов работы системы оперативного дистанционного контроля.

Исследования кажущейся плотности и водопоглощения ППУ

Исследование свойств начнем с получения образцов ППУ-изоляции и оценки кажущейся плотности материала.

Кажущаяся плотность образцов ППУ – масса единицы объема материала, включая объем закрытых пор. Для исследования кажущейся плотности изоляционного материала из ППУ согласно ГОСТ 409–2017 [2], получаемого в ходе реакции компонентов А и Б,

был выполнен отбор образцов следующим образом. Образцы кубической формы с размерами сторон $25 \times 25 \times 25$ мм, измеренными с точностью до ± 1 мм, вырезаны на расстоянии 100 мм от края теплоизоляционного слоя сериями по два экземпляра. Всего для экспериментов отобрано по 10 образцов на каждый тип изделия. В качестве исследуемых изделий были выбраны трубы различного диаметра и фасонные изделия – тройники и отводы.

Расчет плотности по результатам взвешивания образцов на лабораторных весах «Госметр» проводился согласно ГОСТ 24104–2001 [3]. Кажущаяся плотность образцов ППУ с известной массой M_o и объемом V_o рассчитывалась по формуле $\rho = M_o/V_o$. Условия кондиционирования в помещении, где проводился эксперимент: температура воздуха 24 °С, влажность воздуха 51 %. Результаты исследования плотности представлены в табл. 1.

Для дальнейшего анализа свойств ППУ при наличии увлажнения определим величину, позволяющую характеризовать влажностное состояние ППУ. Для описания влажностного состояния теплоизоляционных материалов трубопроводов используют [4] безразмерную величину – влагосодержание по массе W_m , %, представляющую собой отношение разности масс увлажненного и сухого образцов, отнесенную к массе сухого образца. Произведение влагосодержания на плотность вещества ρ , из которого изготовлен теплоизоляционный материал, позволяет рассчитать объемное влагосодержание $W_v = W - m\rho$.

Изучение механизма влагопереноса в ППУ-изоляции начнем с исследования водопоглощения отобранных образцов и получим зависимость данной величины от кажущейся плотности ППУ. Наличие экспериментальных данных о водопоглощении позволит выпол-

нить оценку коэффициента диффузии влаги D , необходимого для дальнейшего построения математической

модели процесса диффузии влаги в слое ППУ.

Табл. 1. Кажущаяся плотность образцов ППУ изоляции

Номер опыта	Труба ¹ , кг/м ³	Труба ² , кг/м ³	Тройник ³ , кг/м ³	Отвод ³ , кг/м ³
1	82,58	64,47	71,25	69,85
2	91,34	61,51	68,61	71,01
3	64,77	63,28	68,77	71,10
4	93,46	69,71	87,15	71,10
5	88,19	62,34	80,55	78,32
6	81,71	79,71	82,29	67,18
7	86,58	81,22	74,67	69,21
8	61,43	64,54	72,73	72,23
9	72,69	66,32	68,72	71,18
10	73,62	68,65	80,31	71,10

¹Компонент А – Изолан А350; компонент Б – Voranate M229.
²Компонент А – Эластопор Н2130; компонент Б – IsoPMDI 92140.
³Компонент А – Изолан А350ф; компонент Б – Voranate M229.

Согласно ГОСТ 4650–2015 [5], испытание на водопоглощение может быть выполнено двумя методами: погружением в воду комнатной температуры (≈ 23 °С) или погружением в кипящую воду. В обоих случаях образцы подвергаются предварительной сушке при температуре ($50,0 \pm 2$) °С в специализированном сушильном шкафу.

Воспользуемся методом погружения в кипящую воду, который заключается в следующем. Предварительно высушенные образцы ППУ помещают в стальную корзину с зажимами, предотвращающими всплытие образцов (рис. 1). Корзину опускают в кипящую дистиллированную воду на (30 ± 5) мин, затем образцы извлекают для контрольного взвешивания, после чего снова погружают в кипящую воду на такой же промежуток времени и снова взвешивают. Процедура и технические средства для взвешивания образцов аналогичны используемым в ходе исследо-

вания плотности образцов ППУ. Для каждого испытуемого образца рассчитывается массовая доля поглощенной воды (водопоглощение по массе, W_m , %) по формуле

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%,$$

где m_2 – масса образца после выдержки в кипящей воде; m_1 – изначальная масса образца после высушивания.

Испытания по изложенной методике выполнены для двух наборов образцов, каждый из которых получен в процессе реакции вышеописанных компонентов [6]. Условия кондиционирования в помещении при проведении эксперимента: температура воздуха 23,7 °С; влажность воздуха 50 %. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 и 3.

Анализ полученных зависимостей

показывает, что с увеличением плотности ППУ водопоглощение снижается, что обусловлено уменьшением размера ячеек (пор), а также увеличением ко-

личества закрытых ячеек, что препятствует проникновению влаги внутрь материала.

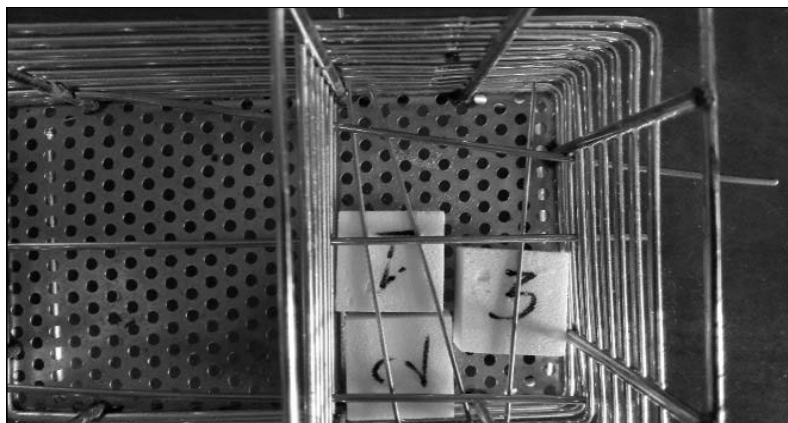


Рис. 1. Образцы ППУ для экспериментального исследования водопоглощения

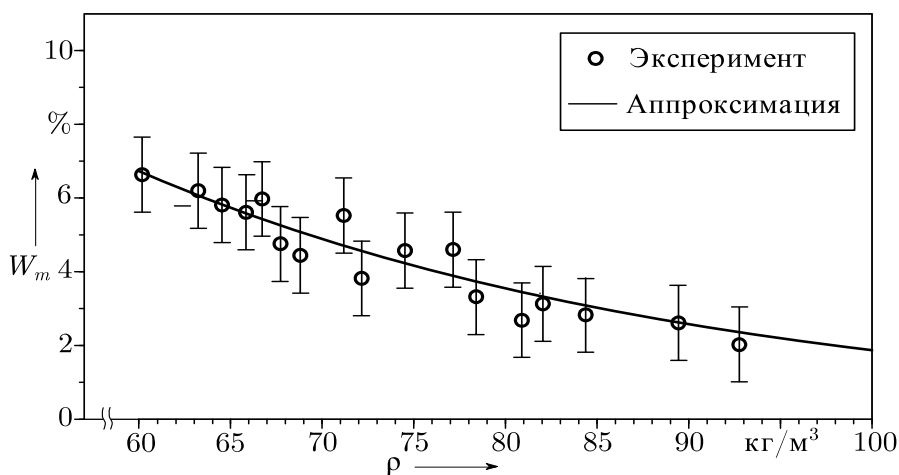


Рис. 2. Водопоглощение ППУ-изоляции на основе компонентов Изолан А350(ф) и Voranate M225

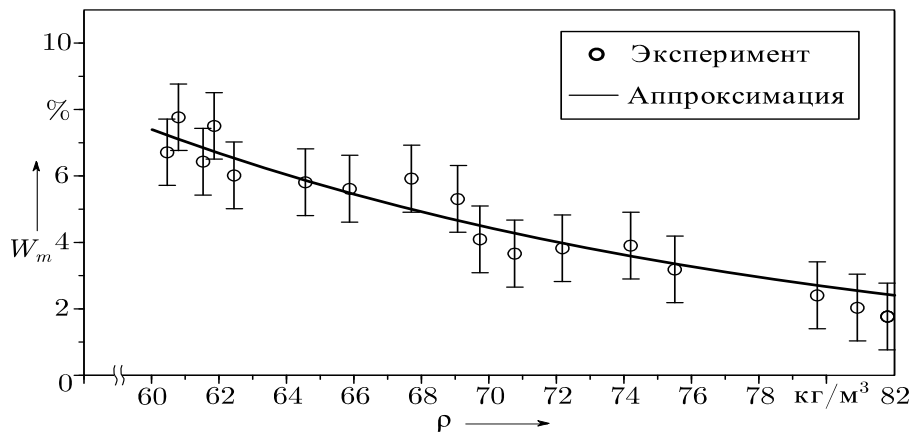


Рис. 3. Водопоглощение ППУ-изоляции на основе компонентов Эластопор H2130 и IsoPMDI 92140

Оценка коэффициентов диффузии влаги

Выполним оценку коэффициента диффузии влаги. Непосредственное экспериментальное исследование коэффициента диффузии дает более точный результат, чем оценка, полученная на основе имеющихся данных о водопоглощении, однако такие эксперименты требуют продолжительных наблюдений и сложных экспериментальных установок [7–9].

Согласно [5], для оценки коэффициента диффузии можно использо-

вать приближенную формулу

$$\sqrt{D} \approx \frac{1}{W_s} \cdot \frac{d}{0,52\pi} \cdot \frac{W_m}{\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где d – толщина испытуемого образца; W_s – водопоглощение насыщения, $W_s = 7\%$; t – продолжительность испытания на водопоглощение, $t = 1,5$ ч.

Используя формулу (1), получим зависимости коэффициентов диффузии от плотности ППУ для двух наборов образцов (рис. 4).

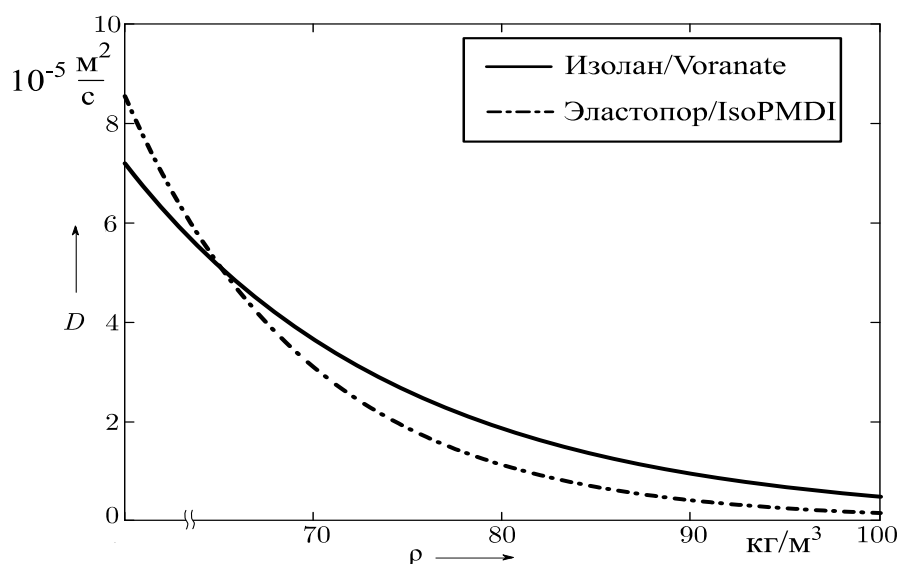


Рис. 4. Зависимости коэффициента диффузии влаги от плотности ППУ

Полученные значения коэффициентов диффузии позволяют оценить скорость распространения влаги в слое ППУ.

Для построения математической модели влагопереноса в слое ППУ-изоляции рассмотрим бесконечную пластину из ППУ, нижняя граница которой контактирует с водой. Такая постановка задачи позволяет использовать одномерное решение уравнения диффузии

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $u(x, t)$ – функция, описывающая распределение концентрации влаги в толщине ППУ слоя в различные моменты времени.

Уравнение (2) необходимо дополнить граничным условием $u(0, t) = 1$ и начальным условием $u(x, 0) = 0$.

Применяя к (2) преобразование Лапласа, получим обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$p\hat{u}(x) = D \frac{d^2 \hat{u}}{dx^2}.$$

Решение данного уравнения с учетом операторного изображения граничного условия $\hat{u}(0) = 1/p$ имеет вид

$$\hat{u}(x) = \frac{1}{p} e^{-\sqrt{p} \frac{x}{\sqrt{D}}}.$$

Переходя к оригиналу, получаем функцию, которая является решением уравнения (2) при заданных начальном и граничном условиях:

$$u(x, t) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D}\sqrt{t}}\right), \quad (3)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибок, $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$.

Формула (3) позволяет исследовать динамику увлажнения изоляционного слоя ППУ. Получим кривые изменения влажности в точке, соответствующей размещению проводника системы оперативного дистанционного контроля, а также в точках предполагаемого размещения цифровых датчиков влажности альтернативной системы контроля, предложенной в [10]. Кривые изменения концентрации для двух наборов образцов плотностью 60 и 80 кг/м³ представлены на рис. 5 и 6.

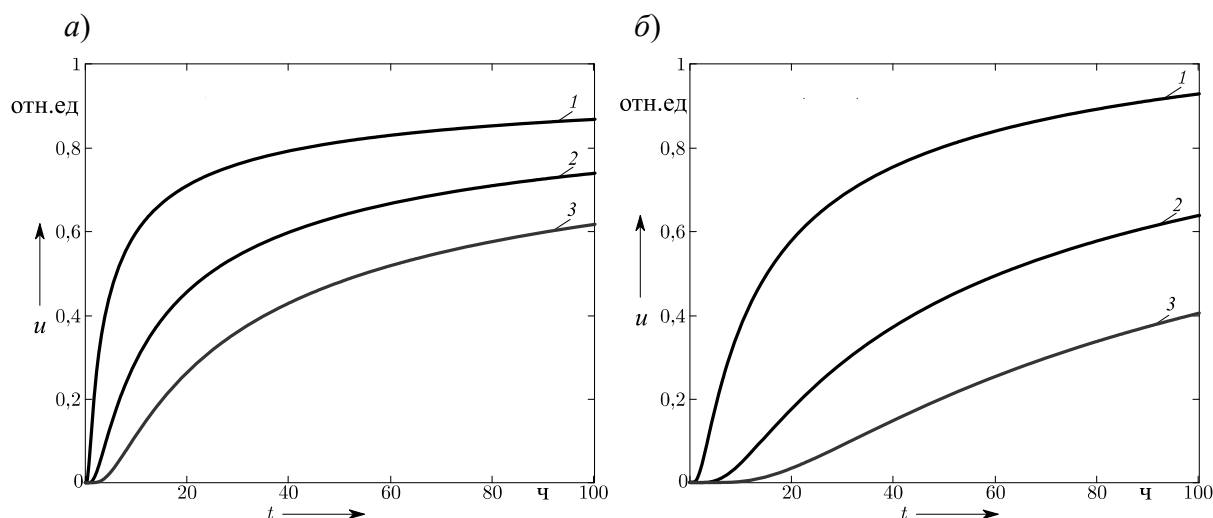


Рис. 5. Динамика изменения влажности в слое ППУ на основе компонентов Изолан А350(ф) и Vorganate M225 плотностью 60 кг/м³ (а) и 80 кг/м³ (б) на расстояниях 20 мм (кривая 1), 40 мм (кривая 2), 60 мм (кривая 3) от источника увлажнения

Анализ зависимостей позволяет установить следующее. Максимальная скорость увлажнения ППУ наблюдается через $t_1 \approx 1,0$ ч для ППУ на основе Изолан и Vorganate плотностью 60 кг/м³ и $t_2 \approx 3,5$ ч, если плотность материала составляет 80 кг/м³, при этом значение максимальной скорости в случае ППУ

меньшей плотности примерно в 3,8 раза выше. Аналогичные показатели для ППУ на основе Эластопор и IsoPMDI имеют значения $t_1 \approx 0,8$ ч и $t_2 \approx 5,9$ ч, соответственно, максимальная скорость увлажнения ППУ меньшей плотности в этом случае примерно в 5,9 раз выше.

Построим также кривые распре-

деления концентрации влаги в слое ППУ в различные моменты времени для

ППУ на основе Изолан и Voranate и Эластопор и IsoPMDI (рис. 7).

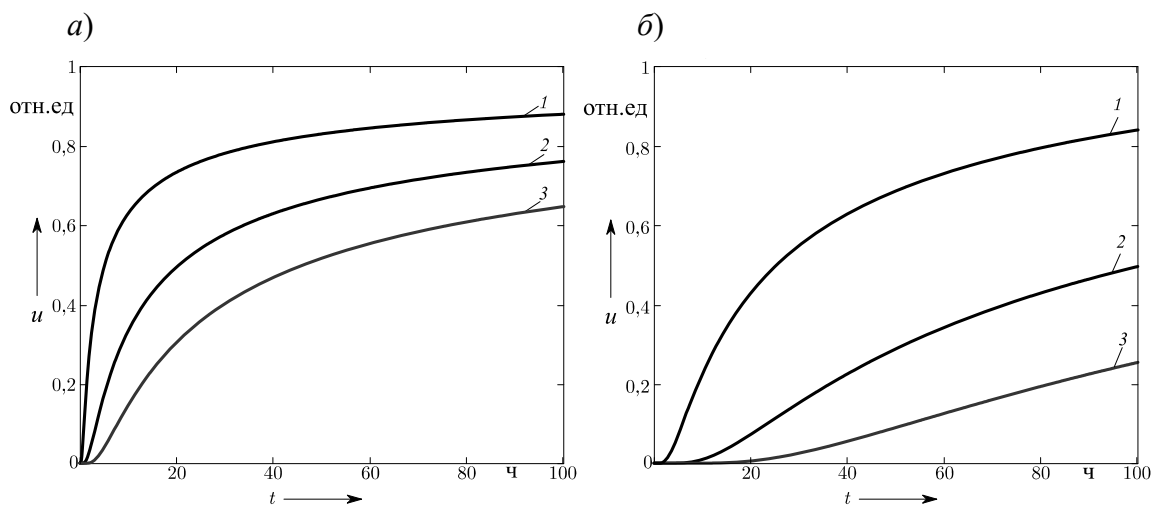


Рис. 6. Динамика изменения влажности в слое ППУ на основе компонентов Эластопор H2130 и IsoPMDI плотностью 60 кг/м^3 (а) и 80 кг/м^3 (б) на расстояниях 20 мм (кривая 1), 40 мм (кривая 2), 60 мм (кривая 3) от источника увлажнения

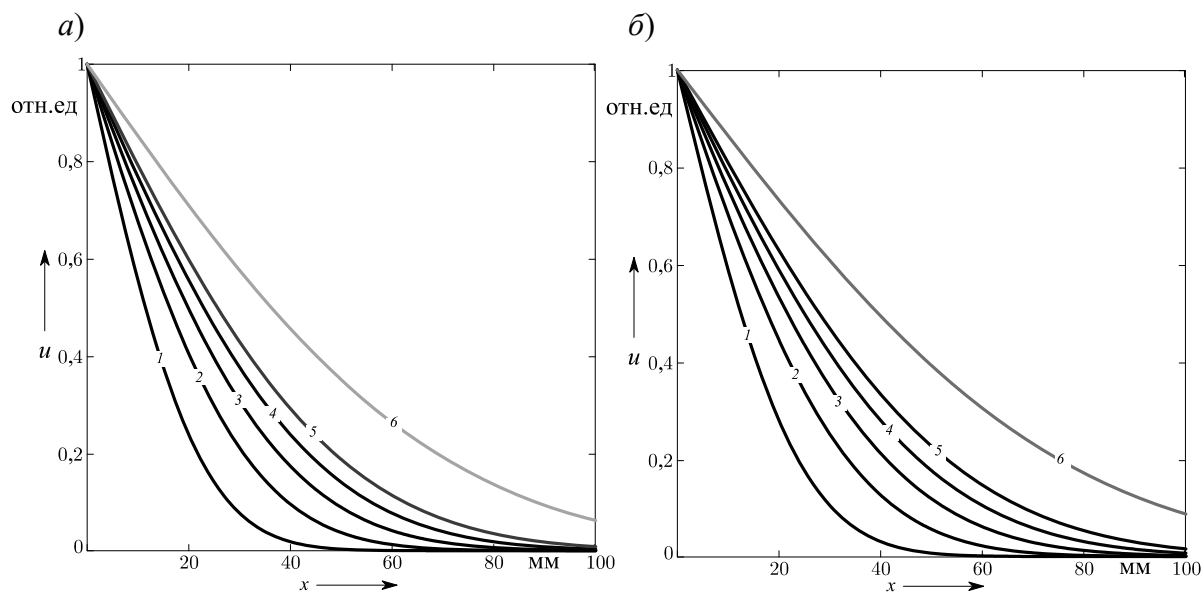


Рис. 7. Профили концентрации влаги в слое ППУ на основе компонентов Изолан и Voranate (а) и Эластопор и IsoPMDI (б): 1 – спустя 2 ч; 2 – спустя 4 ч; 3 – спустя 6 ч; 4 – спустя 8 ч; 5 – спустя 10 ч; 6 – спустя 20 ч

Сравнение с экспериментом

С целью проверки полученной модели был выполнен эксперимент на специально подготовленном образце ППУ-изоляции со средней плот-

ностью 60 кг/м^3 на основе компонентов Изолан и Voranate с размещенными до начала реакции датчиками влажности по следующей схеме.

Датчик расположен на расстоянии 20 мм от поверхности с точечным

отверстием, имитирующим дефект. Эксперимент проводился в течение 20 ч при давлении жидкости 1,8 МПа. Полу-

ченная в результате данного эксперимента зависимость представлена на рис. 8.

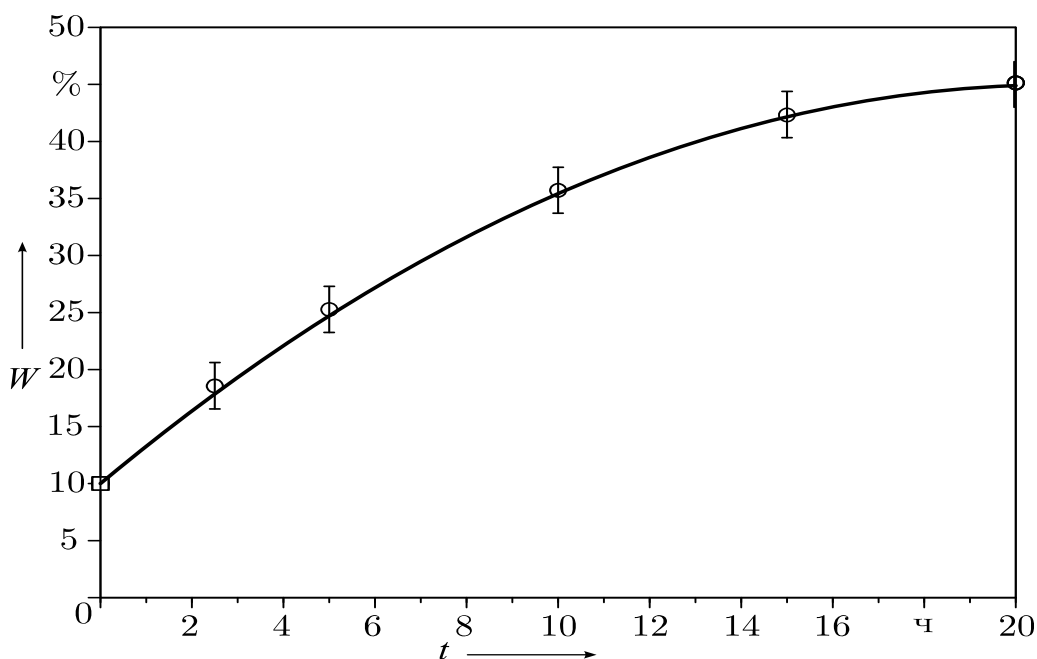


Рис. 8. Экспериментальная кривая изменения влажности слоя ППУ-изоляции на расстоянии 20 мм от источника увлажнения

Следует отметить, что примерно через 1 ч после начала эксперимента скорость изменения влажности, регистрируемая датчиком, расположенным непосредственно над дефектом, максимальна и составляет примерно 12 % в час, что хорошо согласуется с результатом, полученным с помощью формулы (3).

Заключение

Представленная модель позволяет получить представление о скорости диффузии влаги в слое ППУ-изоляции при наличии повреждений трубы или защитной оболочки и может использоваться для оптимизации количества датчиков и их расположения при проектировании цифровых систем оперативного дистанционного контроля состояния ППУ-изоляции, а также в исследова-

ниях систем оперативного дистанционного контроля методами импульсной рефлектометрии. Полученные зависимости позволяют отметить, что для уверенной регистрации наличия повреждения (утечки) традиционной системой оперативного дистанционного контроля требуется не менее 10 ч, при этом чувствительность цифрового датчика влажности дает возможность определить наличие дефекта гораздо раньше, тем самым предотвратить возможную аварийную ситуацию. Динамика диффузии влаги в реальной системе зависит от множества факторов, включая температуру теплоносителя и окружающей среды, качество и состав компонентов ППУ, учет которых требует дополнительных экспериментов и является предметом отдельного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Келлнер, Ю.** Способы производства теплоизолированных пенополиуретановых труб для систем централизованного теплоснабжения / Ю. Келлнер // Трубопроводы и экология. – 2002. – № 3. – С. 24–26.
2. Пластмассы ячеистые и резины губчатые. Метод определения кажущейся плотности: ГОСТ 409–2017. – Введ. 01.07.2018. – Москва : Стандартинформ. – 2017. – 13 с.
3. Весы лабораторные. Общие технические требования: ГОСТ 24104–2001. – Введ. 01.07.2002. – Москва: Стандартинформ. – 2007. – 8 с.
4. Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. – Москва : Теплопроект. – 2004. – 18 с.
5. Пластмассы. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 4650–2014. – Введ. 01.03.2015. – Москва: Стандартинформ. – 2014. – 20 с.
6. **Герасименко, Н. В.** Исследование водопоглощения жесткого пенополиуретана / Н. В. Герасименко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос ун-т, 2021. – С. 141.
7. **Низовцев, М. И.** Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги в пористых материалах при капиллярном и сорбционном увлажнении / М. И. Низовцев, С. В. Станкус, А. Н. Стерлягов // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 67–73.
8. **Жилин, А. А.** Физико-математическое моделирование процессов капиллярной пропитки пористых материалов / А. А. Жилин, А. В. Федоров // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 1. – С. 42–51.
9. **Берлинер, М. А.** Измерения влажности / М. А. Берлинер. – Москва: Энергия, 1973. – 400 с.
10. **Болотов, С. В.** Цифровая система оперативного дистанционного контроля состояния изоляции гибких ПИ-труб / С. В. Болотов, Н. В. Герасименко, В. Н. Почуйко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – Т. 1. – С. 13–19.

Статья сдана в редакцию 24 ноября 2022 года

Никита Васильевич Герасименко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: gerasimenko_nikita@hotmail.com.

Nikita Vasilievich Gerasimenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: gerasimenko_nikita@hotmail.com.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_75

УДК 004+51

М. А. Гундина

**ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ ВЫБОРКИ
В КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ WOLFRAM MATHEMATICA**

M. A. Hundzina

**IDENTIFICATION OF ANOMALOUS CLUSTERS OF SAMPLES
IN THE WOLFRAM MATHEMATICA COMPUTER SYSTEM**

Аннотация

Описываются различные подходы к процессу выявления аномалии выборки и специфика их использования. Обнаружение аномалий относится к поиску непредвиденных значений в потоках данных. Аномалия – это своего рода отклонение поведения системы от некоторого стандартного ожидаемого поведения. Описан разработанный алгоритм определения аномального кластера, реализованный в системе Wolfram Mathematica. Приводятся особенности функционирования алгоритма.

Ключевые слова:

аномалия, кластер, Wolfram Mathematica, автоматизация, компьютерная система.

Для цитирования:

Гундина, М. А. Выявление аномальных кластеров выборки в компьютерной системе Wolfram Mathematica / М. А. Гундина // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 75–83.

Abstract

Various approaches to the process of anomaly detection and the specifics of their use are described. Anomaly detection refers to finding unexpected values in data streams. An anomaly is a kind of deviation of the system behavior from some standard expected behavior. The developed algorithm for determining an anomalous cluster implemented in the Wolfram Mathematica system is described. The features of the algorithm functioning are given.

Keywords:

anomaly, cluster, Wolfram Mathematica, automation, computer system.

For citation:

Hundzina, M. A. Identification of anomalous clusters of samples in the Wolfram Mathematica computer System / M. A. Hundzina // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 75–83.

Введение

В современных компьютерных системах появилась возможность реализовать алгоритмы обнаружения аномальных значений выборки, это осуществляется с помощью поиска и анализа закономерностей исходных эмпирических данных. Исходные данные могут быть

различной природы. Они могут быть нормально распределены. Однако предположение о нормальном распределении выборки может и не выполняться. На данный момент существует множество подходов для определения аномалий и подходов к автоматизации процесса их выявления. Одни требуют привлечения сложного математического

аппарата, другие достаточно непросты в реализации, третьи должны учитывать особенности природы исходного анализируемого процесса.

Целью статьи является реализация алгоритма выявления аномальных кластеров в компьютерной системе WolframMathematica.

Процессом поиска аномальных значений несколько десятилетий интересуются физики, математики, астрономы, медики и другие ученые. Различные подходы широко представлены в отечественной и зарубежной литературе. Так, например, для поиска аномальных значений выборки могут быть использованы принципы классификации на основе репликационных нейронных сетей [1]. В основе такого подхода лежат принципы машинного обучения. Вначале строится модель согласно нормальным элементам выборки, а затем она может быть использована для анализа ранее неизвестных элементов, которые подлежат проверке.

Для обнаружения аномалий выборки также может использоваться классификация на основе нейронных сетей глубокого обучения [2]. Под глубоким обучением будем понимать метод машинного обучения, который предполагает самостоятельное выстраивание общих правил в виде искусственной нейронной сети на примере данных, обработанных во время процесса обучения. Этот подход использует глубокие нейронные сети для автоматического изучения выборки. Он также может быть использован для прогнозирования оценок аномалий каждого нового значения выборки.

Известно, что метод обнаружения аномалий на основе нейронных сетей включает два этапа. На первом этапе нейронная сеть обучается распознаванию классов нормального поведения, для этого анализируется тренировочная выборка. На втором этапе каждый но-

вый элемент выборки, который поступает в качестве входного сигнала нейронной сети, анализируется. Современные системы, основанные на нейронных сетях, могут распознавать как один, так и несколько классов нормального поведения.

При наличии больших объемов данных, поступающих в реальном времени от датчиков окружающей среды, возникает необходимость в автоматизации процесса выявления аномальных данных. Причина возникновения таких данных может быть связана с ошибками датчиков или особенностями процесса передачи этой информации. В этом случае могут быть применены автоматизированные методы обнаружения аномалий с использованием байесовских сетей, которые выполняют быструю пошаговую оценку данных по мере их поступления, масштабируются до больших объемов данных и не требуют априорной информации о переменных процесса или типах аномалии. Под байесовскими сетями будем понимать графические структуры, служащие для изображения вероятностных отношений между значительным числом переменных, и структуры, которые необходимы, чтобы осуществить вероятностный вывод, основываясь на представленных переменных [3]. Эти методы нашли свое широкое применение при анализе метеорологических данных [4]. Они позволят выявить аномалии выборки, которые вызваны двумя реальными событиями: отказом используемого датчика и сильными переменами в погодных условиях, например, штормом.

Для анализа аномалий в процессах функционирования предприятий может быть использована так называемая «классификация на основе правил» [5]. Постоянно меняющийся сетевой трафик выявляет новые типы подозрительной активности, которые могут быть небезопасны для ресурсов предприятия. По-

этому администраторам безопасности необходимо использовать эффективные системы поиска и отслеживания аномальных явлений трафика. Такие системы способны учиться на поведении сети и обнаруживать аномалии. В основе их работы лежат методы инкрементного интеллектуального анализа данных. Эти методы представляют собой контролируемое обучение на основе «правил атрибутирования», также может быть использован алгоритм неконтролируемой иерархической концептуальной кластеризации. Такие алгоритмы могут классифицировать сетевые соединения как нормальные или аномальные.

Существуют алгоритмы, определяющие аномальные явления, на основе систем нечеткой логики. Нечеткая логика основана на обобщении классической логики и теории нечетких множеств для формализации нечетких знаний, характеризующих лингвистической неопределенностью. В настоящее время такая логика широко применяется в вычислительных и информационных системах различного назначения. Она незаменима в тех случаях, когда на поставленные вопросы невозможно получить четкие ответы или заранее неизвестны все возможные ситуации. Такие алгоритмы представляют собой построенный автомат с конечным числом состояний, а два других отслеживают статистические отклонения от нормального поведения программы. Производительность этих алгоритмов оценивается в зависимости от количества доступных обучающих данных и сравнивается с хорошо известным методом обнаружения аномальных значений [6].

Понятие аномалии широко используется и в медицине. Врожденные аномалии представляют огромную опасность для больных и восприимчивых лиц и значительно ухудшают их жизнь. Они широко исследуются, анализируются пути их минимизации [7].

Существуют алгоритмы обнаружения аномалий на основе кластеризации. Они обучаются на немаркированных данных для обнаружения новых аномалий [8]. Кластерный анализ представляет собой совокупность различных алгоритмов деления объектов на группы, схожие по одному или нескольким признакам. Этот метод дает возможность изучать большие объемы информации, а также существенно сжимать подобные массивы информации. Мерой сходства объектов является функция расстояния между ними. В условиях постоянного увеличения объемов получаемой и требующей анализа информации с различных информационно-измерительных систем особенно остро стоит вопрос идентификации имеющихся в них аномалий. Результаты анализа данных без предварительного исключения аномальных элементов выборки могут быть значительно искажены.

Отдельной группой выявления аномальных значений являются статистические методы. К ним относятся, например, параметрические методы. Они позволяют оценивать параметры модели в режиме реального времени, что устраняет необходимость в длительной фазе обучения или ручной настройке параметров [9].

Метод опорных векторов применяется для поиска аномалий в системах, где нормальное поведение представляется только одним классом данных. Этот метод определяет границу области, в которой находятся элементы выборки, которые определены как нормальные элементы. Затем для каждого исследуемого элемента определяется, находится ли он в определенной области. Если элемент оказывается вне этой области, он определяется как аномальный.

Существует также подход к обнаружению аномалий на основе признаков [10], согласно которому строится гистограмма различных характеристик

выборки, моделируется шаблон гистограмм и выявляются отклонения от созданных моделей.

Аномальные значения выборки

Обнаружение аномалий относится к поиску непредвиденных значений в потоках данных. Под аномалией будем понимать отклонение поведения анализируемой информационно-измерительной системы от некоторого стандартного ожидаемого поведения системы.

По одной из классификаций выделяют следующие типы аномалий: точечную, условную и коллективную. В случае ситуации, когда один из элементов выборки рассматривается как аномальный по отношению ко всем остальным элементам, аномалию называют точечной. В ситуации, когда элемент выборки может определяться как аномальный только в определенном контексте, аномалию называют условной. Для определения аномалии этого типа важно выделить атрибуты. Заметим, что элемент выборки может быть не только условной аномалией в одном контексте, но и нормальным элементом в другом контексте. Если последовательность связанных элементов выборки является аномальной по отношению к этой выборке, то такие аномалии называют коллективными. При определении любого из типов аномалий в зависимости от применяемого алгоритма результатом его работы может быть либо метка элемента выборки как аномального, либо оценка степени вероятности того, что он является аномальным.

Аномальные кластеры

Кластерный метод предполагает группировку похожих элементов выборки в кластеры и не требует знаний о свойствах возможных отклонений.

При данном подходе учитывается предположение о том, что нормальные

данные ближе к центру кластера, а аномальные – значительно дальше. В случае, когда аномальные элементы выборки не являются единичными, они также могут образовывать кластеры. Чаще всего нормальные данные образуют большие плотные кластеры, а аномальные – маленькие и разрозненные.

Рассмотрим подробнее метод оценки числа и местоположения аномальных кластеров для некоторой выборки в компьютерной системе WolframMathematica. Особенность разработанного алгоритма в компьютерной системе заключается в последовательном автоматическом выявлении и удалении так называемых аномальных групп.

Под «аномальностью» в этом случае будем понимать удаленность от некой реперной точки. В качестве реперной точки выбирается точка, координаты которой получаются как выборочные средние каждой из координат.

Исходный массив точек генерируется с помощью функции RandomReal:

```
list=RandomReal[{-10,10},{5,2}];
```

Для нахождения реперной точки используется встроенная функция SpatialMedian, она позволяет определить средние значения всех координат точек соответственно.

Исходная выборка и реперная точка для представленной выборки приведены на рис. 1.

Поиск расстояний между реперной точкой и всеми остальными точками выборки проводится по следующей формуле:

$$Dm[u_]:= \sqrt{(u[[1]]-m1[[1]])^2+(u[[2]]-m1[[2]])^2}.$$

Вместо перебора всех парных расстояний между точками, существует возможность сконцентрировать усилия на вычислении только расстояний между объектами и реперной точкой.

Отображение точек с расстояниями в декартовой системе координат можно представить следующим образом:

```
ListPlot[{{m1}},list,Labeled[#,Round[Dm
[#],.01]]&/@list},PlotRange-
```

```
>All,AspectRatio->1,PlotStyle-
>{Green,Red,PointSize[0.01]]}
```

Результат выполнения этой команды представлен на рис. 2.

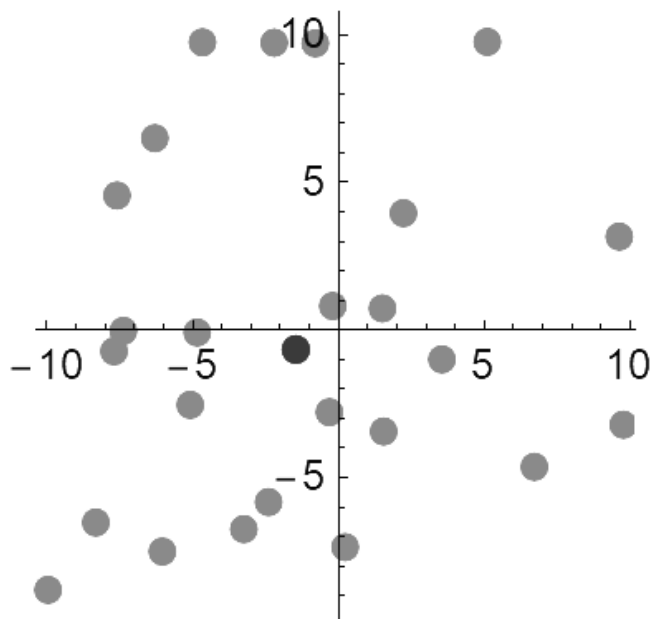


Рис. 1. Исходная выборка и реперная точка

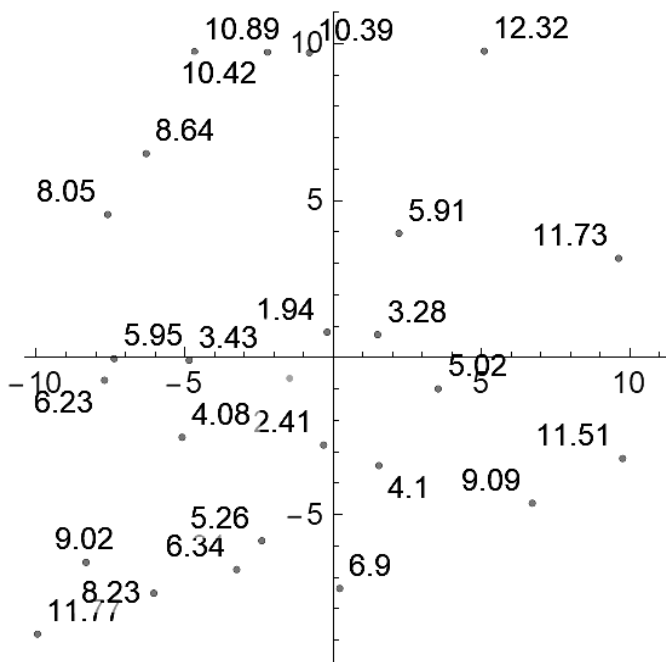


Рис. 2. Точки с расстояниями до реперной точки

Аномальная группа конструируется как кластер, наиболее удаленный от реперной точки. Процесс начинается с

того, что точка, наиболее удаленная от реперной точки, объявляется центром аномальной группы (рис. 3).

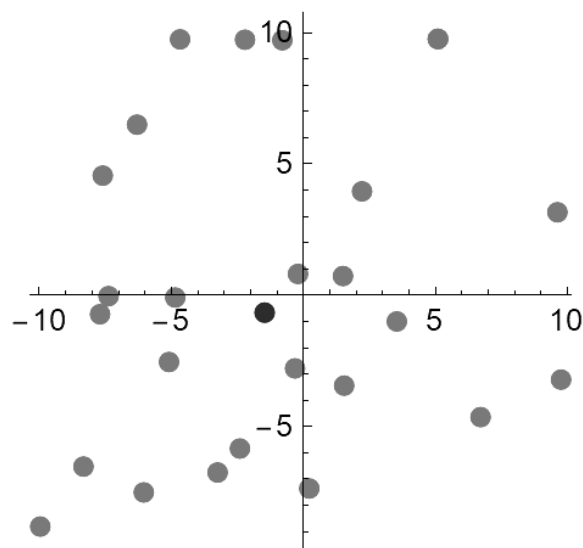


Рис. 3. Центр аномальной группы

Затем находят расстояния для всех оставшихся точек до реперной точки (она не меняется во время процесса вычислений) и до центра аномальной группы (он обновляется при обнаружении следующей аномальной точки). При заданном аномальном центре аномальная группа определяется как множество объектов, которые ближе к данному центру, чем к реперной точке (рис. 4).

Для данного случая аномальной оказалась только одна точка. Первый и второй аномальные кластеры представлены на рис. 5.

В компьютерной системе WolframMathematica имеются встроенные функции анализа аномальных значений. Функция системы FindAnomalies позволяет найти члены выборки, которые считаются аномальными по отношению к данной выборке. Задавая порог принятия, можно в автоматическом режиме определять аномальные значе-

ния выборки. Данная функция может быть использована для многих типов данных, включая числовые, строковые и графические.

В системе также имеются и другие функции, позволяющие анализировать аномальные значения. Так, например, функция DeleteAnomalies выдает новый набор данных, в котором уже удалены аномальные значения.

Рассмотрим некоторую выборку, содержащую аномальные значения:

```
data={5,10,6,100,7,8,7,6,10,9,4,5,8,5};
```

Строится график исходных данных и данных, в которых аномальные значения устранены (рис. 6).

```
ListLinePlot[data, PlotRange->All]
```

```
ListLinePlot[DeleteAnomalies[data]]
```

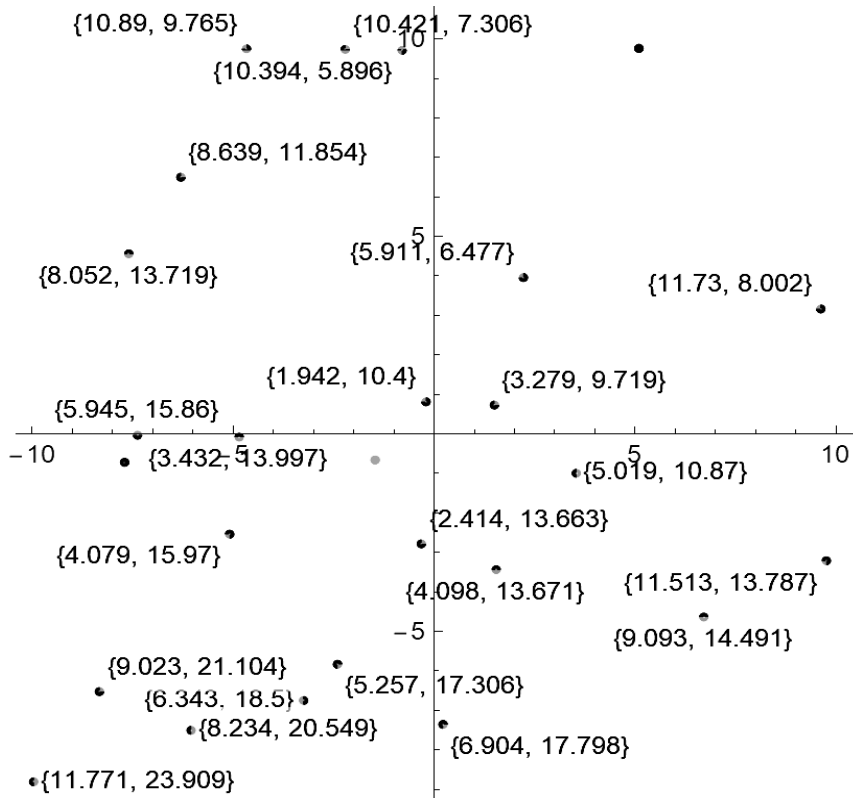



Рис. 4. Точки выборки с парами чисел (расстояние до реперной точки, расстояние до аномального центра)

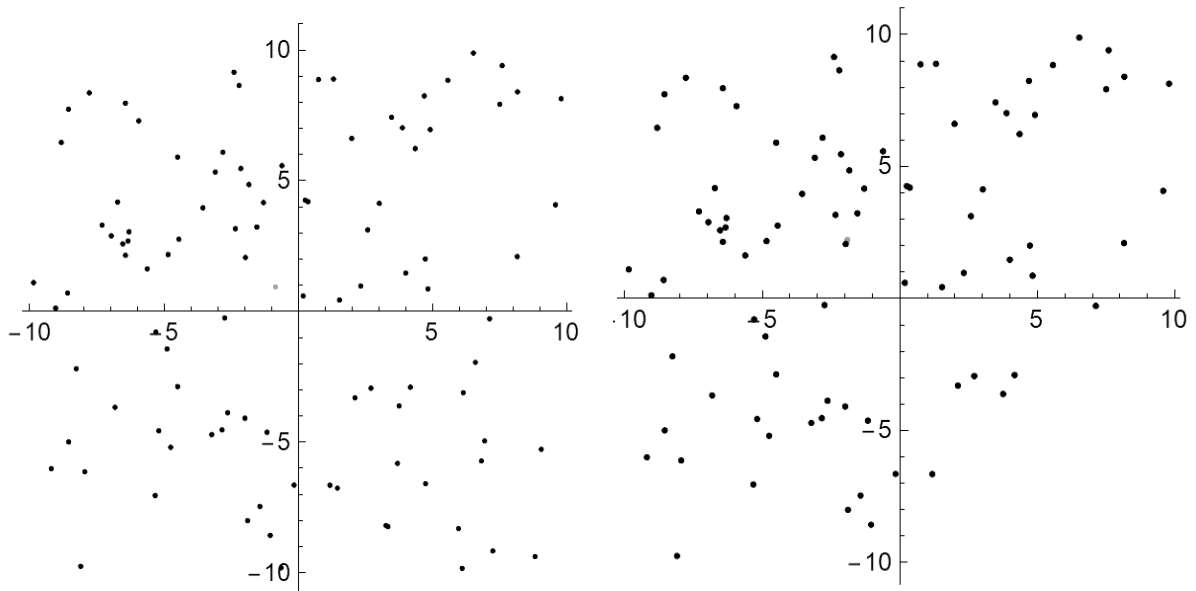


Рис. 5. Первый кластер для выборки. Результат работы алгоритма после удаления первого кластера (второй кластер)

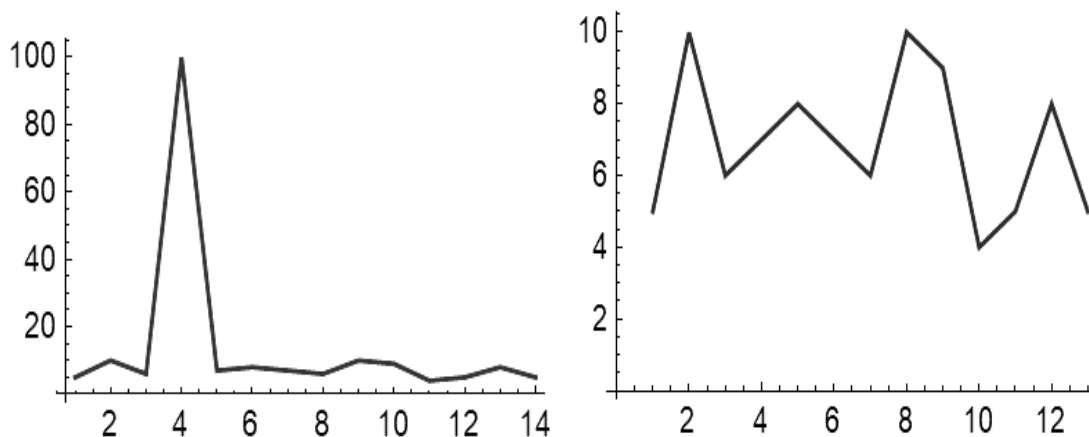


Рис. 6. График исходных значений. График значений без аномалий

Функции `AnomalyDetection` и `AnomalyDetectorFunction` позволяют проверить, является ли новое предъявляемое значение аномальным.

Заключение

Процесс выявления аномалий является очень важным вопросом в задачах предсказания поломок оборудования,

выявления аномального спроса на потребляемую продукцию, выявления нестандартного поведения информационно-измерительной системы. В компьютерной системе `Mathematica` имеются встроенные функции анализа аномальных значений выборки. Кроме того, эта система позволяет обрабатывать массивы большого объема.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dau, H.** Anomaly Detection Using Replicator Neural Networks Trained on Examples of One Class / H. Dau, V. Ciesielski, A. Song // *Simulated Evolution and Learning. Lecture Notes in Computer Science.* – 2014. – Vol. 8886. – P. 311–322.
2. Network anomaly detection using a fuzzy rule-based classifier / S. Ghosh [et al.] // *Computer, Communication and Electrical Technology.* – 2017. – P. 61–65.
3. **Hill, D. J.** Real-Time Bayesian Anomaly Detection in Streaming Environmental Data / D. J. Hill, B. S. Minsker, E. Amir // *Water resources research.* – 2009.
4. **Звягин, Л. С.** Байесовский подход в современном экономическом анализе и имитационном моделировании / Л. С. Звягин // *Мягкие измерения и вычисления.* – 2018. – № 1. – С. 17–26.
5. **Nasr, A.** An Intrusion Detection and Prevention System based on Automatic Learning of Traffic Anomalies / A. Nasr, M. Ezz, M. Abdulmaged // *International Journal of Computer Network and Information Security.* – 2016. – № 8. – P. 53–60.
6. **Michael, C.** Simple, State-Based Approaches to Program-Based Anomaly Detection / C. Michael, A. Ghosh // *ACM Trans. Inf. Syst. Secur.* – 2002. – № 5. – P. 203–237.
7. An overview on congenital dental anomalies / A. Amer [et al.] // *International Journal of Community Medicine And Public Health.* – 2002. – Vol. 9, № 2. – P. 976–980.
8. **Portnoy, L.** Intrusion Detection with Unlabeled Data Using Clustering / L. Portnoy, E. Eskin, S. J. Stolfo. – New York: ColumbiaUniversity, 2001. – 38 p.
9. **Thatte, G.** Parametric Methods for Anomaly Detection in Aggregate Traffic / G. Thatte, U. Mitra, J. Heidemann // *ACM Transactions on Networking.* – 2011. – Vol. 19 (2). – P. 512–525.
10. **Kind, A.** Histogram-based traffic anomaly detection / A. Kind, M. P. Stoecklin, X. Dimitropoulos // *IEEE Transactions on Network and Service Management.* – 2009. – Vol. 6 (2). – P. 110–121.

11. **Silva, E.** A study on Anomaly Detection GAN-based methods on image data / E. Silva, J. Lochter // Anais do Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional. – 2020. – P. 823–831.

Статья сдана в редакцию 3 октября 2022 года

Мария Анатольевна Гундина, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: hundzina@bntu.by.

Maryia Anatolievna Hundzina, PhD (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: hundzina@bntu.by.

**ОХРАНА ТРУДА.
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.
ЭКОЛОГИЯ**

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_84

УДК 628.3:621.3

В. Н. Штепа, С. В. Тыновец, А. Б. Шикунец

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ
ПИЩЕВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ AOPS**

V. N. Shtepa, S. V. Tynovets, A. B. Shykunets

**IMPROVED SCHEME FOR PROCESSING AQUEOUS SOLUTIONS AT FOOD
ENTERPRISES USING AOPS TECHNOLOGIES**

Аннотация

Комплексно рассмотрена проблематика комбинированной электротехнологической обработки многокомпонентных водных растворов. Из полученных анализов качества сточной воды установлены ключевые загрязнители изучаемых пищевых предприятий (сырзавод и мясокомбинат). Установлено, что ключевые загрязнители имеют биологическую природу и хорошо поддаются окислению. Обоснована комбинация различных технологий и подтверждена эффективность такого подхода результатами исследований очистки фактических сточных вод сырзавода и мясокомбината. Предложена схема локальных сооружений очистки и определена последовательность обработки водных растворов пищевых предприятий с ее использованием.

Ключевые слова:

очистка сточных вод, экологическая безопасность, ресурсоэффективность, геоэкосистемы.

Для цитирования:

Штепа, В. Н. Усовершенствованная схема обработки водных растворов пищевых предприятий с использованием технологий AOPS / В. Н. Штепа, С. В. Тыновец, А. Б. Шикунец // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 84–91.

Abstract

The problems of combined electrotechnological processing of multicomponent aqueous solutions are comprehensively considered. Based on the obtained analyses of wastewater quality, key pollutants of the food enterprises under study (a cheese factory and a meat processing plant) were determined. It was found that the key pollutants are of a biological nature and lend themselves well to oxidation. The combination of different technologies is substantiated and the effectiveness of this approach is confirmed by the studies of the processing of actual wastewater from the cheese factory and meat processing plant. A scheme for local processing facilities is proposed, and based on its use, the sequence of aqueous solution processing at food enterprises is determined.

Keywords:

wastewater treatment, environmental safety, resource efficiency, geoecosystems.

For citation:

Shtepa, V. N. Improved scheme for processing aqueous solutions at food enterprises using AOPS technologies / V. N. Shtepa, S. V. Tynovets, A. V. Shykunets // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 84–91.

Введение

Одним из наиболее экологически опасных поллютантов сточных вод пищевых предприятий, прежде всего сырзаводов и молокозаводов, является молочная сыворотка. Ее кислая среда, например, угнетает микроорганизмы, применяемые на коммунальных сооружениях биологической очистки [1]. При этом окисление органических соединений вызывает неприятный запах, кроме того, ее наличие в геоэкосистемах оказывает крайне негативное влияние на биоразнообразие водоемов, поскольку попадая в них без очистки органические вещества сыворотки потребляют для своей нейтрализации большое количество кислорода, вследствие чего резко ухудшаются условия развития флоры и фауны, в том числе рыб [2]. Также в сточных водах сырзаводов и молокозаводов содержатся растворы солей и кислот, которые используются в технологических процессах [3].

Другими значимыми пищевыми предприятиями, загрязняющими окружающую среду, с санитарно-эпидемиологической точки зрения являются сточные воды мясокомбинатов, поскольку содержат в своем составе большое количество органических и неорганических загрязнений, в том числе бактерий-возбудителей инфекционных болезней, что также негативно влияет на природные водные ресурсы и гидробионты [3, 4].

Вместе с тем среди методов обработки загрязненных водных растворов отдельным современным и динамично развивающимся направлением выделяются Advanced oxidation process (AOPs) [5], к которым относятся ряд передовых технологических решений: гомогенные и гетерогенные фотокатали-

тические процессы, озонирование, варианты процесса Фентона, ультразвуковая обработка, плазменные процессы, ферратные и персульфатные технологии, использование ионизирующего излучения и микроволновой обработки.

Так, использование реактива Фентона при облучении водного раствора ультрафиолетом (длина волны – 254 нм) и управлении значениями pH позволяет обеспечить глубокую деструкцию органических загрязнителей с эффективностью более 80 % [6].

Комбинирование ультрафиолетового облучения (длина волны – 254 нм) и внесение перекиси водорода H_2O_2 , кроме окисления загрязнителей, усиливает комплексный эффект дезинфекции обрабатываемой среды [7].

Отдельно необходимо выделить использование такого сильного окислителя, как ферраты (VI) [5], которые относятся к одному из наиболее мощных существующих окислителей и благодаря своему действию разлагают большинство токсичных химических веществ в малотоксичные продукты, а также, благодаря дезинфицирующему действию, вызывают гибель вредных микроорганизмов.

Вместе с тем необходимо отметить, что даже используемые AOPs-технологии являются интеграцией двух и более процессов. Именно поэтому проблематику очистки сточных вод необходимо рассматривать в комплексе, сочетая различные технологические решения с комбинацией методов очистки для достижения наиболее устойчивой работы очистных сооружений [8–10].

Соответственно, создание ресурсоэффективных схем обработки водных растворов предприятий пищевой промышленности при очистке много-

компонентных сточных вод и/или водо-подготовке является актуальной научно-прикладной задачей.

Материалы и методы

Из полученных на молокоперерабатывающем предприятии дискретных точечных анализов качества водных растворов можно сделать выводы касательно ключевых загрязнителей сточных вод сырзавода (согласно требований предельно допустимых концентраций):

– «фосфаты» (системное кратное превышение во всех пробоотборах – со значениями в 5,4 раза выше ПДК);

– «рН» (системное кратное превышение во всех пробоотборах (с дрейфом в «кислую сторону») – со значениями до 1,68 раза выше ПДК);

– «хлориды» (периодическое превышение – со значениями в 6 раз выше ПДК);

– «сухой остаток» (стабильное кратное превышение – со значениями до 4 раз выше ПДК);

– «взвешенные вещества» (стабильное превышение – со значениями на 6 %...79 % выше ПДК);

– «железо общее» (единичные превышения – на 58 %...78 % раз выше ПДК).

Также имеют место значительные превышения биологического потребления кислорода (БПК) и химического потребления кислорода (ХПК). Усредненные зарегистрированные величины показателей: БПК – 2400 мгО₂/л, ХПК – 3000 мгО₂/л.

Что касается показателей качества производственных сточных вод мясокомбината, то концентрации поллютантов также существенно превышают ПДК, которые установлены для отведения не только в природные водоемы, но и в коммунальные канализационные системы (табл. 1).

Табл. 1. Результаты анализа проб сточной воды мясокомбината при пиковых значениях загрязнителей

Наименование показателя	Нормативное требование (ПДК)	Качество сточной воды на входе в локальные очистные сооружения
рН среды	6,5...8,5	7,49
Фосфор общий, мг/л	5	10,7
Азот аммонийный, мг/л	35	13,1
Хлориды, мг/л	700	253,05
Взвешенные вещества, мг/л	500	1260,9
Сухой остаток, мг/л	1000	1650

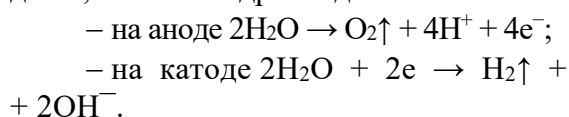
В то же время оценка соотношения БПК и ХПК для сырзавода (такое значение является интегральным показателем органического и неорганического загрязнения сточных вод) указывает на то, что ключевые поллютанты в этом сегменте имеют биологическую природу и должны эффективно подвергаться окислению

(2400 мгО₂/л / 3000 мгО₂/л = 0,8).

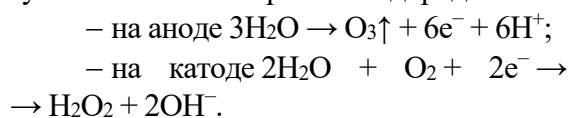
В качестве флокулирующей добавки использовался биоцидный продукт с показателями: рН = 10,47, ОВП = –21 мВ, TDS = 2870. В сточную воду обоих предприятий вносили 0,125 мл/л биоцидного флокулянта (БФ) концентрацией 1 % (в дальнейшем рабочая доза).

Для электролизной обработки водных растворов использовали диафрагменный электролизер с неактивной мембраной (анод и катод выполнены из электродного графита) объемом 3 л при силе постоянного тока 10 А. Время электролизного воздействия на водные растворы составляло 120 с. Продолжительность обработки, соответственно, количество вносимого окислителя и экспозиция облучения в единицу объема воды регулировались скоростью потока раствора через реактор. Именно в электролизере реализованы АОРs.

Основными реакциями такого электролиза сточных вод и разрушения органических загрязнителей являются образование кислорода O_2 и водорода H_2 , а также гидроксид-иона OH^- :

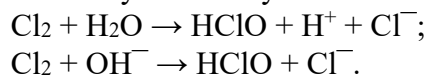


При электролизе воды также образуются озон O_3 и перекись водорода H_2O_2 :



Как ранее обозначалось, в присутствии хлоридов (находятся в сточной воде предприятия) при электролизе воды образуется растворенный хлор: на аноде $2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$.

Растворенный хлор Cl_2 , реагируя с водой и гидроксид-ионом, образует хлорноватистую кислоту $HClO$:



Разложение хлорноватистой кислоты $HClO$ в воде приводит к образованию гипохлорит-иона: $HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$.

Из приведенных выше реакций следует, что при электролизе воды образуется ряд сильных окислителей: кислород O_2 , озон O_3 , перекись водорода H_2O_2 , гипохлорит-ион OCl^- , которые выполняют деструкцию органических компонентов сточных вод.

Появление при электролизе воды OH^- -радикалов, H_2O_2 и O_3 приводит к образованию других сильных окислителей, таких как O_3^- , O_2^- , O^- , HO_2 , HO_3 , HO_4 и др.

При флотокоагуляционной обработке использовали флотокоагулятор с напорной подачей атмосферного воздуха. Режим флотокоагуляционной обработки: расход воздуха – 200 л/ч, доза реагента-коагулянта $FeCl_3$ – 40 мг/л. Также применялся озонатор авторской разработки производительностью 15 г O_3 /ч.

Задача физического моделирования процессов очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности – создание и исследования последовательности этапов использования различных технологий [11], в том числе БФ и электротехнологической обработки.

Результаты и их обсуждение

Предварительная обработка сточных вод сырзавода разными способами очистки не обеспечила требуемого качества водного раствора (табл. 2).

На основе анализа вышеуказанных данных (см. табл. 2) была обоснована комбинация способов очистки (рис. 1). Эффективность использования предложенной схемы комбинации разных способов очистки была подтверждена исследованиями очистки сточной воды сырзавода (рис. 2) и мясокомбината (табл. 3).

Соответственно, эффективность (редукция поллютантов) очистки сточных вод сырзавода по загрязнителям следующая: ХПК – 41 %, фосфору – 65 %, сухому остатку – 28 %, хлоридам – 25 %.

Основываясь на полученных результатах, предложена схема локальных сооружений очистки сточных вод сырзаводов и мясокомбинатов (рис. 3).

Табл. 2. Результаты обработки сточной воды сырзавода разными способами очистки

Номер пробы	Вид обработки	pH	ХПК, мгО ₂ /л	Азот аммонийный, мг/л	Сухой остаток, мг/л	Хлориды, мг/л
1	Исходная вода	6,2	9240	2,6	11730	1168
2	Озонирование	7	9500	3,3	11783	1179
3	Электролизное окисление (без внесения реагентов)	6,7	8160	5,3	10283	920
4	Внесение только биоцидного флокулянта	10	9540	2,2	13246	1418
5	Флотокоагуляция	6,8	9940	4,8	11850	1254

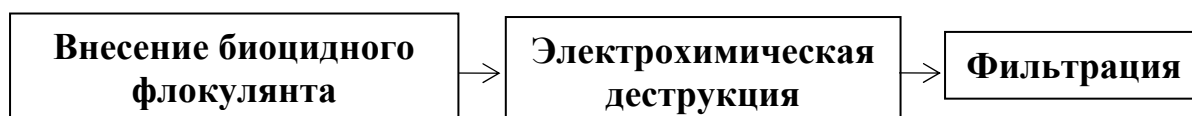


Рис. 1. Структура комбинации различных способов очистки сточных вод пищевых предприятий

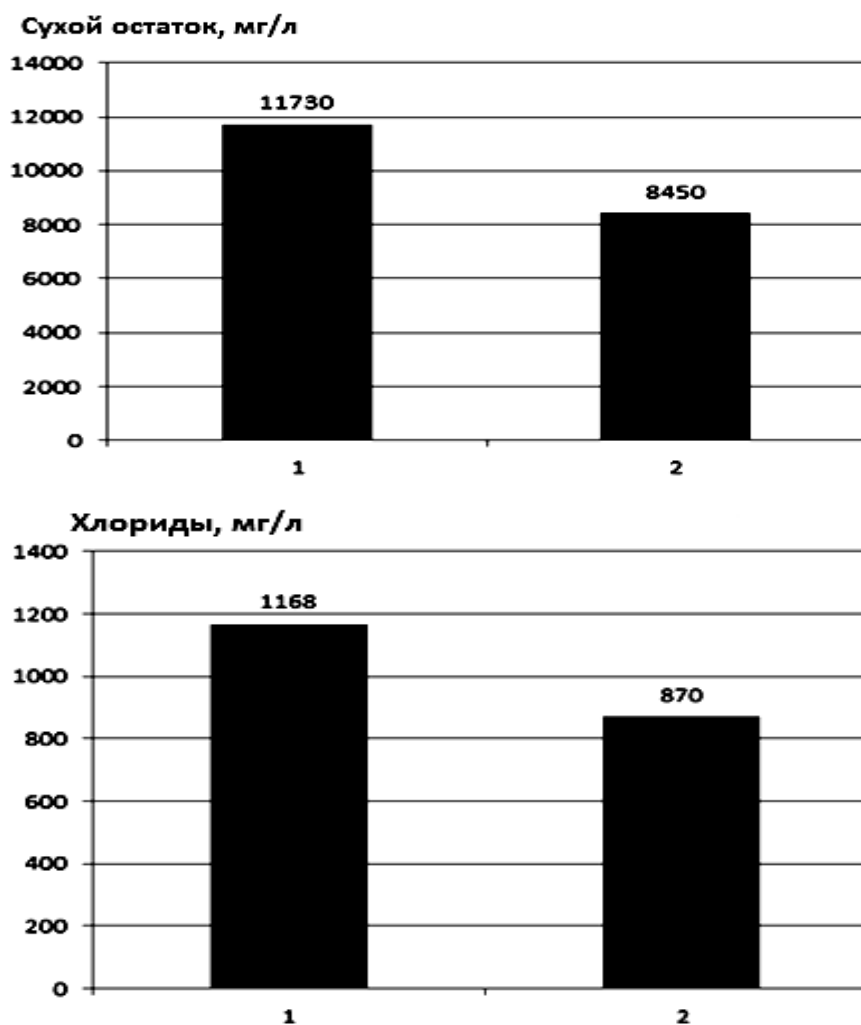
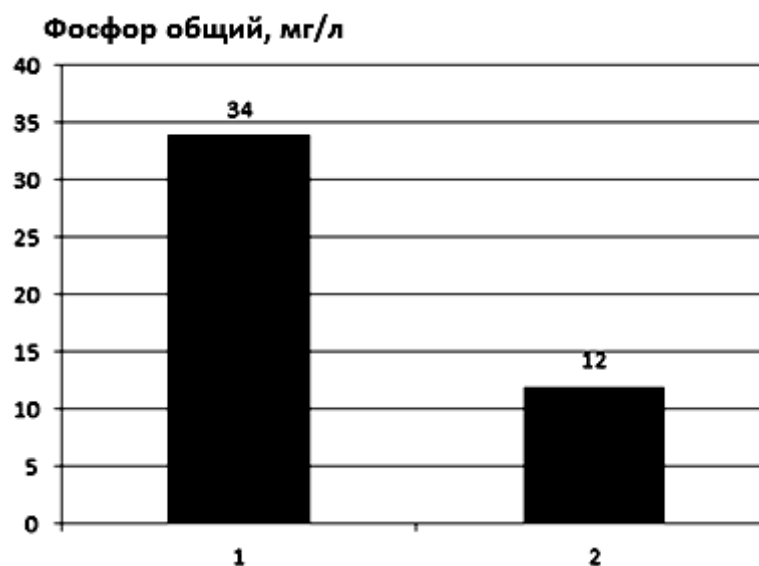


Рис. 2. Результаты очистки сточной воды сырзавода: 1 – концентрация загрязнителя до очистки; 2 – концентрация загрязнителя после очистки



Окончание рис. 2

Табл. 3. Результаты обработки сточной воды мясокомбината

Режим обработки	Фосфор, мг/л	pH	Сухой остаток, мг/л	Азот аммонийный, мг/л	ХПК, мгО ₂ /л
0 (сточная вода)	9,9	6,8	2620	12,3	1700
1 (электролиз совместно с рабочей дозой БФ)	2,4	7,4	1812	5,1	804
2 (флокоагуляция)	7,1	7,1	1944	2,6	1330
4 (электролиз совместно с двойной рабочей дозой БФ)	0,58	7,7	1781	6,2	298

Следовательно, комбинирование различных способов очистки усиливает эффективность удаления ключевых загрязнителей сточных вод, что подтверждено на примере обработки сточных вод пищевых предприятий: сырзавода и мясокомбината [12]. Представленная редукция удаления загрязнителей достигнута в промышленных условиях, что позволит значительно проще масштабировать аналогичные технологические решения на другие объекты [13]: локальные очистные сооружения и/или водоподготовку.

Функциональное описание последовательности обработки сточной воды (см. рис. 3):

- сточная вода поступает в емкость регулировки расхода, где происходит предварительная фильтрация;

- вода подается в электролизный модуль; в электролизный модуль предварительно вносится биоцидный флокулянт; далее происходят комплексные процессы окисления органических загрязнителей (AOPs), их коагулирование и флокуляция;

- на выходе электролизного модуля с использованием гидроциклонов происходит разделение взвешенных частиц и потока очищенной воды (для повышения эффективности работы флотатора);

- флотатор выполняет отделение полученных взвешенных загрязнителей от сточной воды;

- окончательно доочищаются сточные воды на фильтрующих элементах;

- продукты очистки отводятся в емкость осадка (шлама).



Рис. 3. Усовершенствованная схема локальных сооружений очистки сточных вод пищевых предприятий

Заключение

При проведении обработки сточных вод разными способами очистки отдельно не удалось достичь требуемого качества водного раствора. Была обоснована комбинация технологических решений и подтверждена эффективность такой схемы результатами исследования очистки сточной воды сырзавода и мясокомбината. На основе исследований предложенной структуры локальных сооружений очистка сточных вод пищевых предприятий определена последовательность обработки во-

дних растворов, которая обеспечивает минимизацию антропогенного воздействия на геоэкосистемы и позволяет ставить задачи выполнения требований ресурсоэффективности.

Последующие исследования обосновано нацелить на создание технологий интенсификации биологических процессов, которые происходят в водных растворах на основе воздействия физических факторов и построения математических моделей прогнозирования синергетических результатов при использовании разных способов водоподготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Храмцов, А. Г.** Промышленная переработка вторичного молочного сырья / А. Г. Храмцов, С. В. Василисин. – Москва: ДеЛи принт, 2003. – 100 с.
2. **Евдокимов, И. А.** Обработка молочного сырья мембранными методами / И. А. Евдокимов, Д. Н. Володин, М. В. Головкина // Молочная промышленность. – 2012. – № 2. – С. 34–37.
3. **Корчик, Н. М.** Технологии очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности [Электронный ресурс] / Н. М. Корчик // Сотрудничество для решения проблемы отходов: материалы 3 Междунар. конф. – Харьков, 2006. – Режим доступа: <http://www.waste/com.ua/cooperation/2006/theses/korchik.html>. – Дата доступа: 02.09.2022.
4. **Малахова, Н. Д.** Очистка сточных вод мясоперерабатывающих предприятий / Н. Д. Малахова // Мясная индустрия. – 2001. – № 5. – С. 49–51.
5. **Stasinakis, A.** Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment / A. Stasinakis // Global NEST journal. – 2008. – Vol. 10. – P. 376–385.
6. **Oliveira, L.** Digital Services in Crisis, Disaster, and Emergency Situations / L. Oliveira, F. Tajariol, L. Gonçalves // IGI Global. – 2021. – P. 411.
7. Optimization of UV/H₂O₂ and ozone wastewater treatment by the experimental design methodology / J. A. Malvestiti [et al.] // Environmental technology. – 2019. – Vol. 40. – P. 1910–1922.
8. **Мазоренко, Д. І.** Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва / Д. І. Мазоренко, В. Г. Цапко, Ф. І. Гончаров. – Київ: Знання, 2006. – 376 с.
9. **Штепа, В. Н.** Концепция управления оборудованием водоочистки с учетом доминирующего загрязнителя / В. Н. Штепа, А. П. Левчук // Агропанорама. – 2018. – № 5. – С. 33–38.
10. **Штепа, В. М.** Обґрунтування та розробка критерію енергоефективності функціонування електротехнологічних систем водопідготовки / В. М. Штепа, Ф. І. Гончаров, М. А. Сироватка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК: зб. наук. пр. – Київ: НУБіПУ, 2011. – Вип. 161. – С. 187–193.
11. **Штепа, В. М.** Обґрунтування робочої міри ефективності електротехнологічної водоочистки [Електронний ресурс] / В. М. Штепа // Енергетика і автоматика. – 2018. – № 4. – С. 99–111. – Режим доступа: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11558>. – Дата доступа: 27.05.2022.
12. **Штепа, В. Н.** Адаптивные решения интеллектуального управления очистными сооружениями / В. Н. Штепа, Н. А. Заец, Д. Г. Алексеевский // Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении: сб. тр. / Ин-т ЖКХ ПАП Беларуси; под общ. ред. В. О. Китикова. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 281–287.
13. **Shtepa, V. N.** Preventive improvement of wastewater treatment efficiency / V. N. Shtepa, Ye. Yu Chernysh, D. V. Danilov // Journal of Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 8, iss. 1. – P. H8–H15.

Статья сдана в редакцию 14 октября 2022 года

Владимир Николаевич Штепа, д-р техн. наук, доц., проректор по научной работе, Полесский государственный университет. E-mail: shtepa.v@polessu.by.

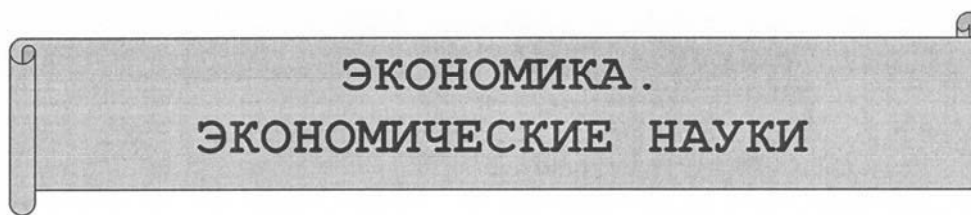
Сергей Васильевич Тыновец, ст. преподаватель, Полесский государственный университет.

Алексей Борисович Шикунец, магистрант, Полесский государственный университет.

Vladimir Nikolayevich Shtepa, DSc (Engineering), Associate Prof., Pro-Rector for Research, Polessky State University. E-mail: shtepa.v@polessu.by.

Sergey Vasilievich Tynovets, senior lecturer, Polessky State University.

Alexey Borisovich Shykunets, MSc (Engineering), Polessky State University.



DOI: 10.53078/20778481_2022_4_92

УДК 338.47

Т. М. Лобанова, Т. В. Пузанова

ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК В РЕГИОНЕ

T. M. Lobanova, T. V. Puzanova

TRENDS AND PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF CARGO TRANSPORTATION IN THE REGION

Аннотация

Проведены анализ развития автомобильных грузоперевозок в Республике Беларусь и Могилевской области с целью определения существующих тенденций и выявления проблем, анализ структуры объемов грузоперевозок, динамики грузооборота наиболее значимых видов транспорта, взаимосвязи в динамике количества грузовых автомобилей различных форм собственности и грузооборота, детерминированный факторный анализ влияния объема перевозок и среднего расстояния на грузооборот автомобильного транспорта, анализ показателей экономического состояния транспортной системы и ее внешнеэкономической деятельности по республике в целом и по Могилевскому региону. По результатам анализа обозначены проблемы и пути развития транспортного комплекса.

Ключевые слова:

грузоперевозки, автомобильный транспорт, транспортные услуги, экспорт.

Для цитирования:

Лобанова, Т. М. Тенденции и проблемы развития грузоперевозок в регионе / Т. М. Лобанова, Т. В. Пузанова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 92–101.

Abstract

The article considers the development of road freight transportation in the Republic of Belarus and the Mogilev region in order to determine existing trends and identify problems. The authors analyzed the structure of cargo transportation volumes, the dynamics of freight turnover of the most significant modes of transport, the interconnections in the dynamics of the number of trucks of various forms of ownership and freight turnover, and carried out a deterministic factor analysis of the impact of traffic volume and average distance on freight turnover of the road transport, as well as an analysis of indicators of the economic state of the transport system and its foreign economic activity in the republic as a whole and in the Mogilev region. Based on the results of these analyses, the problems and ways of developing the transport complex are determined.

Keywords:

cargo transportation, road transport, transport services, export.

For citation:

Lobanova, T. M. Trends and problems in the development of cargo transportation in the region / T. M. Lobanova, T. V. Puzanova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 92–101.

В настоящее время транспортная система любого региона, в том числе и Республики Беларусь, являясь важнейшим звеном его экономико-социальной инфраструктуры, существенным образом влияет на состояние экономики региона, обеспечивает его функционирование и развитие. Существенным фактором роста экономики Республики Беларусь является ее геополитическое месторасположение и продолжающаяся глобализация мирохозяйственных связей. Республика Беларусь в силу своего географического положения выступает связующим звеном между Европейским союзом с совокупным ВВП около 14,5 трлн евро и странами Юго-Восточной Азии с совокупным ВВП более 36 трлн долл. США. Через территорию Беларуси осуществляется большой объем транзитных автоперевозок. Протяженность транспортных коридоров, проходящих через территорию РБ, составляет более 1 500 км.

Стратегической целью развития транспорта в современных условиях является наиболее полное удовлетворение потребностей субъектов хозяйствования и населения в качественных видах услуг с учетом обеспечения безопасности и повышения эффективности его функционирования, конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках, внедрения ресурсосберегающих и экологически чистых технологий перевозочных процессов.

Транспортный комплекс Республики Беларусь представлен такими видами транспорта, как автомобильный, внутренний водный, воздушный, железнодорожный, трубопроводный, а также городской электрический и метрополитен.

По итогам 2021 г. доля транспортной отрасли в валовом внутреннем продукте Республики Беларусь составила 5,1 %. Транспортные услуги формируют почти 43 % общего объема экспорта услуг страны и около 41 % сальдо внешней торговли услугами. За 2021 г.

экспорт транспортных услуг составил 4,39 млрд долл., положительное сальдо внешней торговли транспортных услуг – 1,88 млрд долл. [1].

Автомобильный транспорт занимает лидирующую позицию по объему перевозок пассажиров и грузов в транспортной системе Республики Беларусь. В 2021 г. автомобильным транспортом перевезено 154,8 млн т грузов и более 1 млн пассажиров. В сочетании с городским электрическим транспортом и метро он перевозит около 96 % общего количества пассажиров.

Анализ структуры объемов грузоперевозок за период 2000–2021 гг. показал, что из пяти видов транспорта только три обеспечивают почти 99 % объемов перевозимых грузов (рис. 1).

При этом начиная с 2005 г. увеличивается доля автомобильных грузоперевозок и автомобильный транспорт приобрел наибольшую значимость (40 %) в структуре грузоперевозок. Доля железнодорожного транспорта все эти годы находится примерно на одном уровне, при этом уменьшается доля транспортировки через трубопроводы.

Важнейшим показателем транспортной системы, отражающим объем работы транспорта по перевозке груза, является грузооборот. Результаты анализа динамики грузооборота железнодорожного, трубопроводного и автомобильного транспорта представлены в табл. 1.

Наиболее динамично развивается автомобильный транспорт. Это единственный вид транспорта с низким порогом входа в отрасль в отличие от железнодорожного и авиатранспорта и, следовательно, доступный для малого бизнеса.

Основу транспортного комплекса составляют юридические лица и индивидуальные предприниматели, оказывающие транспортные и сопутствующие услуги. В сфере транспортного комплекса Республики Беларусь по состоянию на 1 января 2021 г. функцио-

нирует около 10,8 тыс. организаций различных форм собственности и около 36 тыс. индивидуальных предпринимателей [2]. Их количество представлено в табл. 2. Начиная с 2017 г. прослеживаются тенденция сокращения

организаций сухопутного транспорта и одновременный рост количества субъектов в области складирования и вспомогательной транспортной деятельности. В этот период строятся крупные транспортно-логистические центры.

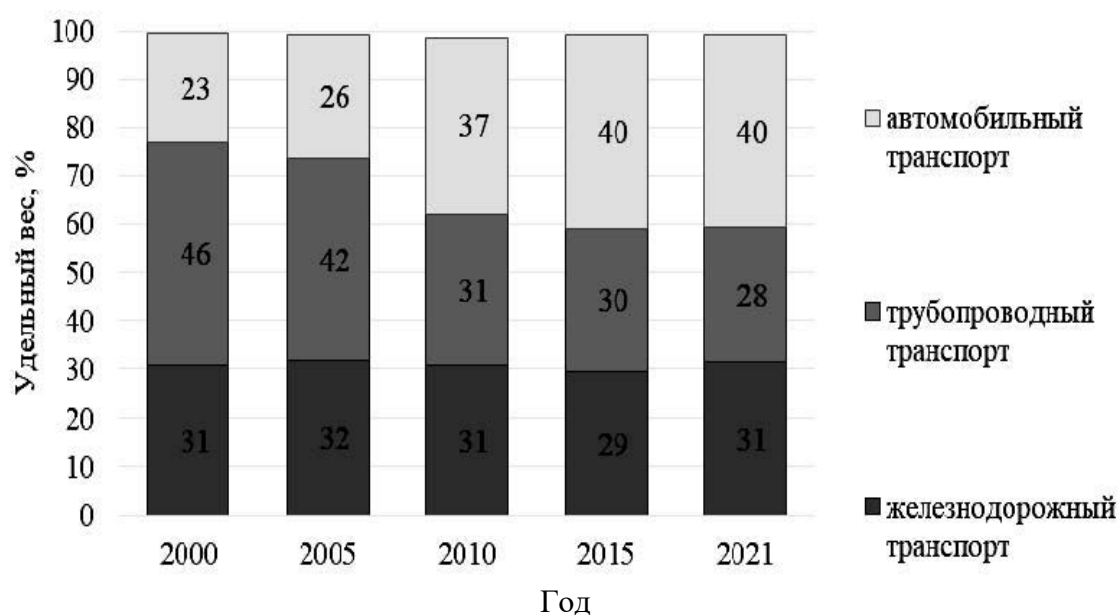


Рис. 1. Структура объемов грузоперевозок по видам транспорта

Табл. 1. Анализ динамики грузооборота железнодорожного, трубопроводного и автомобильного транспорта

В миллионах тонно-километров

Вид транспорта	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2021 г.	График
Железнодорожный транспорт	31 425,1	43 559,3	46 224,3	40 784,5	42 420,4	44 478,2	
Темп роста, %		138,6	106,1	88,2	104,0	104,9	
Трубопроводный транспорт	52 659,3	74 260,6	65 743,4	60 552,3	51 853,9	44 577,9	
Темп роста, %		141,0	88,5	92,1	85,6	86,0	
Автомобильный транспорт	5 025,8	9 351,1	16 023,1	24 523,4	28 777,6	29 593,5	
Темп роста, %		186,1	171,3	153,1	117,3	102,8	

Табл. 2. Число организаций транспорта

Показатель	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Число организаций, всего	11 685	11 813	11 476	11 216	10940	10 812
В том числе по видам деятельности: деятельность сухопутного и трубопроводного транспорта	9 859	9 988	9 630	9 336	9039	8 889
деятельность водного транспорта	6	7	4	5	4	4
деятельность воздушного транспорта	18	19	21	19	18	18
складирование и вспомогательная транспортная деятельность	1 802	1 799	1 821	1 856	1879	1 901

Исследование уровня конкуренции в транспортном секторе Республики Беларусь свидетельствует о том, что в последние годы в стране создана достаточно конкурентная среда. На рынке транспортных услуг представлены как государственные, так и частные компа-

нии. На рис. 2 представлено, как изменялись объемы грузооборота, среднее расстояние перевозок и количество грузовых транспортных средств, принадлежащих организациям и частным лицам.

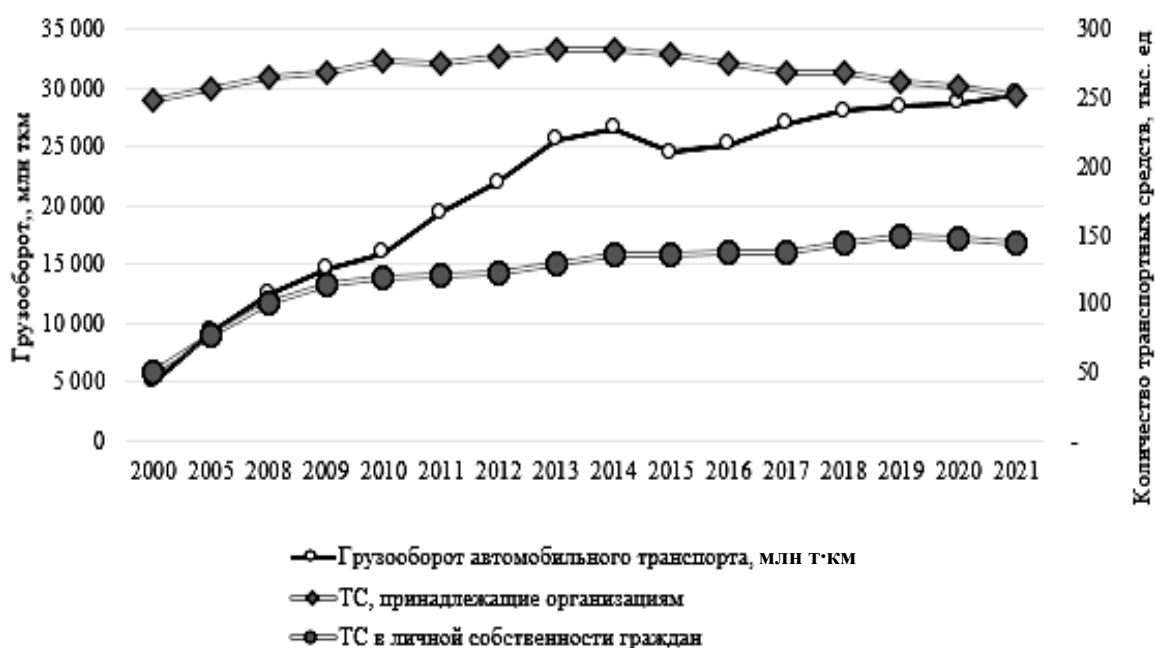


Рис. 2. Изменение грузооборота и количества грузовых автомобилей

Если в организациях этот показатель существенно не изменялся, а с 2014 г. наблюдается небольшое, но стабильное его уменьшение, то частный бизнес более гибко отреагировал на возросший спрос на автомобильные грузоперевоз-

ки. С 2000 г. по 2014 г. количество грузовых автомобилей, принадлежащих частным лицам, увеличилось почти в 3 раза, а в период с 2014 г. по 2021 г. их количество увеличилось еще на 8 714 автомобилей, в то время как

количество грузовых транспортных средств организаций сократилось на 33 100 автомобилей. Кроме того, уменьшается количество грузовых автомобилей в транспортных организациях Минтранса. Потребность в грузоперевозках в большей мере удовлетворяется собственным транспортом про-

изводственных организаций и транспортом негосударственной формы собственности.

На рис. 3 представлена динамика показателей грузоперевозок автомобильного транспорта Республики Беларусь и Могилевской области за период 2005–2020 гг. [2].



Рис. 3. Показатели грузоперевозок автомобильным транспортом

Следует отметить, что наблюдается постоянный рост дальности перевозок, которая за последние 20 лет увеличилась более чем в 2 раза. При этом высокие темпы роста объемов перевозимых грузов, которые наблюдались вплоть до 2011 г., сменились постоянным спадом в среднем на 2 %...3 % в год. Небольшие частные автотранспортные организации и индивидуальные предприниматели в сфере грузоперевозок ориентируются именно на дальние перевозки. Если сравнить график количества грузовых транспортных средств в личной собственности (см. рис. 2) и график среднего расстояния (см. рис. 3), то видно, что активный рост объемов до 2011 г. сопровождался активным ростом количества автомобильных транспортных средств в личной собственности граждан. Дальней-

ший же рост грузооборота при снижающихся объемах был обусловлен увеличением дальности маршрутов.

Анализ динамики показал, что до 2015 г. грузооборот автомобильного транспорта рос высокими темпами. Дальше наступил некоторый спад экономического развития у основных торговых партнеров Беларуси, что сказалось на потребности в перевозках грузов. Для поддержания деловой активности в данной сфере произошла диверсификация рынков транспортных услуг в пользу развития перевозок на дальние расстояния. Таким образом, несмотря на продолжающийся до сих пор спад объемов перевозок, положительная динамика грузооборота с 2016 г. восстановилась за счет увеличения удельного веса перевозок на дальние расстояния. Определенную роль в этом сыграли

взаимодействия государств Евразийского экономического союза (ЕАЭС), в состав которого с 2015 г. входят Россия, Беларусь, Армения, Казахстан и Кыргызстан.

Влияние объема перевозок и сред-

него расстояния на грузооборот автомобильного транспорта по стране в целом и по Могилевскому региону определено с помощью методов детерминированного факторного анализа (рис. 4).

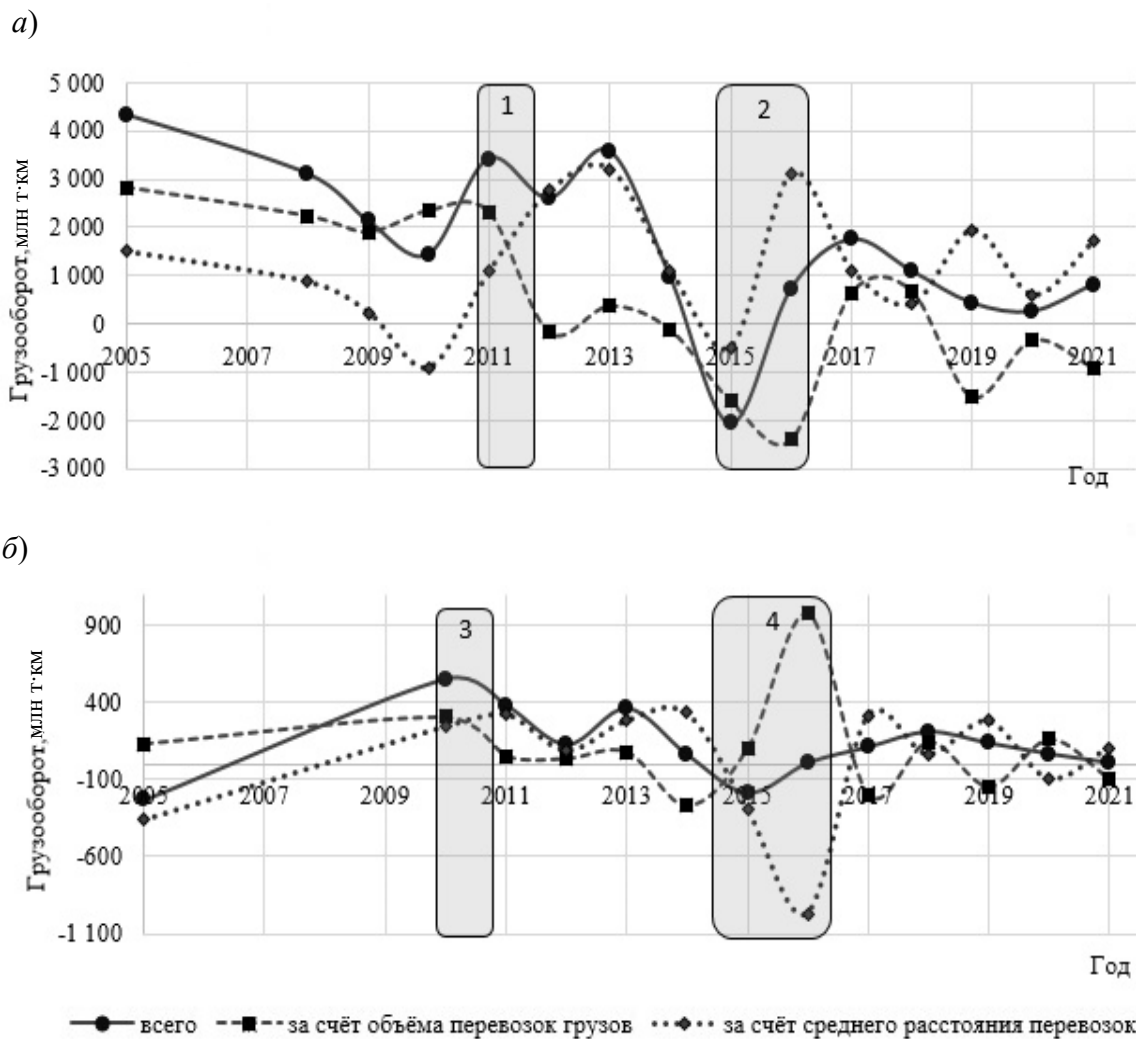


Рис. 4. Факторный анализ динамики грузооборота автомобильного транспорта: а – Республика Беларусь; б – Могилевская область

Анализ результатов показал, что с 2011 г. определяющее влияние на грузооборот Республики Беларусь начала оказывать увеличивающаяся дальность перевозок (на рис. 4 это соотношение факторов отмечено выделенной на графике областью 1) как следствие влияния мирового финансового кризиса 2008–2009 гг. При этом в Могилевском регионе такое влия-

ние проявилось на год раньше, в 2010 г. (на рис. 4 это соотношение факторов отмечено выделенной на графике областью 3). Негативное влияние геополитической ситуации 2015 г. на грузооборот постепенно ослабло за счет активного роста дальности грузоперевозок в стране (на рис. 4 это соотношение факторов отмечено на графике областью 2), а в Мо-

гилевской области, наоборот, в этот период существенно повлияли объемы (выделенная область 4). Период пандемии 2020–2021 гг. этот рост нивелировал.

Наряду с вышеприведенными показателями результативности грузового автомобильного транспорта, не менее важными являются экономические пока-

затели, характеризующие развитие организаций транспортной системы.

В табл. 3 приведены показатели, характеризующие экономическое состояние транспортной системы Могилевской области, в табл. 4 отражена доля транспортной системы в экономике указанного региона за период 2015–2021 гг.

Табл. 3. Основные экономические показатели организаций транспортной системы Могилевской области за период 2015–2021 гг.

Показатель	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Количество организаций	1 153	1 121	1 091	1 087	1 047	1 008	985
Валовая добавленная стоимость, млн р.	356,3	363,5	420,1	494,1	512,4	504,9	501,3
Численность работников, чел.	21 486	21 693	21 585	21 310	21 002	19 999	19 440
Объем инвестиций в основной капитал, млн р.	374,8	194,3	59,9	75,4	86,5	157,1	206,0
Выручка от реализации продукции, товаров, работ, услуг, млн р.	516,5	627,6	661,8	718,3	875,7	782,0	783,4
Чистая прибыль, млн р.	54,6	29,2	18,6	9,9	6,7	–30,1	–20,1
Удельный вес убыточных организаций, %	21,7	16	15,3	12,9	16,7	24,6	23,7
Рентабельность продаж, %	7,9	9	9,8	9,9	3,6	2,2	2,3

Табл. 4. Доля транспортной системы в экономике региона за период 2015–2021 гг.

В процентах

Показатель	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Количество организаций	9,1	9,2	9	9,2	8,7	8,4	8,3
Валовая добавленная стоимость	5,7	5,5	5,7	6,0	5,9	5,2	3,7
Численность работников	5,8	5,8	5,9	5,9	5,9	5,8	5,7
Объем инвестиций в основной капитал	20,7	14,2	4,8	4,4	4,2	7,7	9,1
Выручка от реализации продукции товаров, работ, услуг	3,9	4,1	4,0	4,0	4,3	3,7	3,8

В рассматриваемом периоде основные экономические показатели организаций транспортной системы Могилевской области имели устойчивый рост вплоть до периода пандемии, когда снижение результативности деятельности привело к росту убыточных организаций, сокращению численности рабо-

тающих и существенному снижению рентабельности продаж. При этом в 2020–2021 гг. наблюдался рост объема инвестиций в основной капитал транспортной системы Могилевского региона.

Во внешнеэкономической деятельности в целом по республике оборот транспортных услуг (ТУ) за 2021 г.

составил более 42 % [1]. В табл. 5 и 6 представлены данные по результатам внешнеэкономической транспортной деятельности за период 2015–2021 гг. по Республике Беларусь в целом и по Могилевской области.

В последние несколько лет Могилевская область активно наращивает

экспорт транспортных услуг в страны СНГ. С 2015 г. до 2019 г. их объем вырос почти в 2 раза с 17,5 млн долл. США до 33,1, в 2020 г. из-за пандемии немного сократился. Импорт транспортных услуг все эти годы в 2,7–3,3 раза меньше экспорта, что обеспечивает стабильно положительное сальдо (рис. 5).

Табл. 5. Экспорт и импорт услуг Республики Беларусь по транспортной деятельности

В миллионах долларов США

Показатель	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Оборот	5 294,9	3 807,9	4 164,4	4 214,7	5 000,7	5 632,0	5 843,4
Экспорт	3 870,7	3 807,9	2 992,6	2 993,9	3 535,4	3 933,5	4 027,8
Импорт	1 424,2	1 521,7	1 171,8	1 220,8	1 465,4	1 698,6	1 815,6
Сальдо	2 446,5	2 286,2	1 820,8	1 773,0	2 070,0	2 234,9	2 212,2

Табл. 6. Экспорт и импорт транспортных услуг Могилевской области

Показатель	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Экспорт ТУ, млн долл. США	29,7	30,4	35,1	39,5	51,1	49,9
В том числе:						
страны СНГ	17,5	18,6	21,9	23,3	33,1	30,8
страны вне СНГ	12,2	11,9	13,2	16,2	18,0	19,2
Соотношения экспорта ТУ в страны СНГ и в другие страны	1,43	1,57	1,66	1,44	1,83	1,61
Импорт ТУ, млн долл. США	7,7	10,6	13,8	14,7	15,9	15,3
В том числе:						
страны СНГ	3,8	6,1	7,1	8,6	9,8	10,5
страны вне СНГ	3,9	4,5	6,7	6,1	6,1	4,8
Соотношения импорта ТУ из стран СНГ и из других стран	0,99	1,35	1,06	1,43	1,62	2,20

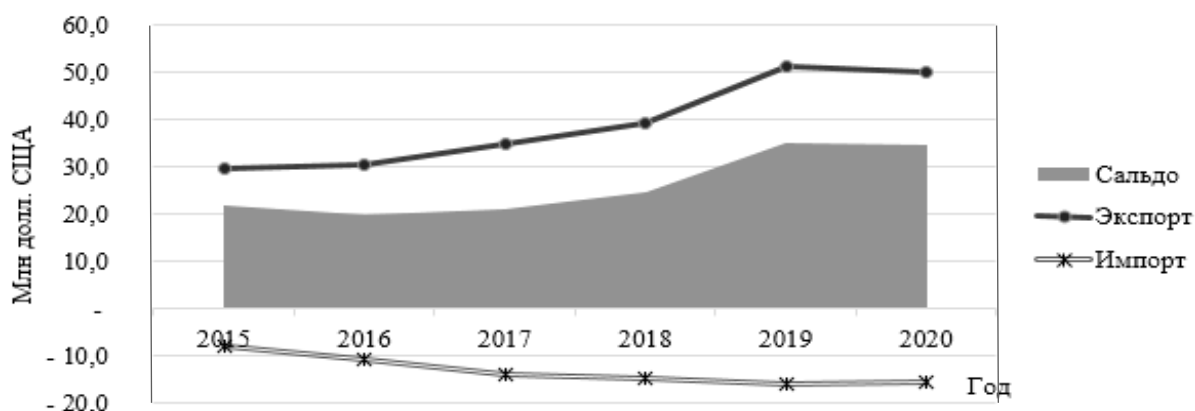


Рис. 5. Экспорт и импорт транспортных услуг субъектами хозяйствования Могилевской области

Однако, несмотря на позитивную динамику по данному направлению ВЭД, вклад Могилевской области в аналогичные показатели в масштабе страны составляет всего 1,2 %...1,4 %. Активно развиваемая ориентация на восточное направление должна способствовать развитию транспортной сферы области.

Аналитики в области автотранспортных перевозок в Республике Беларусь проводят постоянный мониторинг состояния этой отрасли. В результате выявлено снижение во II квартале 2022 г. общего количества заявок на международные перевозки из других стран по сравнению с I кварталом на 7 % и сокращение в перевозках из Беларуси в другие страны на 9 %, хотя по сравнению с предыдущим, 2021 г., наметился небольшой рост – 6 %. Кроме этого, опрос клиентов услуг международной биржи автомобильных грузоперевозок ATLSU, проведенный во втором полугодии 2022 г., показал, что более 40 % респондентов считают, что с развитием перевозок железнодорожным транспортом в азиатском направлении и морским с использованием российских портов в Санкт-Петербурге и Мурманске на рынке автотранспортных перевозок останутся только крупные транспортные организации. Треть опрошенных не ожидают существенных изменений, а оставшаяся четверть, наоборот, считает, что рост морских грузоперевозок создаст дополнительный спрос на автомобильные грузоперевозки из Беларуси для доставки грузов в российские порты. Такого же мнения придерживаются и эксперты в области международных автомобильных перевозок, которые отмечают возросшее внимание белорусского правительства к проблемам транспортной отрасли уже с момента введения санкций, активную работу с Российской Федерацией, а также с Китаем, Узбекистаном, Туркменистаном, Азербайджаном, Арменией, Монголией и другими странами Азии.

Так, в соответствии с разработанной Государственной программой развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2021–2025 гг. определены его приоритетные направления [3]. Увеличение доли транспортных средств, обеспечивающих международные перевозки экологического класса EURO-6 в общем объеме всех приобретенных тягачей, проведение согласованной транспортной политики в рамках ЕАЭС, переход до 2025 г. на безразрешительную систему в/из третьих стран для автомобильных перевозчиков грузов, внедрение электронных и информационных технологий в систему международных дорожных перевозок будут способствовать ускоренному привлечению иностранных инвестиций в данную сферу. Международные грузоперевозки автотранспортом занимают в Беларуси 2-е место в экспорте услуг, уступая лишь экспорту услуг в IT-секторе. В 2019 г. ратифицированы соглашения о международных автомобильных перевозках с Китаем, Великобританией, Францией, а также внесены изменения и дополнения в соглашения о международных автомобильных перевозках с Республикой Молдова, Кыргызской Республикой и Узбекистаном. По данным Ассоциации международных автомобильных перевозчиков «БАМАП», грузоперевозчики обеспечивают 98 % валютных поступлений в объеме экспорта услуг автомобильного транспорта.

Дальнейшее развитие транспортного комплекса Республики Беларусь обусловлено глобальными процессами цифровизации всех сфер экономики. Чтобы отвечать международным требованиям к транспортно-логистическим системам, следует уделять внимания таким направлениям, как:

- создание высокотехнологичных логистических объектов, соответствующих уровню логистического сервиса не ниже 3PL;
- развитие придорожного сервиса;

– активное использование современных информационных технологий мониторинга транспортных средств, программ оптимизации загрузки транспортных средств и планирования маршрутов;

– активное взаимодействие с субъектами малого предпринимательства по всем направлениям транспортно-логистической деятельности;
– привлечение частных инвестиций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://belstat.gov.by>. – Дата доступа: 10.09.2022.
2. Статистический ежегодник Могилевской области, 2021 [Электронный ресурс]: стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://mogilev.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 10.09.2022.
3. О Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 23 марта 2021 г., № 165. – Режим доступа: <https://pravo.by>. – Дата доступа: 10.09.2022.
- 4 Review of the Transport and Logistics System of the Republic of Belarus [Electronic resource]. – Mode of access: <https://unece.org> – Data of access: 15.09.2022.

Статья сдана в редакцию 3 октября 2022 года

Татьяна Михайловна Лобанова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: yatm@rambler.ru.

Татьяна Владимировна Пузанова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: puzanovat@tut.by.

Tatyana Mikhailovna Lobanova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: yatm@rambler.ru.

Tatyana Vladimirovna Puzanova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: puzanovat@tut.by.

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_102

УДК 656.0

Т. В. Романькова

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК В РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

T. V. Romankova

METHODOLOGICAL APPROACHES TO MONITORING CARGO TRANSPORTATION IN THE REGIONAL TRANSPORT SYSTEM

Аннотация

Рассмотрена сущность и структура транспортной системы региона. Выделены направления и описана последовательность ведения мониторинга региональной транспортной системы. Обоснованы показатели мониторинга грузовых перевозок и разработана методика оценки уровня развития транспортной системы региона.

Ключевые слова:

мониторинг, эффективность, транспортная система, транспортное средство, регион, показатели, транспортная доступность и обеспеченность, густота транспортной сети, грузооборот, объем груза.

Для цитирования:

Романькова, Т. В. Методические подходы к мониторингу грузовых перевозок в региональной транспортной системе / Т. В. Романькова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 102–109.

Abstract

The article considers the essence and structure of the regional transport system. Directions are determined and the sequence of monitoring the transport system of the region is described. Indicators for monitoring cargo transportation are substantiated and a methodology for assessing the level of development of the regional transport system is presented.

Keywords:

monitoring, efficiency, transport system, vehicle, region, indicators, transport accessibility and provision, transport network density, freight turnover, cargo volume.

For citation:

Romankova, T. V. Methodological approaches to monitoring cargo transportation in the regional transport system / T. V. Romankova // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 102–109.

Введение

Транспортная система региона представляет собой совокупность системообразующих элементов, которые, объединяя все виды транспорта, развитые в данном регионе, способствуют реализации транспортно-экономических связей, повышению уровня региональ-

ного социально-экономического развития и оптимальному распределению ресурсов (материальных, сырьевых, трудовых и др.) в границах региона.

Основной задачей транспортной системы региона является качественное и своевременное удовлетворение потребностей потребителей в перевозках. Проблемой изучения показателей мони-

торинга и структуры транспортных систем посвящены работы зарубежных и отечественных авторов: Н. В. Гришиной, Е. А. Перебатовой, А. Э. Горева, О. В. Поповой, Е. В. Лукина, Т. В. Усковой, А. А. Михальченко, Р. Б. Ивутя, И. А. Елового, А. С. Зиневича и др. [1–5, 8].

В результате изучения литературных источников установлено, что сформировался единый подход к структуре транспортной системы (она представлена следующими элементами: транспортная инфраструктура региона; транспортные предприятия, действующие в регионе; транспортные средства региона; региональное управление транспортной системой), но отсутствует общий методический подход к мониторингу транспортной системы (ТС).

Основная часть

Для повышения эффективности работы транспортной системы и социально-экономического развития региона предлагается осуществлять отдельно мониторинг грузового и пассажирского транспорта по следующим направлениям:

1) наличие, т. е. для разработки мероприятий и стратегических планов по совершенствованию функционирования элементов транспортной системы первоначально необходимо оценить их наличие и присутствие в регионе;

2) объем работ, описывающий (характеризующий), насколько транспортная система региона соответствует интересам потребителей и учитывает их требования к качеству оказываемых услуг. Поэтому рост показателей, характеризующих объем выполненных работ, свидетельствует об удовлетворенности потребителей транспортными услугами и о повышении их качества;

3) эффективность использования, т. е. показатели объема работ на транспорте, повышение качества оказываемых услуг непосредственно влияют на величину затрат и финансовые резуль-

таты. Поэтому для дальнейшего развития и повышения конкурентоспособности транспортной системы региона необходимо оценивать эффективность функционирования каждого ее компонента;

4) безопасность и экологичность, т. е. транспортная система, удовлетворяя потребности клиентов в перевозке, должна обеспечивать максимальную защиту транспортных средств, грузов, пассажиров и объектов транспортной инфраструктуры и минимальное воздействие на окружающую среду.

На основании элементов и выделенных направлений мониторинга транспортной системы региона формируется последовательность его ведения на основе комплексного подхода (рис. 1).

Первым и важнейшим элементом ТС является транспортная инфраструктура региона, обеспечивающая перевозку грузов. Она состоит из:

– транспортной сети (автомобильные дороги, железнодорожные пути, магистральные трубопроводы, водные судоходные пути);

– железнодорожных станций (грузовые, сортировочные, товарные), речные порты, аэродромы;

– мостов, тоннелей;

– транспортно-логистических центров, транспортных узлов, складов и др.

Наличие транспортной инфраструктуры можно оценить протяженностью всех видов дорог в регионе и количеством объектов транспортной инфраструктуры, способствующих рациональному перемещению грузов.

Однако данные показатели не отражают в полной мере уровень обеспеченности транспортной сетью в разрезе регионов, не позволяют провести сравнительный анализ и разработать стратегию развития.

Поэтому предлагается использовать для оценки наличия показатели густоты транспортной сети (формулы Э. Ангеля и Ю. И. Успенского) [7]. Они являются важными индикаторами уров-

ня обеспеченности территорий путями сообщений различных видов транспорта, используемых для перевозки грузов. Но для определения уровня комплексного показателя густоты сети различных видов транспорта целесообразно использовать формулу Л. И. Василевского, согласно которой учитывается приведен-

ная длина путей сообщения $L_{ПРИВ}$, км, обжитая площадь рассматриваемого региона S , км², и объем перевезенных грузов в регионе Q , тыс. т, [7]:

$$d_{Кж} = \frac{L_{ПРИВj}}{\sqrt[3]{S_j H_j Q_j}}. \quad (1)$$

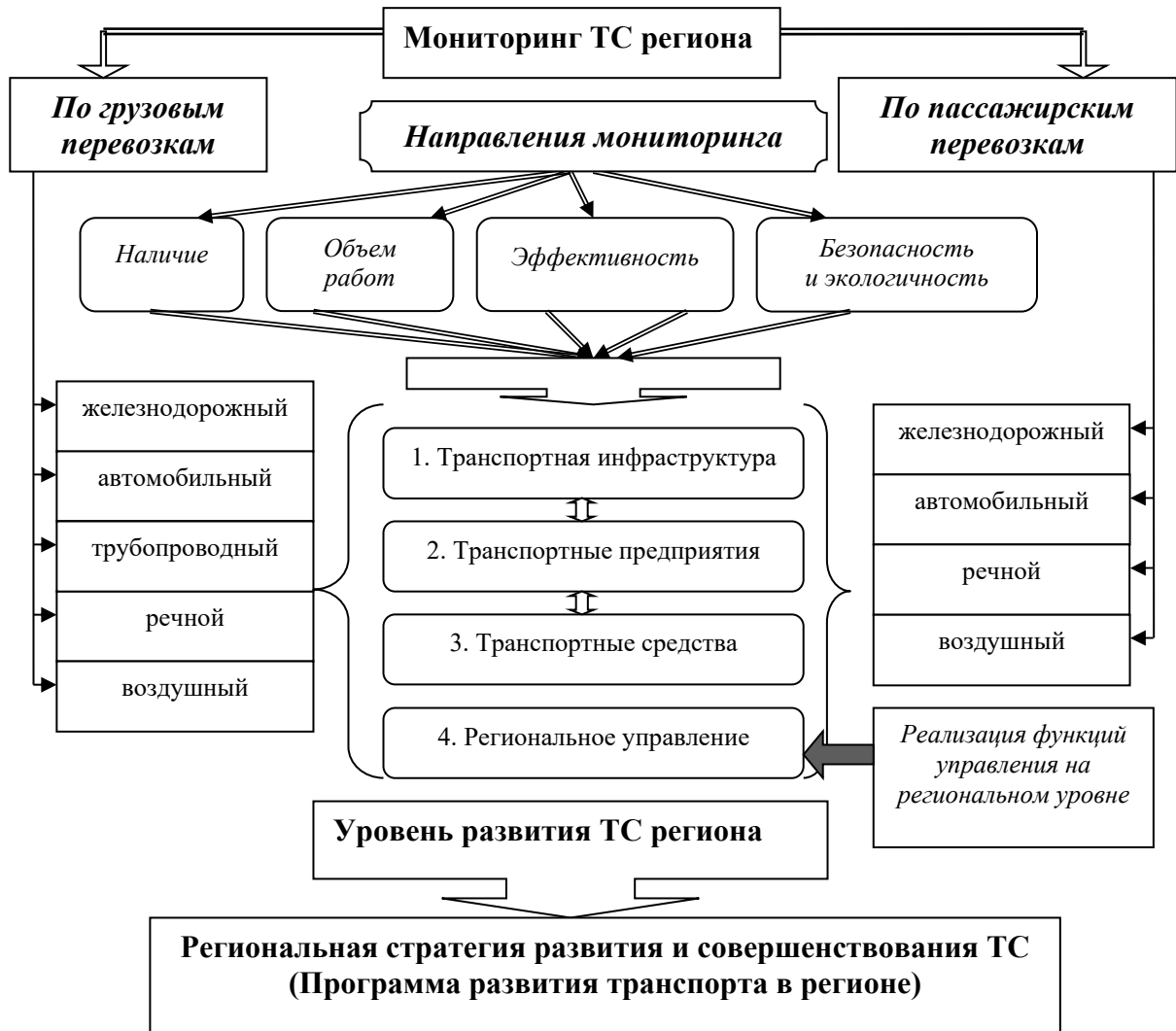


Рис. 1. Комплексный подход к ведению мониторинга грузовых перевозок

В ней обоснованы коэффициенты приведения транспортных линий к 1 км железных дорог с учетом сопоставимых уровней их пропускной и провозной способности: для усовер-

шенствованной автомагистрали – 0,45; для автодороги с обычным твердым покрытием – 0,15; для речного пути – 0,25; для магистрального газопровода – 0,30; для нефтепровода

среднего диаметра – 1,0.

Наличие складов, логистических центров и железнодорожных станций предлагается оценивать их количеством, а также:

– удельным объемом оказанных логистических услуг логистическим центром в j -м регионе:

$$Уд_{ОБ\ j} = \frac{ОБ_{ЛГ.УСЛ\ j}}{K_{ЛЦ\ j}}, \quad (2)$$

где $ОБ_{ЛГ.УСЛ\ j}$ – объем логистических услуг, оказанных логистическими центрами j -го региона, млн р.; $K_{ЛЦ\ j}$ – количество логистических центров в j -м регионе;

– удельным складским объемом склада в регионе j [6]:

$$Уд_{ОБ.СКЛ\ j} = \frac{ОБ_{СКЛ\ j}}{K_{СКЛ\ j}}, \quad (3)$$

где $ОБ_{СКЛ\ j}$ – складской объем j -го региона, тыс. м³; $K_{СКЛ\ j}$ – количество складов в j -м регионе;

– удельным объемом переработанных грузов железнодорожной станцией в j -м регионе:

$$Уд_{ОБ.ЖД\ j} = \frac{ОБ_{ЖД\ j}}{K_{ЖД\ j}}, \quad (4)$$

где $ОБ_{ЖД\ j}$ – объем грузов, переработанных железной дорогой j -го региона, тыс. т; $K_{ЖД\ j}$ – количество грузовых станций в j -м регионе.

Объем работ транспортной инфраструктуры предлагается оценить грузоемкостью валового регионального продукта. Применение данного показателя обусловлено тем, на территории региона располагаются организации различных отраслей экономики, каждая из которых использует транспортную

инфраструктуру при закупке материальных, сырьевых ресурсов и реализации готовой продукции (работ, услуг) и вносит вклад в развитие экономики региона. Он рассчитывается по формуле

$$\Gamma_{EMj} = \frac{\Gamma_{ПРИВj}}{ВРП\ j}, \quad (5)$$

где Γ_{EMj} – грузоемкость экономики j -го региона, т·км/млн р.; $\Gamma_{ПРИВj}$ – грузооборот j -го региона, т·км; $ВРП\ j$ – валовой региональный продукт j -го региона, млн р.

Эффективность эксплуатации транспортной инфраструктуры предлагается оценивать удельным тоннажем, пропущенным по путевой инфраструктуре при грузовых перевозках:

$$Уд.m\ j = \frac{\sum T_{ГРij}}{L_{ПРИВj}}, \quad (6)$$

где $T_{ГРij}$ – тоннаж, пропущенный по путевой инфраструктуре при грузовых перевозках i -м видом транспорта в j -м регионе, т.

Безопасность перевозок характеризуется аварийностью на дорогах, поэтому безопасность использования транспортной инфраструктуры предлагается оценить долей аварий при перевозке грузов, обусловленных слабо развитой инфраструктурой или несвоевременно отремонтированной:

$$D_{ГР\ АВj} = \frac{\sum K_{АВ.ИНФij}}{\sum K_{АВ.ОБЩij}}, \quad (7)$$

где $K_{АВ.ИНФij}$ – число аварий в j -м регионе при перевозке грузов i -ми видами транспорта за рассматриваемый период времени, обусловленных несвоевременно отремонтированной или слабо развитой инфраструктурой, шт.;

$K_{AB.OBЩij}$ – общее число аварий в j -м регионе на различных видах транспорта за рассматриваемый период времени, шт.

Вторым элементом транспортной инфраструктуры грузовых перевозок выступают транспортные предприятия. Их наличие целесообразно оценивать количеством и масштабом.

Для оценки масштаба предлагается использовать долю персонала транспортных предприятий по перевозке грузов в общей численности занятых в экономике региона:

$$D_{ТПj}^{ГР} = \frac{\sum \mathcal{C}_{ТПij}^{ГР}}{\mathcal{C}_{3.ЭКj}}, \quad (8)$$

где $\mathcal{C}_{ТПij}^{ГР}$ – численность персонала, занятого в транспортной отрасли j -го региона при перевозке грузов i -ми видами транспорта, чел.; $\mathcal{C}_{3.ЭКj}$ – численность населения, занятого в экономике j -го региона, чел.

Объем работ, выполненных транспортными организациями при перевозке грузов, характеризуется вкладом в ВРП:

$$D_{ТР.Пj}^{ГР} = \frac{\sum OB_{Рij}^{ГР}}{ВРП_j}, \quad (9)$$

где $OB_{Рij}^{ГР}$ – объем работ, выполненных транспортными предприятиями региона j по перевозке грузов i -ми видами транспорта, р.; $ВРП_j$ – валовой региональный продукт региона j , р.

Эффективность функционирования транспортных предприятий, выполняющих услуги по перевозке грузов, оценивается рентабельностью грузовых перевозок (коэф.):

$$R_{ПРj}^{ГР} = \frac{\sum ПР_{ПРij}^{ГР}}{\sum З_{ПРij}^{ГР}}, \quad (10)$$

где $ПР_{ПРij}^{ГР}$, $З_{ПРij}^{ГР}$ – прибыль и затраты на перевозку грузов i -ми видами транспорта в регионе j соответственно, р.

Безопасность дорожного движения грузового транспорта предприятий предлагается определить на основании расчета доли аварий, произошедших по вине водителей, из-за поломки транспортных средств в пути следования:

$$D_{AB.ТПj}^{ГР} = \frac{\sum K_{AB.Bij}^{ГР}}{\sum K_{AB.OBЩij}^{ГР}}, \quad (11)$$

где $K_{AB.Bij}^{ГР}$ – число аварий в регионе j за рассматриваемый период времени, обусловленных ошибками водителей при управлении грузовыми транспортными средствами, их поломкой на i -м виде транспорта, шт.

Третьим элементом транспортной системы региона выступают транспортные средства.

Наличие транспортных средств определяется их числом и средним уровнем обеспеченности грузовых предприятий региона транспортными средствами:

$$OB_{ТР.Cj}^{ГР} = \frac{\sum K_{ТР.Cij}^{ГР}}{\sum K_{ТП.ПРj}^{ГР}}, \quad (12)$$

где $K_{ТР.Cij}^{ГР}$ – количество грузовых транспортных средств, используемых i -ми видами транспорта региона j ед.; $K_{ТП.ПРj}^{ГР}$ – общее количество транспортных предприятий, занимающихся перевозкой грузов в регионе j по видам транспорта, ед.

Объем работ, выполненных транспортными средствами региона, описывают грузооборот и объем перевезенных грузов.

Эффективность использования транспортных средств целесообразно определять их производительностью:

$$P_{TR.Cj}^{GR} = \frac{\Gamma_{TR.C.PРИVj}}{\sum K_{TR.Cj}^{GR}}, \quad (13)$$

где $\Gamma_{TR.C.PРИVj}$ – приведенный грузооборот транспортных средств региона j , т·км.

Экологичность процесса перевозок грузов определяется на основании величины выбросов загрязняющих веществ грузовым транспортом в пути следования.

Четвертым элементом транспортной системы является региональное управление, которое предлагается оценивать на основании расчета коэффициентов выполнения основных функций управления ТС региона:

- планирование;
- прогнозирование;
- анализ;
- стимулирование;
- контроль.

Установление уровня развития ТС региона предлагается определять на основе расчета комплексного показателя:

$$k_{TCj} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n k_{Dj}}, \quad (14)$$

где n – количество анализируемых коэффициентов динамики.

Величина коэффициента динамики показателей, оказывающих прямое влияние на комплексный показатель, определяется по формуле

$$k_{Dj} = \frac{Z_t}{Z_{t-1}}, \quad (15)$$

где Z_t, Z_{t-1} – значение показателя, характеризующего уровень развития ТС региона в отчетном t и базисном $(t-1)$ годах соответственно.

Коэффициент динамики по показателям, оказывающим обратное влияние, определяется по формуле

$$k_{Dj} = \frac{Z_{t-1}}{Z_t}. \quad (16)$$

Влияние показателей на уровень развития транспортной системы региона представлено в табл. 1.

Табл. 1. Влияние показателей на уровень развития транспортной системы региона

Наименование показателя	Влияние на уровень развития транспортной системы региона	
	Прямое	Обратное
1	2	3
Комплексный показатель густоты сети различных видов транспорта	+	
Число складов, логистических центров и железнодорожных станций	+	
Удельный объем оказанных логистических услуг логистическим центром региона	+	
Удельный складской объем склада	+	
Удельный объем переработанных грузов железнодорожной станцией	+	
Грузоёмкость валового регионального продукта	+	
Удельный тоннаж, пропущенный по путевой инфраструктуре при грузовых перевозках	+	
Доля аварий при перевозке грузов, обусловленных слабо развитой или несвоевременно отремонтированной инфраструктурой		+

Окончание табл. 1

1	2	3
Число транспортных организаций, выполняющих грузовые перевозки	+	
Доля персонала транспортных предприятий по перевозке грузов в общей численности занятых в экономике региона	+	
Объем работ транспортных организаций в ВРП	+	
Рентабельность грузовых перевозок	+	
Доля аварий, произошедших по вине водителей, из-за поломки транспортных средств		+
Число грузовых транспортных средств	+	
Средний уровень обеспеченности грузовых предприятий региона транспортными средствами	+	
Грузооборот	+	
Объем перевезенных грузов	+	
Производительность транспортных средств	+	
Величина выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду грузовым транспортом		+

Заключение

Применение разработанной последовательности ведения мониторинга грузовых перевозок в региональной транспортной системе и предложенной методики расчета уровня развития транспортной системы региона позволят:

– оценить результаты работы элементов транспортной системы в разрезе направлений проведения мониторинга;

– сформировать информационную базу об эффективности их функционирования;

– выявить имеющиеся внутренние резервы развития транспортной системы;

– разработать мероприятия, стратегию или программу совершенствования и повышения уровня развития транспортной системы региона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горев, А. Э.** Развитие городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев, О. В. Попова // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 2 (81). – С. 45–47.
2. **Гришина, Н. В.** Поддержание профессиональной надежности человеческих ресурсов на железнодорожном транспорте / Н. В. Гришина, Е. А. Перебатова // Транспортное дело. – 2017. – № 5. – С. 102–104.
3. **Ивуть, Р. Б.** Развитие транзитного потенциала Республики Беларусь в условиях формирования ее транспортно-логистической системы / Р. Б. Ивуть, А. Ф. Зубрицкий, А. С. Зиневич // Новости науки и технологий. – 2015. – № 1. – С. 19–33.
4. **Лукин, Е. В.** Проблемы структурной трансформации региональной экономики / Е. В. Лукин, Т. В. Ускова // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2018. – Т. 11, № 6. – С. 26–40.
5. Мониторинг рынка транспортных услуг: учебное пособие / А. А. Михальченко [и др.]. – Гомель: БелГУТ, 2017. – 271 с.
6. **Романькова, Т. В.** Методические аспекты оценки складского потенциала регионов Республики Беларусь и пути его развития / Т. В. Романькова // Друкеровский вестн. – 2021. – № 3 (41). – С. 188–199.

7. **Романькова, Т. В.** Методические аспекты оценки уровня развития транспортного потенциала областей Республики Беларусь / Т. В. Романькова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 4 (73). – С. 114–122.

8. **Ускова, Т. В.** Устойчивость развития территорий и современные методы управления / Т. В. Ускова // Проблемы развития территорий. – 2020. – № 2 (106). – С. 7–18.

Статья сдана в редакцию 21 сентября 2022 года

Татьяна Васильевна Романькова, канд. экон. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375 -293-36-18-14. E-mail: romankova.by@mail.ru.

Tatyana Vasilievna Romankova, PhD (Economics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-293-36-18-14. E-mail: romankova.by@mail.ru.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4(77) 2022

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

В. П. Бабичева

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 332, 212022, г. Могилев. Телефон: 71-30-54, e-mail: bru@bru.by.

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 30.11.2022. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,79. Уч.-изд. л. 6,88. Тираж 100 экз. Заказ 4165.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.