

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЩИТОВЫХ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РОТОРНОГО ТИПА

Губанов С.Г., Кучеренко Е.Д., Кириченко А.А., Силаков А.В., Рубанов М.А.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Ключевые слова: тоннелепроходческий комплекс, щитовая проходка, рациональные режимы работы, эффективность эксплуатации комплекса, крутящий момент, рабочий инструмент ротора, режущий рабочий орган, забой.

Аннотация. Анализ современных исследований в области тоннелепроходческих комплексов позволяет выявить устойчивую методологическую проблему, которая проявляется в разобщенности научных подходов. Существующие работы часто сосредоточены на локальной оптимизации отдельных систем без учета их комплексного взаимодействия. В качестве решения предлагается системный подход, основанный на итеративной методике, объединяющей параметрическое 3D-моделирование в SolidWorks, конечно-элементный анализ в ANSYS и виртуальные эксперименты. Предлагаемая методика устанавливает взаимосвязь между геометрией шарошечного инструмента и динамическими нагрузками в системе «инструмент – привод – породный массив», обеспечивая поиск сбалансированного сочетания параметров для эффективного разрушения породы при минимизации паразитных нагрузок. Планируемые результаты создают основу для перехода от компонентной к системно-ориентированной парадигме проектирования тоннелепроходческих комплексов, с адаптацией рекомендаций к специфическим грунтовым условиям Московского региона.

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF ROTARY TUNNEL BORING MACHINES

Gubanov S.G., Kucherenko E.D., Kirichenko A.A., Silakov A.V., Rubanov M.A.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow

Keywords: tunnel boring machine, shield tunneling, rational operating modes, machine efficiency, torque, rotor cutting tools, cutter head, face.

Abstract. The present analysis of modern research in the field of tunnel boring machines reveals a persistent methodological issue manifested in the fragmentation of research approaches. Existing studies often focus on localized optimization of individual systems without considering their complex interactions. As a solution, a systematic approach is proposed, based on an iterative methodology combining parametric 3D-modeling in SolidWorks, finite element analysis in ANSYS, and virtual experiments. The developed methodology establishes relationships between the geometry of the roller cutter tool and dynamic loads in the "tool – drive – rock mass" system, enabling the determination of balanced parameters for efficient rock breaking while minimizing parasitic loads. Future results provide a foundation for transitioning from a component-based to a system-oriented paradigm in tunnel boring machines design, with recommendations adapted to the specific soil conditions of the Moscow region.

Введение

На протяжении последних десятилетий рост крупных городов напрямую стимулирует масштабное развитие метрополитена как основы городской транспортной системы. Это, в свою очередь, обуславливает активное строительство новых линий метро, автомобильных и железнодорожных тоннелей, а также возведение сопутствующей подземной инфраструктуры. Для осуществления этих работ необходимо использовать высокопроизводительное и надежное технологическое оборудование. В условиях городского метростроения, особенно на относительно небольших глубинах в грунтах с низкими прочностными и деформационными характеристиками, одним из наиболее востребованных решений являются тоннелепроходческие комплексы (ТПК) роторного типа [1-3].

Несмотря на бурное мировое развитие щитовых проходческих комплексов в 1990-е и 2000-е годы, сопровождавшееся совершенствованием специальных технологий проходки, текущая ситуация в России имеет кардинальные отличия и характеризуется системным кризисом. Анализ текущей ситуации показывает, что российские проходческие организации,

зависящие от импортной техники, сталкиваются не только с прямыми ограничениями в поставках запасных частей и новых единиц оборудования, но и с глубинными проблемами научно-технического сопровождения их эксплуатации. Усугубляет положение практическое отсутствие конкурентоспособных отечественных аналогов. При этом, как демонстрирует анализ публикаций, даже глобальные исследования в данной области имеют существенный методологический изъян: они носят фрагментарный характер и направлены на локальную оптимизацию отдельных узлов ТПК без учета их системного взаимодействия. Такой подход приводит к субоптимальным решениям, не позволяющим реализовать значительный потенциал для повышения совокупной производительности и энергоэффективности комплексов.

Таким образом, критический недостаток большинства существующих научных работ заключается в отсутствии комплексного подхода к управлению взаимосвязанными параметрами работы ТПК, что требует проведения принципиально новых научных и проектных работ, нацеленных на системную оптимизацию.

Критический литературный анализ

Систематизация научных исследований по рассматриваемой теме позволяет выделить семь основных направлений совершенствования ТПК:

- рабочий инструмент и его расположение на роторе тоннелепроходческого щита;
- гидравлическая система щитового комплекса, включая систему передвижки ТПК;
- выбор и обоснование рациональных режимов работы тоннелепроходческого комплекса;
- системы грунто- и гидро-пригрузки щита;
- системы транспортирования ТПК;
- ремонт и восстановление деталей и узлов;
- применение новых технологий при изготовлении деталей и узлов.

Все эти направления являются достаточно перспективными с точки зрения развития ТПК, однако при более детальном анализе некоторых исследований становится понятно, что зачастую многие научные векторы рассматриваются отдельно, в отрыве от специфики работы всего комплекса.

Так, отечественные и зарубежные исследования в области разрушения пород режущим инструментом демонстрируют существенный методический пробел: работы либо сосредоточены на оптимизации расстановки инструмента на роторе, либо на совершенствовании конструкции самого инструмента [4-6], но практически не учитывают их взаимного влияния. Рассмотренные работы, как и многие другие исследования в данной области, направлены на определение наиболее рациональных линий резания ротора ТПК, а также на создание в скальном грунте высокого контактного механического напряжения в случае применения дисковых шарошек. Ключевым параметром в этом вопросе является расстояние между лезвиями шарошек (рис. 1), поскольку оптимальный выбор этого расстояния позволяет обеспечить распространение трещин в породе таким образом, чтобы формировался скол заданных размеров, обеспечивающий наиболее эффективное разрушение забоя [4, 7]. Однако существует небольшой нюанс, ведь расстановка шарошек и схемы их расположения на роторе рассматривается изолированно от динамических нагрузок, передаваемых через ротор на гидравлическую систему. Такая оптимизация может привести к созданию чрезмерной нагрузки на оборудование, что снизит общую надёжность и долговечность комплекса.

Анализ литературных источников выявляет устойчивую проблему: влияние значительных динамических нагрузок на рабочие процессы гидравлических систем часто остается недостаточно изученным. Гидравлическая система не только испытывает экстремальные воздействия, но и сама оказывает механическое воздействие на кольца обделки, создавая замкнутую систему взаимовлияния. Однако современные методики не всегда учитывают циклический характер нагрузок при отталкивании от обделки во время продвижения комплекса. Такой упрощенный подход не позволяет прогнозировать критические режимы работы, что приводит к неоптимальным конструкторским решениям.

Это проявляется в неспособности эффективно противодействовать перегреву рабочей жидкости, поскольку даже комплексные исследования систем охлаждения и теплового баланса рассматривают тепловыделение как статичный параметр.

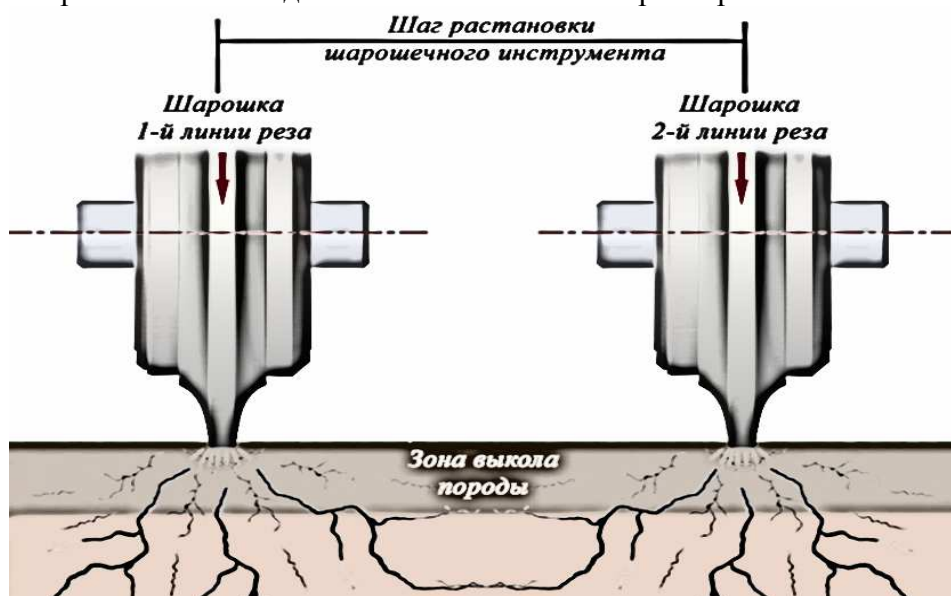


Рис. 1. Формирование скола породы при контакте массива с дисковыми шарошками под влиянием высокого контактного механического напряжения

Особое внимание в научных исследованиях уделяется вопросам выбора и обоснования оптимальных параметров функционирования проходческого щитового комплекса. Производительность и энергоэффективность комплекса напрямую зависят от рационального выбора режимов его работы, в частности распределения крутящего момента, частоты вращения ротора и усилия подачи [5, 8]. Определение рациональных режимов работы ТПК не может быть эффективным без комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь конструктивных и динамических параметров. Анализ составляющих крутящего момента (табл. 1) показывает несостоятельность изолированного подхода к оптимизации рабочих параметров. Представленные в таблице данные демонстрируют, что в мягких грунтах на резание шарошками приходится лишь 1% энергии от общего энергопотребления, в то время как до 40% крутящего момента используется на вращение основной оси. Это не является аномалией, а отражает специфику механизма разрушения: в мягких грунтах шарошки выполняют роль «дефрагментатора» твердых включений, тогда как основная энергия тратится на резание резцами, пластическое выдавливание и трение. В твердых же породах, где шарошечный инструмент служит основным исполнительным органом, на резание может приходиться до 50% энергии [9].

Табл. 1. Составляющие крутящего момента и их процентное соотношение

Составляющие суммарного крутящего момента	Процентное соотношение
Крутящий момент на передней и боковых поверхностях планшайбы	30%
Крутящий момент на задней поверхности планшайбы	15%
Крутящий момент резания грунта шарошками	1%
Крутящий момент деформации во входных отверстиях и при перемешивании грунта	14%
Крутящий момент вращения основной оси	40%

Как следствие, данное распределение затрат подтверждает необходимость системной оптимизации, при которой параметры инструмента согласуются с динамическими нагрузками в приводе. Для мягких грунтов это означает, что оптимизация должна быть направлена не на

усиление резания, а на обеспечение стабильного дробления включений при минимальном сопротивлении движению ротора, что позволит напрямую снизить избыточные нагрузки и повысить общую энергоэффективность комплекса.

Несмотря на отмеченную в литературном обзоре общую разобщенность, в последнее время всё-таки появляются исследования, направленные на комплексный анализ производительности специализированных тоннелепроходческих комплексов, в частности щитов с грунтопригрузом [10]. Однако даже в таких работах, рассматривающих широкий круг факторов, остается без должного внимания вопрос о прямом влиянии технологий кондиционирования грунта на силовые нагрузки в системе привода. Учет этой взаимосвязи мог бы открыть дополнительные возможности для целенаправленного повышения эффективности работы комплекса. Более того, изменение характеристик грунта неизбежно сказывается на крутящем моменте ротора и усилиях подачи, однако эта критически важная взаимосвязь также не находит полного отражения в современных методиках оптимизации. Данный пробел приобретает особую актуальность в условиях плотной городской застройки, где требования к точности и безопасности работ, управлению системами грунто- и гидропригруза, существенно возрастают. Анализ современных исследований [2, 11] свидетельствует о постоянном поиске решений для расширения функциональных возможностей данных систем, однако без учета силового взаимодействия с кондиционируемой средой их адаптивность и эффективность остаются ограниченными.

Совершенствование систем транспортировки отработанного грунта и доставки материалов возможно путем адаптации опыта научных исследований, применяемого в транспортных системах горного производства. В частности, автоматизация и повышение энергоэффективности транспортирования материалов в области горнодобывающей промышленности, включая системы шахтного водоотлива и вентиляции, могут быть использованы для повышения эффективности и надежности системы транспортировки ТПК. При исследовании других видов горной техники также используются подходы, направленные на повышение надежности, безопасности и эффективности горных машин. Несмотря на бесспорную ценность каждого из этих исследований в отдельности, в совокупности они демонстрируют отсутствие рассмотрения комплексного подхода к повышению эффективности, где все подсистемы тесно взаимосвязаны.

Значительный пласт исследований посвящен технологиям, направленным на повышение ресурса компонентов ТПК. Сюда относятся методы ремонта и восстановления изношенных деталей [12, 13], обеспечение точности их сборки, а также перспективные технологии поверхностного упрочнения для создания износостойких поверхностей. Безусловно, оперативный ремонт и восстановление отдельных компонентов являются неотъемлемой и критически важной частью жизненного цикла ТПК. Однако с методологической точки зрения они демонстрируют характерную ограниченность: фокусируясь на продлении жизни отдельного узла, исследования не учитывают его системного взаимодействия в комплексе. Например, повышенная износостойкость штока может изменить динамические нагрузки в приводе, а герметизированное покрытие – маскировать проблемы с теплоотводом. Соответственно, без интеграции компонентных улучшений в общую модель функционирования ТПК их потенциал для повышения общей эффективности комплекса остается нераскрытым.

Таким образом, проведенный анализ позволяет заключить, что сложившаяся практика научных исследований демонстрирует определенную разобщенность в подходах к оптимизации отдельных систем ТПК. В этой связи дальнейшее повышение эффективности тоннелепроходческих комплексов требует более тесной интеграции и координации исследований за счет более согласованного рассмотрения взаимосвязанных технологических параметров. Выявленная методологическая проблема обуславливает актуальность разработки принципиально иного, комплексного подхода, который и предлагается в настоящем исследовании.

Новый научный подход и методика исследования

В рамках данной работы для решения обозначенной проблемы предлагается системный подход, основанный на методе конечно-элементного моделирования взаимодействия исполнительного органа ТПК с горным массивом, позволяющий определить оптимальные конструктивные и динамические параметры инструмента. В качестве объекта исследования выступает система «исполнительный орган – режущий инструмент – породный массив», а предметом являются конструктивные и динамические параметры исполнительного органа ТПК, от которых зависит, насколько слаженно и эффективно будет работать вся система.

В основе исследования лежит итеративная методика, основная суть которой заключается в последовательном цикле, связывающем моделирование, анализ и корректировку параметров для достижения их наиболее сбалансированного сочетания. Данный подход в итоге позволит разработать комплексную методику оптимизации исполнительного органа ТПК, обеспечивающую повышение эффективности, надёжности и высокую производительность комплекса при минимальных нагрузках. Для этого в рамках исследования разрабатывается параметрическая 3D-модель шарошечного инструмента в SolidWorks, позволяющая анализировать влияние геометрических параметров на величину силовых нагрузок. На следующем этапе создается математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между геометрией инструмента, усилием внедрения, крутящим моментом и энергозатратами с использованием метода конечно-элементного анализа в программном комплексе ANSYS.

Далее будет проводиться ряд виртуальных экспериментов для определения совокупности оптимальных параметров, обеспечивающих не только эффективное разрушение породы, но и минимизацию второстепенных нагрузок на систему привода. В конечном итоге предполагается вывести ряд зависимостей и определить оптимальные конструктивные и динамические параметры работы исполнительного органа ТПК, способствующие повышению эффективности всего комплекса. Завершающим этапом будет являться адаптация полученных рекомендаций к специфическим грунтовым условиям московского региона для обеспечения максимальной практической значимости результатов.

Детальное описание методики, результаты виртуальных экспериментов и их анализ требуют отдельного рассмотрения и будут представлены в следующих публикациях авторов.

Заключение

Проведенный критический анализ современных исследований подтвердил устойчивую тенденцию к изолированному рассмотрению рабочих процессов горного оборудования. Существующие разработки демонстрируют выраженную разобщенность, будучи направлены на оптимизацию отдельных систем без учета их взаимосвязей в едином технологическом комплексе. Это приводит к ситуации, когда локальное улучшение характеристик одного узла не обеспечивает пропорционального роста общей производительности из-за несогласованности рабочих режимов и возникновения избыточных нагрузок.

В качестве методологического решения данной проблемы в работе предложен интегральный подход, основанный на моделировании системы «исполнительный орган – режущий инструмент – породный массив». Он позволяет преодолеть выявленную разобщенность за счет согласованного анализа конструктивных и динамических параметров в их взаимосвязи. Предлагаемая методика ориентирована на поиск баланса между эффективностью разрушения породы и нагрузками на приводное оборудование, что обеспечивает повышение общей производительности и энергоэффективности ТПК.

Таким образом, становится очевидным, что дальнейшее повышение эффективности тоннелепроходки требует перехода от компонентного к системно-ориентированному принципу, при котором проектирование и оптимизация любого элемента рассматривается через призму его влияния на смежные системы и технологические параметры комплекса в целом. Предложенный подход создает основу для принципиально новых решений в области проектирования и эксплуатации тоннелепроходческого оборудования.

Список литературы

1. Нагорный С.Я., Лакова Н.Н., Русанов И.В. Особенности инженерно-геологического обоснования проектирования строительства сооружений метрополитена больших городов России (на примере Москвы и Санкт-Петербурга) // Метро и тоннели. – 2016. – №6. – С. 41-45.
2. Acun S., Bilgin N., Erboylu U. Contribution on the understanding of EPB-TBM drives in complex geologic structures // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021, vol. 107, p. 103646. doi.org/10.1016/j.tust.2020.103646.
3. Rostami J. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, vol. 57, pp. 173-182. doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.009.
4. Юнгмейстер Д.А., Ячейкин А.И. Совершенствование исполнительного органа тоннелепроходческого комплекса S-782 для условий метро Санкт-Петербурга // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – №3(58). – С. 66-72.
5. Юнгмейстер Д.А., Ячейкин А.И. Обоснование рациональной конструкции исполнительного органа тоннелепроходческого щита для условий шахт Метростроя Санкт-Петербурга // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 441-448. – doi.org/10.31897/PMI.2021.3.13.
6. Fang Y., Yao Z., Xu W., Tian Q., He C., Liu S. The performance of TBM disc cutter in soft strata: A numerical simulation using the three-dimensional RBD-DEM coupled method // Engineering Failure Analysis. 2021, vol. 119, p. 104996. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104996.
7. Xue Y., Wang J., Zhou M., Liu J., Guo Y., Wang J. Prediction of optimum TBM penetration strategy with minimum energy consumption in hard rocks // Computers and Geotechnics. 2022, vol. 148, pp. 1-13. doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104844.
8. Koohsari A., Kalatehjari R., Moosazadeh S., Hajihassani M., Tarafrava M. Measurement and enhancing prediction of EPBM torque using actual Machine data // Measurement. 2023, vol. 223, pp. 113780. doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113780.
9. Zhao Y., Gong Q., Tian Z., Zhou S., Jiang H. Torque fluctuation analysis and penetration prediction of EPB TBM in rock-soil interface mixed ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 91, pp. 103002. doi.org/10.1016/j.tust.2019.103002.
10. Роби Д., Уиллис Д. Повышение показателей тоннелепроходческих работ с активным пригрузом забоя на механизированных комплексах для метростроения // Метро и тоннели. – 2017. – №5-6. – С. 43-49.
11. Мазеин С.В. Эффективность комплексного геотехнического обеспечения технологических процессов тоннелепроходческого щита // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №2. – С. 2-8.
12. Зотов В.В., Мнацаканян В.У., Базлин М.М. Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива // Горная промышленность. – 2024. – №2(174). – С. 143-147. – doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146.
13. Sevagin S.V., Mnatsakanyan V.U. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 709(4), no. 3, pp. 88-95.

References

1. Nagorny S.Ya., Lakova N.N., Rusanov I.V. Features of engineering-geological substantiation of the design of subway construction in large cities of Russia (on the example of Moscow and St. Petersburg) // Metro and Tunnels. 2016, no. 6, pp. 41-45.
2. Acun S., Bilgin N., Erboylu U. Contribution on the understanding of EPB-TBM drives in complex geologic structures // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021, vol. 107, p. 103646. doi.org/10.1016/j.tust.2020.103646.
3. Rostami J. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, vol. 57, pp. 173-182. doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.009.
4. Yungmeister D.A., Yacheikin A.I. Improvement of the executive body of the S-782 tunneling complex for the conditions of the St. Petersburg Metro // World of Transport and Technological Machines. 2017, no. 3(58), pp. 66-72.
5. Yungmeister D.A., Yacheikin A.I. Substantiation of the rational design of the executive body of the tunneling shield for the conditions of the St. Petersburg Metro // Journal of Mining Institute. 2021, vol. 249, pp. 441-448. doi.org/10.31897/PMI.2021.3.13.
6. Fang Y., Yao Z., Xu W., Tian Q., He C., Liu S. The performance of TBM disc cutter in soft strata: A numerical simulation using the three-dimensional RBD-DEM coupled method // Engineering Failure Analysis. 2021, vol. 119, p. 104996. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104996.
7. Xue Y., Wang J., Zhou M., Liu J., Guo Y., Wang J. Prediction of optimum TBM penetration strategy with minimum energy consumption in hard rocks // Computers and Geotechnics. 2022, vol. 148, pp. 1-13. doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104844.
8. Koohsari A., Kalatehjari R., Moosazadeh S., Hajihassani M., Tarafrava M. Measurement and enhancing prediction of EPBM torque using actual Machine data // Measurement. 2023, vol. 223, pp. 113780. doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113780.

9. Zhao Y., Gong Q., Tian Z., Zhou S., Jiang H. Torque fluctuation analysis and penetration prediction of EPB TBM in rock–soil interface mixed ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 91, pp. 103002. doi.org/10.1016/j.tust.2019.103002.
10. Roby D., Willis D. Improving the performance of tunneling works with active face pressure on mechanized complexes for metro construction // Metro and Tunnels. 2017, no. 5-6, pp. 43-49.
11. Mazein S.V. Efficiency of complex geotechnical support of technological processes of tunneling shield // Mining Equipment and Electromechanics. 2011, no. 2, pp. 2-8.
12. Zotov V.V., Mnatsakanyan V.U., Bazlin M.M. Increasing the resource of working wheels of centrifugal pumps for mine drainage // Russian Mining Industry. 2024, no. 2(174), pp. 143-147. doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146.
13. Sevagin S.V., Mnatsakanyan V.U. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 709(4), no. 3, pp. 88-95.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Губанов Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения	Gubanov Sergey Gennadievich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of mining equipment, transport and mechanical engineering
Кучеренко Екатерина Денисовна – ассистент кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения	Kucherenko Ekaterina Denisovna – assistant of the Department of mining equipment, transport and mechanical engineering
Кириченко Андрей Алексеевич – аспирант	Kirichenko Andrey Alekseevich – postgraduate student
Силаков Андрей Вадимович – аспирант	Silakov Andrey Vadimovich – postgraduate student
Рубанов Матвей Алексеевич – аспирант	Rubanov Matvey Alekseevich – postgraduate student
sg.gubanov@mis.ru	

Получена 08.11.2025