

УДК 621.865.8, 624.144.53

Проблема очистки вантовых мостов-гигантов от наледи и снега

С.Н. Саяпин^{1,2}¹ ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»² МГТУ им. Н.Э. Баумана

The problem of cleaning the cable-stayed giant bridges from ice and snow

S.N. Sayapin^{1,2}¹ Federal State Budgetary Institution of Science — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences² Bauman Moscow State Technical University

Обледенение вантовых мостов-гигантов с пилоном высотой более 300 м и вантой длиной и диаметром более 500 и 100 мм соответственно наблюдается во многих регионах мира, включая Россию, особенно в северных широтах и прибрежных районах, подверженных воздействию ледяных штормов и дождей. В результате тепловых и ветровых воздействий на ванты происходит самопроизвольное обрушение и падение с большой высоты на проезжую часть наледи и скопившегося снега, способное привести к несчастным случаям и повреждению машин. В мире опробовано множество методов борьбы с обледенением вант, которые можно объединить в следующие основные группы: механические (удаление льда вручную или средствами механизации); тепловые (таяние льда за счет наружного или внутреннего подвода теплоты к оболочкам вант); пассивные (нанесение антиадгезионных покрытий) и роботизированные механические. Анализ методов борьбы с обледенением вант выявил высокую трудоемкость ручного метода и неэффективность остальных, а также перспективность роботизированной очистки вант мостов-гигантов от наледи и снега. Предложена концепция построения и кинематическая силовая физическая модель самоперемещающейся робототехнической системы «Вантовый ледокол» для механической очистки вант мостов-гигантов от наледи и снега на основе октаэдрального механизма параллельной структуры.

EDN: URWHLZ, <https://elibrary/urwhlz>**Ключевые слова:** вантовые мосты-гиганты, обледенение вант, методы очистки вант, вантовый ледокол

Icing of the cable-stayed giant bridges with a pylon of over 300 m high and cable length and diameter of over 500 and 100 mm, respectively, is typical for many regions of the world, including Russia, especially in the northern latitudes and coastal areas exposed to the ice storms and rains. As a result of thermal and wind effects on the cables, the ice and accumulated snow spontaneously collapse and fall from a great height onto the roadway, which could lead to accidents and damage to vehicles. Many methods of combating cable icing were tested around the world. They could be divided into the following main groups: mechanical (ice removal manually or by means of mechanization); thermal (ice melting due to external or internal heat supply to the cable shells); passive (anti-adhesive coatings application), and robotic mechanical. The conducted analysis shows high labor intensity of the manual method and inefficiency of the others, as well as the prospects for robotic cleaning

the giant bridge cables from ice and snow. The paper proposes a concept of construction and the kinematic power physical model of the self-propelled robotic system Cable-stayed Icebreaker for mechanical cleaning of the giant bridge cables from ice and snow based on the octahedral mechanism of parallel structure.

EDN: URWHLZ, <https://elibrary/urwhlz>

Keywords: cable-stayed giant bridges, cables icing, cables cleaning methods, cable-stayed icebreaker

Вантовые мосты-гиганты (ВМГ) эксплуатируются во многих странах мира, включая Россию. Вантовые мосты отличает легкость несущих конструкций, большая перекрывающая способность и возможность навесного монтажа, а также низкие стоимость и расход материалов, что определяет технико-экономическую целесообразность их применения в мостах с большими пролетами, т. е. в ВМГ, где легкость несущих конструкций имеет важное значение [1–4].

Высота пилона и длина ванты ВМГ могут достигать сотен метров. Например, у Русского моста во Владивостоке высота пилона 324 м, а максимальная длина ванты 579,83 м при общей длине вант около 55 км и наружном диаметре 130 мм [1, 4]. Одной из серьезных проблем, возникающих при эксплуатации вантовых мо-

стов, в частности ВМГ, является их обледенение, вызванное внезапным воздействием ледяных штормов и дождей (особенно в северных широтах и прибрежных районах) с последующим самопроизвольным обрушением с большой высоты скопившегося снега и ледяного покрытия на проезжую часть, что приводит к несчастным случаям и повреждениям машин [2, 4–14].

Примеры обледенения ВМГ и повреждения автомашин в результате обрушения наледи и снега с вант ВМГ на проезжую часть приведены на рис. 1, где *а* — Русский мост (г. Владивосток, Россия) [5]; *б* — мост Байи (Bayi Bridge, Nanchang) в г. Наньчан (Китай) [6, 7]; *в* — мост Порт-Манн (Port Mann bridge) в Британской Колумбии (Канада), [8, 9]; *г* — мост ветеранов

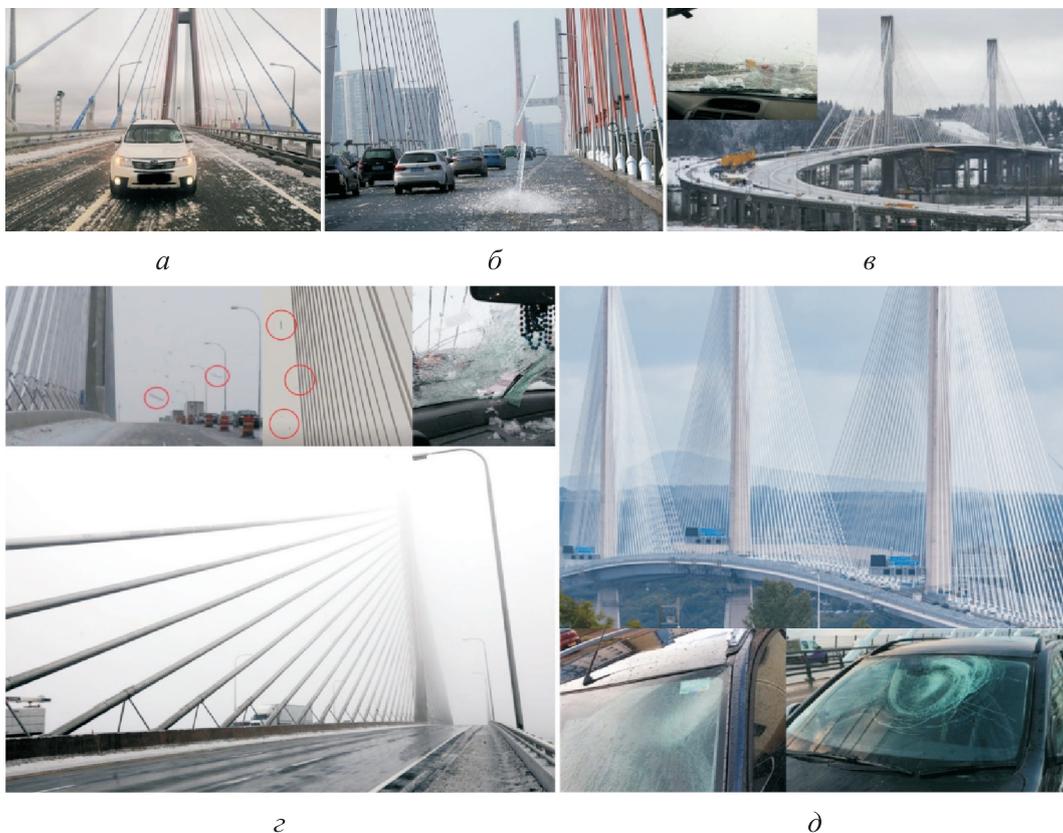


Рис. 1. Примеры обледенения ВМГ и обрушения наледи и снега на проезжую часть с повреждением машин

«Стекл-Сити-Скайуэй» (Veterans Glass City Skyway Bridge) в г. Толедо (штат Огайо, США) [10, 11]; δ — мост Квинсферри-кроссинг (Queensferry Crossing) в г. Эдинбурге и округе Файф (Шотландия), [4, 12, 13].

Длина отдельных кусков льда может составлять около двух метров. На протяжении последних десятилетий проводятся многочисленные исследования во многих странах мира, направленные на эффективное решение или ослабление этой проблемы. Известные методы профилактики обледенения ВМГ и очистки вант от наледи и снега подразделены на две основные группы: превентивные (пассивные) и активные [2, 4, 7, 14–17]. На период полного естественного обрушения наледи и снега с вант или путем механической очистки движение по ВМГ полностью закрыто, вследствие чего возникают существенные экономические потери и нарушение привычного ритма жизни [4–14].

К превентивной группе методов профилактики обледенения ВМГ и очистки ванты от наледи и снега относятся:

- формирование поверхности ванты, способствующей удержанию льда от обрушения при ветровых и тепловых воздействиях;
- нанесение на поверхность ванты антиадгезионных покрытий и химических веществ, предотвращающих или устраняющих образование наледи;
- онлайн-мониторинг вант по обнаружению наледи и степени опасности ее обрушения в режиме реального времени, по результатам которого принимается оперативное решение о закрытии ВМГ на время сохранения опасности.

В состав активной группы методов профилактики обледенения ВМГ и очистки вант от наледи и снега входят:

- тепловые методы, основанные на организации теплового воздействия на ванту, способствующего таянию льда;
- механические методы — ручные и механизированные, основанные соответственно на физическом удалении льда с помощью ручного инструмента и приспособлений и автоматизированных или дистанционно управляемых самоперемещающихся робототехнических систем (СРТС).

При необходимости можно применять комбинированные методы из пассивной и активной групп.

Анализ перечисленных методов показал их недостаточную эффективность или непригод-

ность, за исключением механических методов, применительно к ВМГ [4, 18]. Это обусловлено следующими причинами.

Пассивные методы не требуют использования дополнительных источников энергии и обусловлены воздействием ветра, гравитации, солнечной радиации, а также геометрическими размерами и пространственным расположением ванты. Прочность сцепления гололедных отложений с поверхностью ванты можно снизить уменьшением ее шероховатости и применением материалов с низкой диэлектрической проницаемостью и различных антиадгезионных покрытий, которые, в свою очередь, требуют существенных затрат на химические реактивы и их нанесение на обрабатываемую поверхность.

Кроме того, в работах [4, 14, 18] отмечено отсутствие каких-либо пассивных противообледенительных методов, полностью препятствующих обледенению вант. К недостаткам пассивных методов также следует отнести закрытие движения по ВМГ на неопределенный срок до полной естественной очистки вант от наледи и снега или исключения опасности их обрушения на проезжую часть. Подобные методы эффективны в регионах с резким изменением температуры, когда на смену ледяных штормов и дождей приходит теплая погода.

К пассивным методам также относится формирование поверхности ванты для удержания льда от обрушения при ветровых и тепловых воздействиях, которое оказалось малоприменимым для использования в ВМГ [4, 18, 19], длина вант которых может превышать 500 м, из-за существенного усложнения конструкции и обслуживания ванты, а также увеличения стоимости ее изготовления. Кроме того, подобные поверхности способствуют значительному отложению наледи на ванте, что приводит к повышению нагрузки, и усложняют применение механических методов [4, 17].

Активные методы позволяют проводить практически всепогодную очистку вант ВМГ от наледи и снега в более короткие сроки. Однако не все они пригодны для использования в ВМГ. Так, при использовании тепловых методов, дополнительно для изготовления вант необходима прокладка воздухопроводов или электрических кабелей, что существенно увеличивает их стоимость. При этом потребление электроэнергии для обогрева вант будет сопоставимо с потреблением электроэнергии небольшим городком [4, 10, 11, 18].

Главное преимущество механических методов очистки ВМГ от наледи и снега перед остальными является их простота и возможность повсеместного использования. Кроме того, сравнительные оценки показывают, что для применения механических методов разрушения и удаления гололеда требуется в 100 000 раз меньше энергии, чем для тепловых методов удаления сформировавшихся гололедных отложений (плавки гололеда) [4, 17].

Однако, в отличие от невысоких вантовых мостов, большая высота пилонов ВМГ, достигающая сотен метров над проезжей частью, не позволяет использовать даже супервысотные (до 102 м) автовышки, применяемые при монтаже ветровых генераторов энергии, реставрации высотных зданий, телебашен и спасении людей в многоэтажных зданиях [20].

Поэтому для очистки ВМГ привлекают команды промышленных альпинистов, как в случае обледенения Русского моста во Владивостоке

в конце 2020 г. (рис. 1, а). Работы велись промышленными альпинистами вручную сверху вниз в течение месяца по девять часов ежедневно на высоте около 300 м над уровнем моря при морозе с ветром (рис. 2, а, б). В связи с этим в мире наблюдается тенденция к созданию СРТС для очистки ВМГ от наледи и снега [4, 7, 19].

Рассмотрим достоинства и недостатки известных механизированных методов и СРТС для автоматизированной очистки вант ВМГ от наледи и снега.

Механизированные методы. К механизированным относятся методы гравитационного и принудительного перемещения.

Механизированные методы гравитационного перемещения основаны на применении цепных воротников с размерами, превышающими диаметр ванты (рис. 2, в), которые впервые были применены для очистки моста Порт-Манн (Британская Колумбия, Канада) [18]. Группу

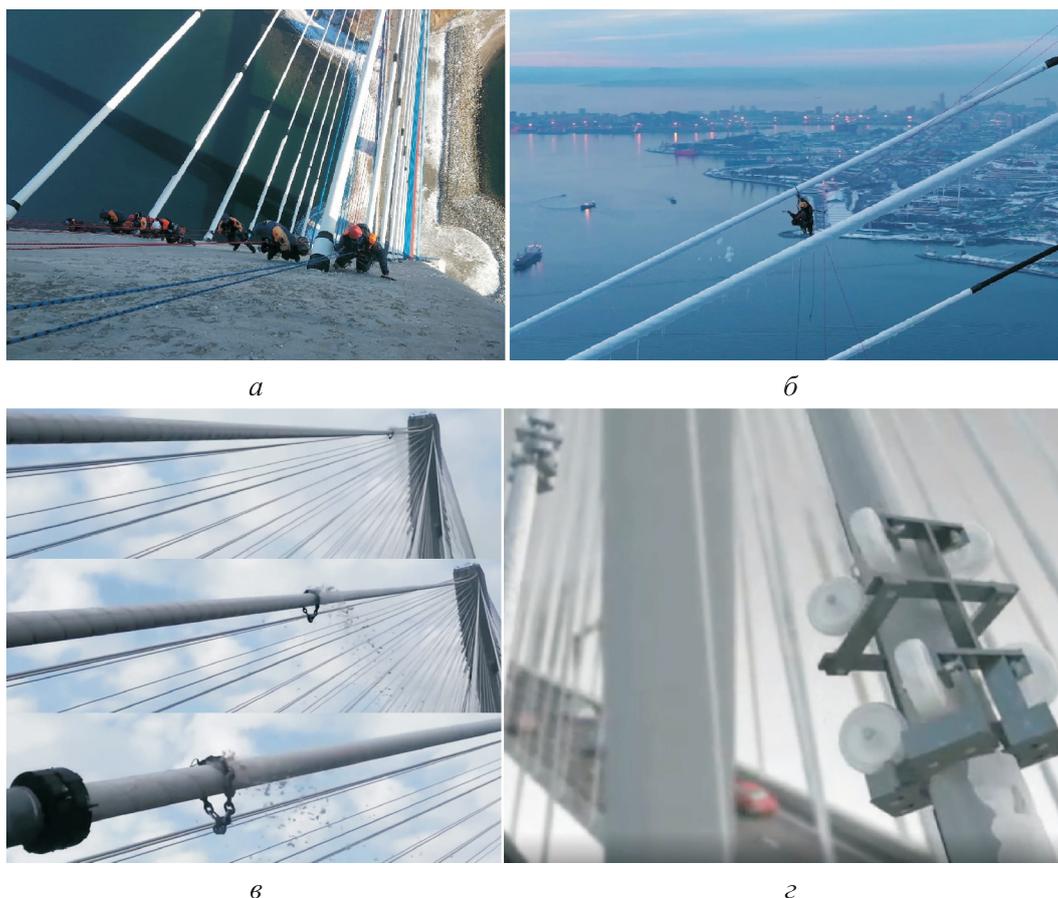


Рис. 2. Примеры очистки вант ВМГ промышленными альпинистами вручную (Русский мост, г. Владивосток, Россия) (а, б) и механизированными методами (мост Порт-Манн, Британская Колумбия, Канада) с помощью цепного воротника (в) или перемещаемой по ванте челночной каретки (г)

цепных воротников поднимают лебедкой на технологическую площадку пилона, расположенную вблизи верхних концов вант. Затем промышленные альпинисты перемещаются снаружи пилона с одним или несколькими цепными воротниками к верхним концам очищаемых вант, надевают на ванту цепной воротник и отпускают вручную или с помощью фиксирующих приспособлений. Под действием силы тяжести цепной воротник устремляется к нижнему концу ванты, разрушая наледь и налипший снег. В случае неполной очистки ванты операцию повторяют.

Достоинство метода заключается в простоте и существенном снижении трудоемкости процесса очистки по сравнению с ручным методом (см. рис. 2, а, б). К недостаткам применения цепных воротников относятся: ограничения по толщине (менее 5 см) и длине ледяного покрытия ванты; ограничения по ветру (5,6 м/с) в процессе установки цепных воротников на подвеске в верхней части ванты, обусловленное безопасностью работы промышленных альпинистов; отсутствие прямого воздействия на наледь нижней поверхности ванты; проведение высотных работ в подвешенном и неэргономичном положении при установке и пуске цепных воротников; возможные повреждения защитной оболочки ванты, а также непреодолимость препятствий, например внешних элементов конструкции ванты.

Механизированные методы принудительного перемещения основаны на применении челночной каретки со скребками и щетками, совершающей с помощью тросовой лебедки возвратно-поступательные перемещения вдоль ванты. Примером реализации метода является очистка вант моста Порт-Манн (рис. 2, г) [19]. Вдоль внешней стороны ванты натягивали трос, соединенный с челночной кареткой и приводимый в движение тросовой лебедкой. Удаление наледи и снега с ванты осуществлялось в процессе перемещения челночной каретки с помощью скребков и щеток.

На рис. 2, г показана одновременная очистка вант двумя челночными каретками при проведении тестовых испытаний. Первоначально предполагалась установка на мосту Порт-Манн 152 челночных кареток. Однако от подобной системы пришлось отказаться в пользу цепных воротников, так как она оказалась не очень надежной и эффективной в экстремальных ледовых условиях, что не соответствовало ее

предназначению, а также требовала дополнительной установки большого количества тросов и лебедок. Кроме того, челночная каретка не способна преодолевать препятствия, выступающие снаружи поверхности ванты, такие как различные датчики системы мониторинга и другие конструктивные элементы [4, 18, 19].

В настоящее время подобные механизированные методы в виде цепных воротников и челночных кареток планируется использовать при эксплуатации строящегося Ленского ВМГ в районе Якутска (Россия) [21].

Актуальным способом устранения недостатков механизированных методов становится создание СРТС для автоматизированной всепогодной очистки вант ВМГ от наледи и снега.

Цель исследования — сравнительный анализ СРТС для автоматизированной очистки вант ВМГ от наледи и снега и выбор базовых типов, позволяющих создавать эффективные всепогодные системы очистки вант ВМГ от наледи и снега.

СРТС для автоматизированной всепогодной очистки вант ВМГ от наледи и снега. Рассмотрим достоинства и недостатки известных СРТС для автоматизированной всепогодной очистки от наледи и снега вант ВМГ.

Анализ отечественных и зарубежных СРТС, предназначенных для очистки высоковольтных проводов линий электропередач (ЛЭП) от наледи и снега, показал их малоприспособленность для очистки от наледи и снега вант ВМГ. Это обусловлено тем, что практически ни одна из них не способна перемещаться по направляющим, расположенным под крутым наклоном к горизонту [4, 22].

СРТС, предназначенные для проведения инспекционного мониторинга состояния вант, как правило, не предназначены для очистки вант от наледи и снега, за исключением комбинированных систем. Интерес представляют конструкции устройств перемещения по ванте, расположенной вертикально или под крутым углом к горизонту, которые пригодны для размещения средств очистки от наледи и снега. Чаще всего подобные СРТС снабжены колесными, гусеничными или пушпульными (от англ. пары антонимов push-pull — толкать-тянуть) движителями, с устройствами прижима к контактируемой поверхности ванты и обеспечением требуемого тягового усилия для перемещения

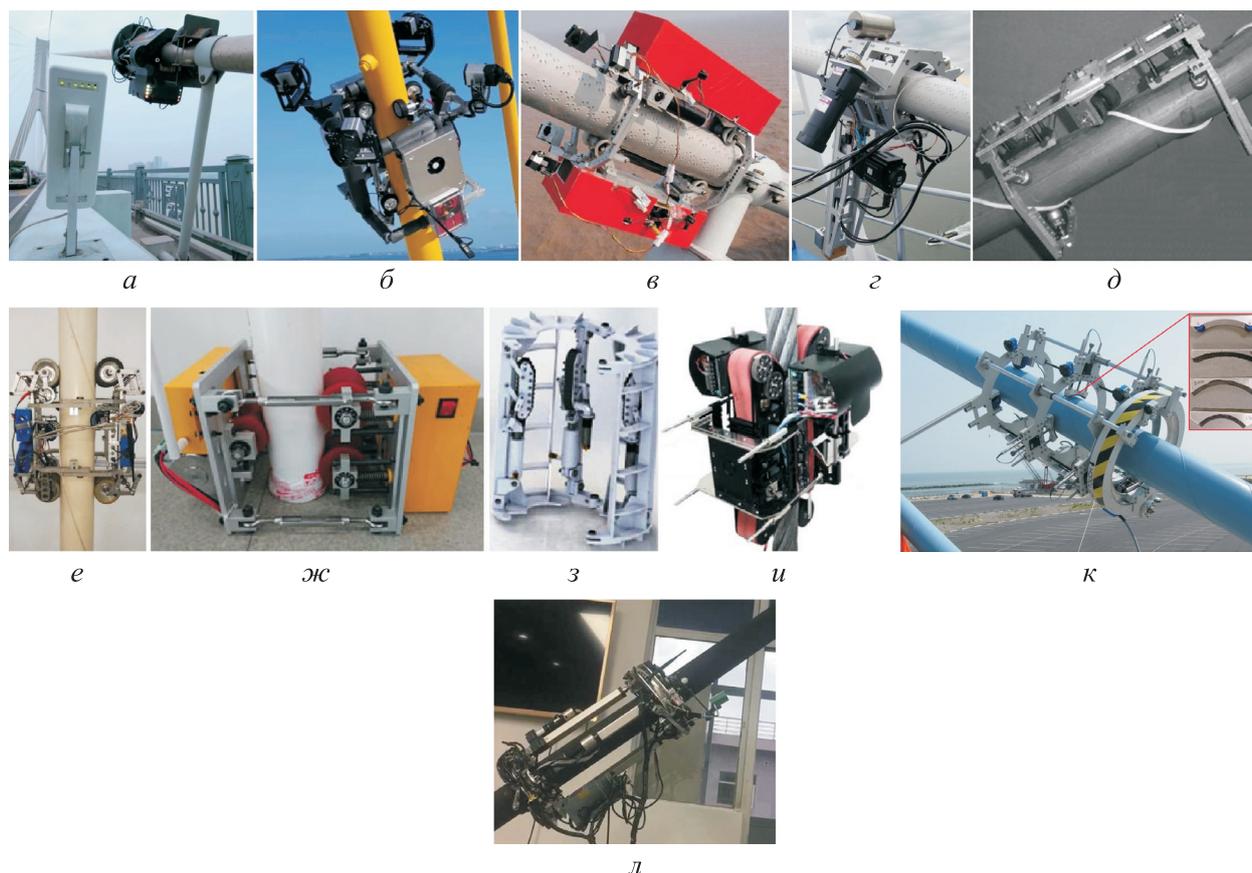


Рис. 3. Внешний вид современных СРТС для мониторинга вант

по ванте, расположенной вертикально или под крутым углом к горизонту.

Основные типы современных инспекционных СРТС приведены на рис. 3, где *а* — вантовый инспекционный робот Explorer (China Railway Bridge Science Research Institute, Wuhan, Китай) [23]; *б* — роботизированная инспекционная система вантового моста CableScan (Infrastructure Preservation Corporation Services, США) [24]; *в* — вантовый инспекционный робот с демпфирующим механизмом безопасного спуска (School of Mechanical Engineering, Southeast University, NanJing, Китай) [23, 25, 26]; *г* — вантовый самоперемещающийся инспекционный робот (Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Республика Корея) [23, 27]; *д* — вантовый инспекционный робот со спиральной траекторией самоперемещения (Nanjing University, Китай) [23, 26, 28]; *е* — адаптируемый вантовый инспекционный робот (Jiangsu Engineering Lab for IOT Intelligent Robots, Китай) [23, 26, 29]; *ж* — адаптируемый вантовый инспекционный робот (Department of Control Science and Engineering, Tongji University, Китай) [23, 26, 30]; *з* — адапти-

руемый робот для наружного перемещения по трубам [31]; *и* — многофункциональный тросовый инспекционный робот MRC²IN-II (Multi-functional Robotic Crawler for Cable INspection-II (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Республика Корея) [23, 32]; *к* — адаптируемый четырехкольцевой вантовый инспекционный робот с дугвыми фиксирующими вкладышами (Aerodynamics Laboratory at Turner-Fairbank Highway Research Center, Вашингтон, США) [33]; *л* — адаптивный вантовый инспекционный робот (Cable Climbing Robot (Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Китай) [26, 34].

Приведенные на рис. 3 вантовые инспекционные роботы являются адаптируемыми к изменениям диаметра вант в ограниченных пределах и классифицированы по типу движителя: колесные (*а–ж*), гусеничные (*з, и*) и пушпульные (*к, л*). Колесные движители обладают самой высокой скоростью перемещения по ванте, гусеничные — высокой степенью сцепления с поверхностью ванты, пушпульные — наименьшей скоростью перемещения и наибольшей степенью сцепления с поверхностью ванты.

Колесные СРТС снабжены рычажно-пружинными механизмами, обеспечивающими адаптируемость к диаметру ванты и возможность преодоления препятствий (рис. 3, *е*). К их недостаткам следует отнести более низкое тягово-толкающее продольное усилие, связанное с проскальзыванием колес, которое снижается применением антифрикционных материалов, с одной стороны, и увеличенным усилием прижатия — с другой.

Однако в условиях обледенения ванты коэффициент трения между поверхностями колес и ванты неизбежно уменьшается, а увеличение усилия прижатия приводит к повышению коэффициента трения качения и, как следствие, к возрастанию мощности привода и массы СРТС в целом. Кроме того, отсутствует возможность организации радиального механического воздействия на наледь, необходимого для ее разрушения при толщине более 5 см [18, 19]. В результате СРТС такого типа малоприспособны к продольному удалению с ванты наледи и снега подобно челночной каретке скребково-щеточного типа (см. рис. 2, *г*), у которой продольное усилие перемещения практически неограниченно.

Гусеничные СРТС (см. рис. 3, *з, и*) по сравнению с колесными СРТС являются менее скоростными, но обладают более высокими тягово-толкающими усилиями, позволяющими их использовать как скребково-щеточные СРТС для очистки ванты от тонкого слоя наледи. При более высокой толщине наледи гусеничные СРТС, как и колесные, неэффективны.

Пушпульные СРТС (см. рис. 3, *к, л*) — менее скоростные по сравнению с колесными и гусеничными СРТС, но обладают возможностью организации не только более высоких продольных усилий, но и радиальных, необходимых для разрушения толстых слоев наледи. Принцип перемещения таких СРТС заключается в попеременной фиксации с помощью приводных радиальных схватов опорных колец к ванте и соответствующих их продольных перемещений путем поочередного изменения длин линейных приводов (см. рис. 3, *л*). Поэтому СРТС такого типа являются предпочтительными при очистке вант от протяженных участков толстых слоев наледи. При этом радиальные схваты могут снабжаться как дугowymi фиксирующими вкладышами для применения к вантам разного диаметра (см. рис. 3, *к*), так и универсальными

малоразмерными опорными поверхностями (см. рис. 3, *л*).

К недостаткам пушпульных СРТС следует отнести одностепенную продольную подвижность опорных колец относительно друг друга. Так, в процессе эксплуатации плоскости опорных колец параллельны и не могут осуществлять осевые взаимные повороты, что не позволяет преодолевать препятствия на ванте, превышающие толщину зазора между опорными поверхностями радиальных схватов СРТС и наружной поверхностью ванты. Отсутствие взаимных поворотов опорных поверхностей относительно друг друга снижает разнообразие воздействий радиальных схватов на наледь и, как следствие, эффективность ее разрушения.

В последние годы установлено, что на процесс образования на ванте наледи влияет загрязнение ее наружной поверхности [35]. Известны экспериментальные образцы инспекционных СРТС колесного типа, снабженных устройствами очистки вант от грязи и снега.

Например, в работе [36] предложена автономная инспекционная снегоочистительная вантовая СРТС (рис. 4, *а, б*), включающая в себя прижимные колеса 1 с устройством адаптации 4 к наружному диаметру ванты, видеокамеру 2, контроллер 5 с блоком питания и устройство очистки ванты от снега в виде вращающейся цилиндрической щетки с индивидуальным приводом 3 (Sustainable Infrastructure Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Республика Корея).

Также для очистки вант от грязи применяют автономный четырехколесный инспекционный вантовый СРТС с электропитанием от аккумуляторных батарей (компания BEAR, Шотландия), снабженный пассивным скребково-щеточным устройством (рис. 4, *в*) [35]. Для повышения его проходимости диаметр колес существенно увеличен по сравнению с таковым других инспекционных колесных СРТС (см. рис. 3 и рис. 4, *а, б*). К недостаткам также следует отнести способность удалять с поверхности вант лишь тонкий слой снега.

Таким образом, в качестве базового образца СРТС для очистки ВМГ от наледи и снега и устранения указанных недостатков выбрана всепогодная СРТС пушпульного типа с пространственной параллельной структурой (ПТ ППС) на основе октаэдрального додекапода, предназначенная для очистки проводов ЛЭП от

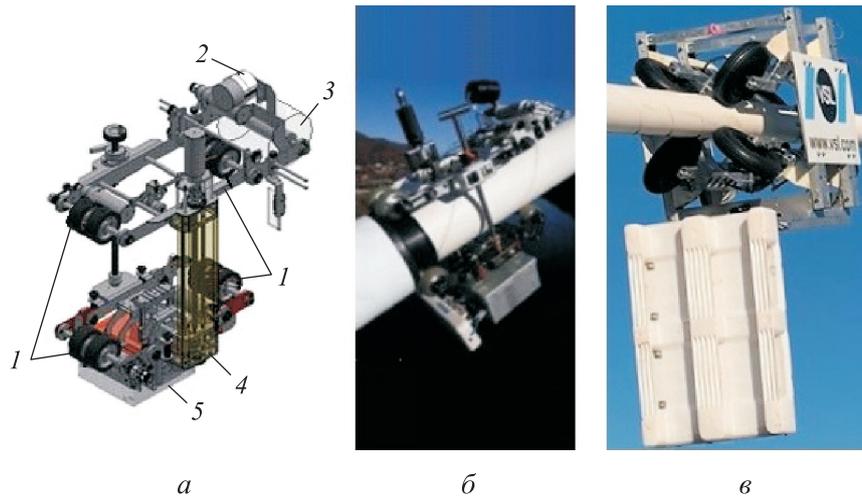


Рис. 4. Внешний вид автономных инспекционных вантовых СРТС колесного типа с активным устройством очистки ваны (а, б) в виде вращающейся цилиндрической щетки с индивидуальным приводом и пассивным скребково-щеточным устройством (в)

наледи и снега, адаптированная к очистке вант ВМГ от наледи и снега и получившая название «Вантовый ледокол» (ВЛ) путем исключения из состава отдельных датчиков [4, 22].

Описание и функционирование ВЛ. Кинематическая (а) и структурная (б) схемы ВЛ показаны на рис. 5. ВЛ построен на основе про-

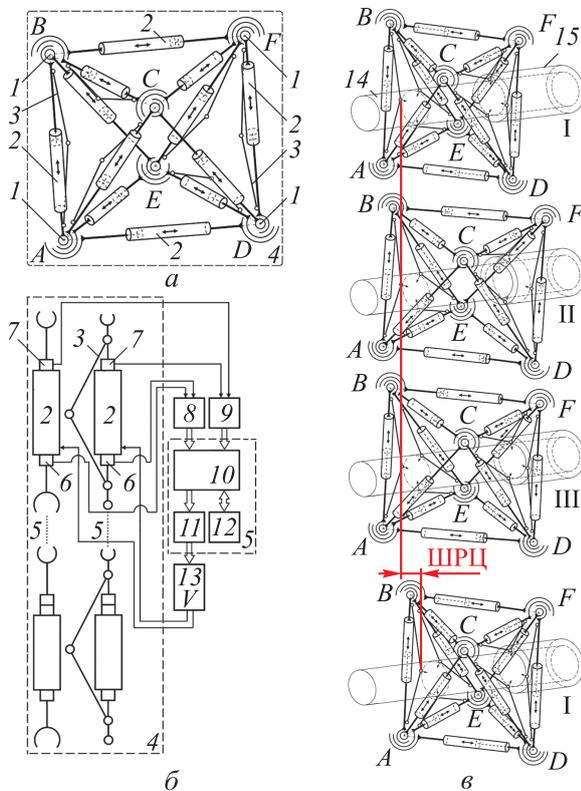


Рис. 5. Кинематическая (а) и структурная (б) схемы ВЛ; циклограмма функционирования ВЛ (в)

странственного механизма параллельной структуры в виде активного октаэдра (АО) 4 $ABCDF$ с тыльной ABC , фронтальной CDF и боковыми ACD , ADE , ABE , FBC , FBE , FCD гранями, все ребра которых представляют собой низкотемпературные линейные приводы (НЛП) 2 с датчиками силы (ДС) 6 и линейного перемещения (ДЛП) 7. Таким образом, все НЛП пересекаются в шести вершинах 1 АО, в которых шарнирно соединены концы смежных НЛП.

Управление НЛП осуществляет система управления (СУ) 5 с промышленным компьютером (ПК) 10 и программно-алгоритмическим обеспечением 12. К входам ПК подключены через аналого-цифровые преобразователи 8 и 9 выходы ДС и ДЛП соответственно, а к выходу ПК — через последовательно соединенные цифро-аналоговый преобразователь 11 и усилитель мощности 13 — НЛП.

Концы каждого из НЛП фронтальной и тыльной граней шарнирно связаны с наружными концами шарнирных двухзвенников (ШД) 3 с образованием в плоскостях фронтальной и тыльной граней АО жестких трехопорных схватов (ЖТС), обеспечивающих фиксацию ВЛ на ванте 14 и организацию механического воздействия на наледь или снежное покрытие 15 при роботизированной очистке ваны ВМГ. С учетом больших длин вант и высот пилонов ВМГ питание СУ и НЛП для периферийных вант следует выполнять автономным, например, в виде низкотемпературных аккумуляторных батарей, показанных на рис. 4, или подвесного оборудования (малогабаритных

бензиновых генераторов или поршневых компрессоров).

Внешнее управление ВЛ выполняется автономно или по беспроводной связи. Для более коротких внутренних вант питание и управление ВЛ можно осуществлять по кабелю. При необходимости ВЛ можно оснастить видеокамерой и другими приборами и оборудованием. На рис. 5, в приведена циклограмма функционирования ВЛ при организации роботизированной очистки ванты 14 от наледи или снежного покрытия 15, включающая в себя следующие шаги.

Шаг I — исходное положение. Перед установкой ВЛ с ванты удаляют наледь или снежное покрытие. Затем отсоединяют от вершин АО по одной из законцовок стержня боковой грани, например CD, и смежных с ним стержней фронтальной AC и тыльной DF граней, устанавливают ВЛ на ванте и восстанавливают соединение разомкнутых законцовок. Фронтальную грань CDF располагают непосредственно перед неочищенным от наледи или снежного покрытия участком ванты.

Далее по команде от СУ уменьшают длины НЛП всех граней АО — боковых граней до минимальных значений, определяемых по показаниям соответствующих ДЛП, а фронтальной DEF и тыльной ABC до момента контакта упоров ШД с поверхностью ванты и фиксацией ЖТС тыльной грани ABC с требуемыми радиальными усилиями, определяемыми по показаниям соответствующих ДС и ДЛП. Далее вводят в СУ данные о ванте и ее поверхности (геометрические параметры ванты и наледи или снежного покрытия, физико-механические параметры материала поверхности ванты или защитной оболочки и др.), а также с учетом показаний ДЛП всех НЛП — координаты вершин фронтальной и тыльной граней и ВЛ относительно базовой (инерциальной) системы координат, и ВЛ готов к работе.

Шаг II — удаление с ванты снежного покрытия и подготовка ВЛ к удалению наледи. Снежное покрытие удаляют с ванты путем продольного скребкового воздействия фронтальной грани CDF за счет ее осевого перемещения на шаг рабочего цикла (ШРЦ) (см. рис. 5, в) путем увеличения длин НЛП боковых граней.

В случае удаления с ванты наледи выполняют подготовительную операцию, при которой предварительно по командам от СУ включают НЛП фронтальной грани CDF и увеличивают

длины ее ребер до получения требуемого зазора между упорами ШД ЖТС и максимальным поперечным размером ванты с наледью. Затем по командам от СУ, формируемым по сигналам от ДЛП, НЛП фронтальной грани CDF выключают. Далее командам от СУ включают НЛП боковых граней и после осевого перемещения фронтальной грани CDF на ШРЦ, контролируемый ДЛП выключают, и ВЛ готов к удалению наледи с ванты на данном участке.

Шаг III — удаление наледи и подготовка ВЛ к переходу на следующий участок ванты. Наледь удаляют путем ее обжатия ЖТС за счет уменьшения длин НЛП фронтальной грани CDF до момента механического контакта упоров ЖТС с наружной поверхностью ванты с заданным усилием, определяемым по показаниям соответствующих ДЛП и ДС. В результате происходит разрушение и принудительное обрушение наледи с ванты.

В зависимости от физических свойств наледи процесс воздействия может носить плавный, ударный или виброударный характер. При необходимости согласованным изменением длин боковых стержней подвижная фронтальная грань CDF может осуществлять повороты относительно неподвижной тыльной грани ABC в обоих направлениях. В случае очистки ванты от снежного покрытия на упоры ШД ЖТС могут быть установлены серповидные скребки (на рис. 5 не показаны), дуговые вырезы которых соответствуют поперечному профилю наружной поверхности ванты. Снежное покрытие удаляется осевым поступательным или возвратно-поступательным перемещением серповидных скребков фронтальной грани CDF в пределах выбранного шага.

После окончания очистки ванты от наледи и снега на заданном участке ВЛ переводят в исходное положение на новом участке очистки с одновременным перемещением вдоль ванты на ШРЦ (см. рис. 5, в, шаг I). Для этого длины ребер фронтальной грани DEF уменьшают до момента ее фиксации на ванте и увеличивают длины ребер тыльной грани ABC до обеспечения гарантированного зазора между упорами ЖТС и наружной поверхностью ванты. После уменьшения длин НЛП боковых граней на ШРЦ длины НЛП тыльной грани ABC уменьшают до момента ее фиксации через ЖТС на ванте с требуемыми радиальными усилиями. В результате после перемещения на ШРЦ ВЛ вновь принимает исходное положение на но-

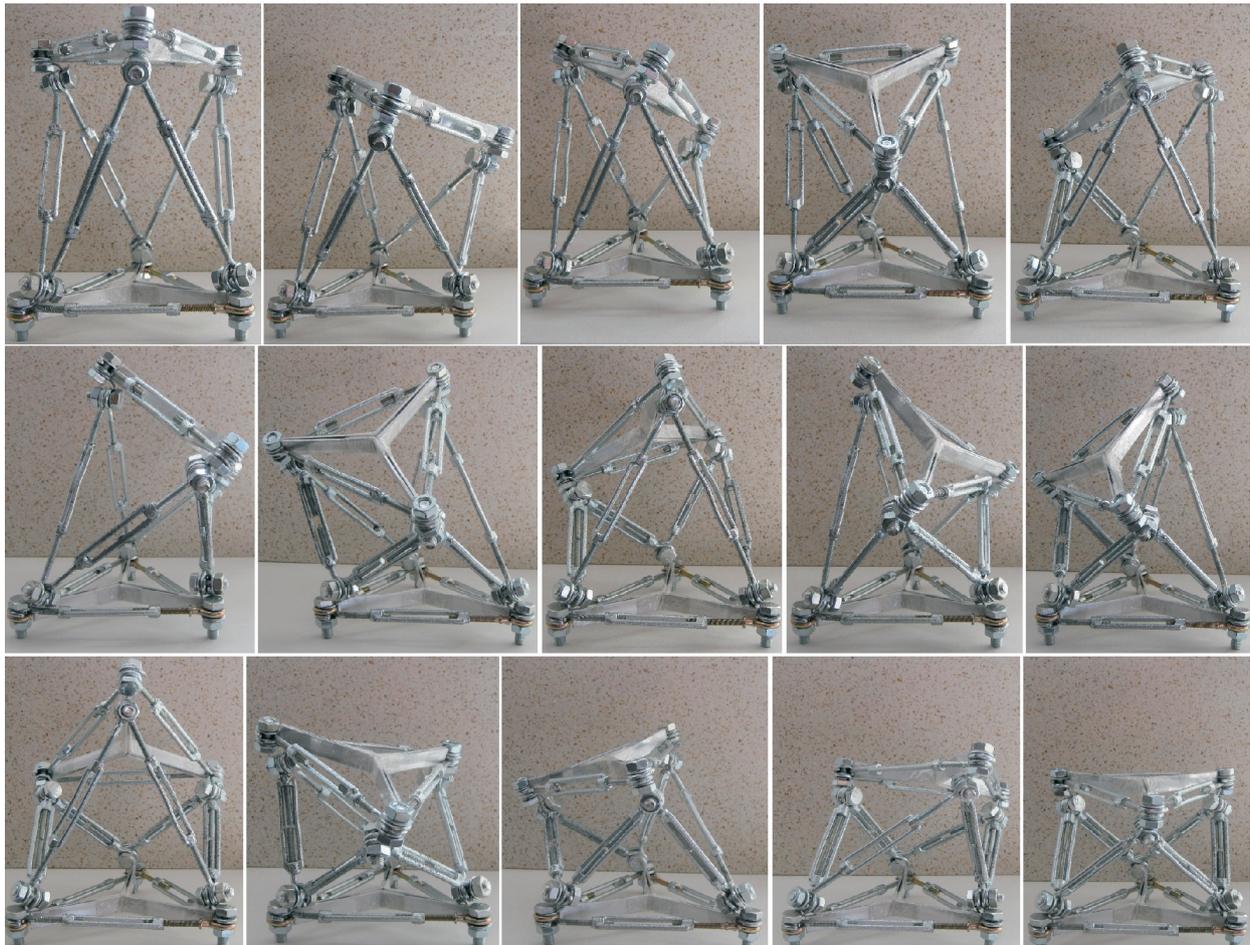


Рис. 6. Манипуляционные возможности кинематической силовой физической модели ВЛ с фронтальным и тыльным ЖТС



Рис. 7. Рабочий цикл кинематической силовой физической модели ВЛ на имитаторе ванты с участком наледи

вом участке ванты (рис. 5, в, шаг I), и процесс ее очистки повторяется.

После окончания процесса очистки ванты ВЛ перемещается в исходную нижнюю точку.

Процесс спуска по ванте может быть аналогичным процессу подъема или организован путем скольжения ВЛ по ванте под действием силы тяжести с подтормаживанием при необходимо-

сти с помощью ЖТС тыльной и (или) фронтальной гранью.

Манипуляционные возможности кинематической силовой физической модели ВЛ с ЖТС фронтальной и тыльной граней показаны на рис. 6, а пример удаления наледи с имитатора ванты с помощью ЖТС фронтальной грани — на рис. 7.

В дальнейшем запланировано провести разработку и исследовать полномасштабный экспериментальный образец ВЛ.

Выводы

1. Рассмотрена проблема самопроизвольного обрушения с вант ВМГ наледи и снега на проезжую часть и актуальность применения роботизированной очистки ВМГ от наледи и снега.

2. Проведен анализ вантовых инспекционных СРТС и выбор базового образца в виде

СРТС пушпульного типа для роботизированной очистки вант ВМГ от наледи и снега. Показаны его достоинства и перспективность.

3. Предложена концепция построения ВЛ на основе СРТС пушпульного типа с пространственным механизмом параллельной кинематики, выполненного на основе активного октаэдра с 12 DOF.

4. На примере кинематической силовой физической модели ВЛ с ЖТС продемонстрированы работоспособность и принципиальная возможность создания ВЛ в виде СРТС пушпульного типа на основе АО с ЖТС фронтальной и тыльной граней.

5. ВЛ можно эффективно использовать для роботизированной механической очистки от наледи и снега не только ВМГ, но и других объектов типа высоковольтных проводов ЛЭП и подвесных канатных дорог, а также такелажа крупногабаритных судов.

Литература

- [1] Колюшев И.Е. Вантовые мосты-гиганты: сравнительный анализ инженерных решений. *Дороги. Инновации в строительстве*, 2011, № 10, с. 46–50.
- [2] Chen W.F., Duan L., eds. *Handbook of international bridge engineering*. CRC Press, 2013. 1394 p.
- [3] Разживина А.Э., Соболева А.Н. Мостовые сооружения вантового типа. *Alfabuild*, 2018, т. 5, № 3, с. 76–85.
- [4] Саяпин С.Н. Перспективный самоперемещающийся параллельный робот «Октаэдральный ледоскалыватель» для очистки вантовых мостов от наледи и снега. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2022, № 4, с. 97–107.
- [5] Расулова Э. Перед машиной падали огромные глыбы льда: девушка рассказала, как пережила ледопад на Русском мосту. *Комсомольская правда*, 2020. URL: <https://www.dv.kp.ru/daily/21712093.5/4329464/> (дата обращения: 07.02.2025).
- [6] Zhang X., Zhou W., Li H. Electromechanical impedance-based ice detection of stay cables with temperature compensation. *Struct. Control Health Monit.*, 2019, vol. 26, no. 9, art. e2384, doi: <https://doi.org/10.1002/stc.2384>
- [7] Matejicka L., Georgakis Ch.T. A review of ice and snow risk mitigation and control measures for bridge cables. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2022, vol. 193, art. 103429, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103429>
- [8] Hoekstra G. Port Mann Bridge reopens after «slush bombs» endanger drivers, damage vehicles. *Times Colonist*, 20.12.2012. URL: <https://www.timescolonist.com/archive/port-mann-bridge-reopens-after-slush-bombs-endanger-drivers-damage-vehicles-4572409> (дата обращения: 07.02.2025).
- [9] McElroy J. Slush bombs damage cars on Alex Fraser and Port Mann bridges. *CBC News*, 05.12.2016. URL: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/alex-fraser-port-mann-ice-slush-snow-bomb-1.3882759> (дата обращения: 07.22025).
- [10] Henson R. Bridge brilliance. Falling ice. *New Civil Engineer*, 10.08.2016. URL: <https://www.newcivilengineer.com/archive/bridge-brilliance-falling-ice-10-08-2016/> (дата обращения: 07.02.2025).
- [11] Mott S., Moon F., Basily B. *Validation and refinement of a novel deicing system for stay cables*. Tech Report Number. CAIT-UTC-NC55. Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2020. 44 p. URL: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/64583> (дата обращения: 07.02.2025).

- [12] Guduid K. Bridge drama. Massive falling icicles smash three car windscreens on Queensferry Crossing forcing bridge bosses to launch investigation into frozen cables. *The Scottish Sun*, 31.03.2019. URL: <https://www.thescottishsun.co.uk/news/4064817/queensferry-crossing-ice-bridge-frozen-smashed-car/> (дата обращения: 07.02.2025).
- [13] Pooran N. Furious driver says Queensferry Crossing ice 'could have killed someone' as eight vehicles hit. *Edinburghlive*, 11.02.2020. URL: <https://www.edinburghlive.co.uk/news/edinburgh-news/furious-driver-says-queensferry-crossing-17727686> (дата обращения: 07.02.2025).
- [14] Kleissl K., Georgakis C. Bridge ice accretion and de- and anti-icing systems: a review. *Proc. 7th Int. Cable Supported Bridge Operators' Conf.*, 2010, pp. 161–167.
- [15] Yu W.B., Yi X., Guo M. et al. State of the art and practice of pavement anti icing and de icing techniques. *Sci. Cold Arid. Reg.*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 14–21.
- [16] Mirto C., Abdelaal A., Nims D. et al. Icing management on the Veterans' glass city skyway stay cables. *Transp. Res. Rec.*, 2015, vol. 2482, no. 1, pp. 74–81, doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2482-10>
- [17] Шкапцов В. Системы прогнозирования и мониторинга сброса гололеда. *Электроэнергия, передача и распределение*, 2011, № 1, с. 24–28.
- [18] Winter safety on Alex Fraser and Port Mann bridges explained. *TranBC: веб-сайт*. URL: <https://www.tranbc.ca/2019/03/05/winter-safety-on-alex-fraser-and-port-mann-bridges-explained/> (дата обращения: 07.02.2025).
- [19] Lus S., Williams K. Port Mann ice bombs to be fought with de-icers, cable sweepers. *CBC News*, 05.12.2016. URL: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/port-mann-ice-bombs-to-be-fought-with-de-icers-cable-sweepers-1.1403402> (дата обращения: 07.02.2025).
- [20] Автовышки: классификация по высоте подъема. *cdminfo.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.cdminfo.ru/biblioteka-stroitelnoy-tehniki/biblioteka-avtogidropodemnikov/avtovyishki-klassifikatsiya-po-vyisote-podema.html> (дата обращения: 07.02.2025).
- [21] FAQ. Защита вантовых мостов от обледенения. *mostlena.ru: веб-сайт*. URL: <https://mostlena.ru/vopros/zashhita-vantovyh-sistem-ot-obledeneniya/> (дата обращения: 07.02.2025).
- [22] Саяпин С.Н. Анализ и перспективы развития роботизированной механической очистки проводов ЛЭП от снега и льда. *Электрические станции*, 2021, № 2, с. 21–35, doi: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.1075.2.004>
- [23] Fang G., Cheng J. Advances in climbing robots for vertical structures in the past decade: a review. *Biomimetics*, 2023, vol. 8, no. 1, art. 47, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010047>
- [24] Briand P. Robots meet bridge, road inspection. *NH Business Review*, 29.07.2022. URL: https://tficapital.com/wp-content/uploads/2022/07/Infraspect_Article_7-29-2022.pdf (дата обращения: 07.02.2025).
- [25] Xu F., Wang X., Wang L. Cable inspection robot for cable stayed bridges: Design, analysis, and application. *J. Field Robot.*, 2011, vol. 28, no. 3, pp. 441–459, doi: <https://doi.org/10.1002/rob.20390>
- [26] Kong X., Liu Z., Liu H. et al. Recent advances on inspection, monitoring, and assessment of bridge cables. *Autom. Constr.*, 2024, vol. 168, no. 10, art. 105767, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105767>
- [27] Yun H.B., Kim S.H. et al. Development of inspection robots for bridge cables. *Sci. World J.*, 2013, vol. 2013, no. 1, art. 967508, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/967508>
- [28] Xu F., Hu J.L., Wang X. et al. Helix cable-detecting robot for cable-stayed bridge: design and analysis. *Int. J. Robot. Autom.*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 406–414, doi: <https://dx.doi.org/10.2316/Journal.206.2014.4.206-4213>
- [29] Xu F., Dai S., Jiang Q. et al. Developing a climbing robot for repairing cables of cable-stayed bridges. *Autom. Constr.*, 2021, vol. 129, no. 6, art. 103807, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103807>
- [30] Wang Z., He B., Zhou Y. et al. Design and implementation of a cable inspection robot for cable-stayed bridges. *Robotica*, 2021, vol. 39, no. 8, pp. 1417–1433, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574720001253>

- [31] Wang Z., Wang Y., Zhang B. Development and experiment of clamp type submarine cable inspection robot. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 6, art. 627, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11060627>
- [32] Cho K.H., Jin Y.H., Kim H.M. et al. Development of novel multifunctional robotic crawler for inspection of hanger cables in suspension bridges. *IEEE ICRA*, 2014, pp. 2673–2678, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907242>
- [33] Bosch H.R., Pagenkopf J.R. *Development of a cable robot and measurement of stay cable roundness*. Publication no. FHWA-HRT-24-043. US Department of Transportation, 2024. 138 p.
- [34] Zheng Z., Hu S., Ding N. A biologically inspired cable climbing robot: CCRobot — design and implementation. *IEEE ROBIO*, 2018, pp. 2354–2359, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665180>
- [35] Gerrard N. Cleaning machine to stop ice build-up on Queensferry Crossing cables. *constructionmanagement.co.uk: веб-сайт*. URL: <https://constructionmanagement.co.uk/cleaning-machine-to-stop-ice-build-up-on-queensferry-crossing-cables/> (дата обращения: 07.02.2025).
- [36] Kim J., Seo D.W., Jung K.S. et al. Development of inspection robot for removing snow on stays of cable-stayed bridge. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 246–252, doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.246>

References

- [1] Kolyushev I.E. Giant cable-stayed bridges: comparative analysis of engineering solutions. *Dorogi. Innovatsii v stroitelstve*, 2011, no. 10, pp. 46–50. (In Russ.).
- [2] Chen W.F., Duan L., eds. *Handbook of international bridge engineering*. CRC Press, 2013. 1394 p.
- [3] Razzhivina A.E., Soboleva A.N. Pontilice of cable structure. *Alfabuild*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 76–85. (In Russ.).
- [4] Sayapin S.N. Innovative mobile parallel octahedral ice-breaker to remove ice and snow from cable-stayed bridges. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2022, no. 4, pp. 97–107. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 4, pp. 364–372, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822030104>)
- [5] Rasulova E. Huge blocks of ice fell in front of the car: a girl told how she survived the icefall on the Russian Bridge. *Komsomolskaya pravda*, 2020. URL: <https://www.dv.kp.ru/daily/21712093.5/4329464/> (accessed: 07.02.2025). (In Russ.).
- [6] Zhang X., Zhou W., Li H. Electromechanical impedance-based ice detection of stay cables with temperature compensation. *Struct. Control Health Monit.*, 2019, vol. 26, no. 9, art. e2384, doi: <https://doi.org/10.1002/stc.2384>
- [7] Matejicka L., Georgakis Ch.T. A review of ice and snow risk mitigation and control measures for bridge cables. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2022, vol. 193, art. 103429, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103429>
- [8] Hoekstra G. Port Mann Bridge reopens after «slush bombs» endanger drivers, damage vehicles. *Times Colonist*, 20.12.2012. URL: <https://www.timescolonist.com/archive/port-mann-bridge-reopens-after-slush-bombs-endanger-drivers-damage-vehicles-4572409> (accessed: 07.02.2025).
- [9] McElroy J. Slush bombs damage cars on Alex Fraser and Port Mann bridges. *CBC News*, 05.12.2016. URL: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/alex-fraser-port-mann-ice-slush-snow-bomb-1.3882759> (accessed: 07.2.2025).
- [10] Henson R. Bridge brilliance. Falling ice. *New Civil Engineer*, 10.08.2016. URL: <https://www.newcivilengineer.com/archive/bridge-brilliance-falling-ice-10-08-2016/> (accessed: 07.02.2025).
- [11] Mott S., Moon F., Basily B. *Validation and refinement of a novel deicing system for stay cables*. Tech Report Number CAIT-UTC-NC55. Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2020. 44 p. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/64583> (accessed: 07.02.2025).

- [12] Guduid K. Bridge drama. Massive falling icicles smash three car windscreens on Queensferry Crossing forcing bridge bosses to launch investigation into frozen cables. *The Scottish Sun*, 31.03.2019. URL: <https://www.thescottishsun.co.uk/news/4064817/queensferry-crossing-ice-bridge-frozen-smashed-car/> (accessed: 07.02.2025).
- [13] Pooran N. Furious driver says Queensferry Crossing ice 'could have killed someone' as eight vehicles hit. *Edinburghlive*, 11.02.2020. URL: <https://www.edinburghlive.co.uk/news/edinburgh-news/furious-driver-says-queensferry-crossing-17727686> (accessed: 07.02.2025).
- [14] Kleissl K., Georgakis C. Bridge ice accretion and de- and anti-icing systems: a review. *Proc. 7th Int. Cable Supported Bridge Operators' Conf.*, 2010, pp. 161–167.
- [15] Yu W.B., Yi X., Guo M. et al. State of the art and practice of pavement antiicing and deicing techniques. *Sci. Cold Arid. Reg.*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 14–21.
- [16] Mirto C., Abdelaal A., Nims D. et al. Icing management on the Veterans' glass city skyway stay cables. *Transp. Res. Rec.*, 2015, vol. 2482, no. 1, pp. 74–81, doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2482-10>
- [17] Shkaptsov V. Ice discharge forecasting and monitoring systems. *Elektroenergiya, peredacha i raspredelenie* [Electric Power. Transmission and Distribution], 2011, no. 1, pp. 24–28. (In Russ.).
- [18] Winter safety on Alex Fraser and Port Mann bridges explained. *TranBC: website*. URL: <https://www.tranbc.ca/2019/03/05/winter-safety-on-alex-fraser-and-port-mann-bridges-explained/> (accessed: 07.02.2025).
- [19] Lus S., Williams K. Port Mann ice bombs to be fought with de-icers, cable sweepers. *CBC News*, 05.12.2016. URL: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/port-mann-ice-bombs-to-be-fought-with-de-icers-cable-sweepers-1.1403402> (accessed: 07.02.2025).
- [20] Avtovyshki: klassifikatsiya po vysote podema [Auto towers: classification by lifting height]. *cdminfo.ru: website*. URL: <http://www.cdminfo.ru/biblioteka-stroitelnoy-tehniki/biblioteka-avtogidropodemnikov/avtovyishki-klassifikatsiya-po-vyisote-podema.html> (accessed: 07.02.2025). (In Russ.).
- [21] FAQ. Zashchita vantovykh mostov ot obledeneniya [FAQ. Protection of cable-stayed bridges from icing]. *mostlena.ru: website*. URL: <https://mostlena.ru/vopros/zashchita-vantovykh-sistem-ot-obledeneniya/> (accessed: 07.02.2025). (In Russ.).
- [22] Sayapin S.N. The analysis and development prospects of robots use for mechanical cleaning of power transmission line wires from snow and ice. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations], 2021, no. 2, pp. 21–35, doi: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.1075.2.004> (in Russ.).
- [23] Fang G., Cheng J. Advances in climbing robots for vertical structures in the past decade: a review. *Biomimetics*, 2023, vol. 8, no. 1, art. 47, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010047>
- [24] Briand P. Robots meet bridge, road inspection. *NH Business Review*, 29.07.2022. URL: https://tficapital.com/wp-content/uploads/2022/07/Infraspect_Article_7-29-2022.pdf (accessed: 07.02.2025).
- [25] Xu F., Wang X., Wang L. Cable inspection robot for cable-stayed bridges: Design, analysis, and application. *J. Field Robot.*, 2011, vol. 28, no. 3, pp. 441–459, doi: <https://doi.org/10.1002/rob.20390>
- [26] Kong X., Liu Z., Liu H. et al. Recent advances on inspection, monitoring, and assessment of bridge cables. *Autom. Constr.*, 2024, vol. 168, no. 10, art. 105767, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105767>
- [27] Yun H.B., Kim S.H. et al. Development of inspection robots for bridge cables. *Sci. World J.*, 2013, vol. 2013, no. 1, art. 967508, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/967508>
- [28] Xu F., Hu J.L., Wang X. et al. Helix cable-detecting robot for cable-stayed bridge: design and analysis. *Int. J. Robot. Autom.*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 406–414, doi: <https://dx.doi.org/10.2316/Journal.206.2014.4.206-4213>
- [29] Xu F., Dai S., Jiang Q. et al. Developing a climbing robot for repairing cables of cable-stayed bridges. *Autom. Constr.*, 2021, vol. 129, no. 6, art. 103807, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103807>

- [30] Wang Z., He B., Zhou Y. et al. Design and implementation of a cable inspection robot for cable-stayed bridges. *Robotica*, 2021, vol. 39, no. 8, pp. 1417–1433, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574720001253>
- [31] Wang Z., Wang Y., Zhang B. Development and experiment of clamp type submarine cable inspection robot. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 6, art. 627, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11060627>
- [32] Cho K.H., Jin Y.H., Kim H.M. et al. Development of novel multifunctional robotic crawler for inspection of hanger cables in suspension bridges. *IEEE ICRA*, 2014, pp. 2673–2678, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907242>
- [33] Bosch H.R., Pagenkopf J.R. *Development of a cable robot and measurement of stay cable roundness*. Publication no. FHWA-HRT-24-043. US Department of Transportation, 2024. 138 p.
- [34] Zheng Z., Hu S., Ding N. A biologically inspired cable climbing robot: CCRobot — design and implementation. *IEEE ROBIO*, 2018, pp. 2354–2359, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665180>
- [35] Gerrard N. Cleaning machine to stop ice build-up on Queensferry Crossing cables. *constructionmanagement.co.uk: website*. URL: <https://constructionmanagement.co.uk/cleaning-machine-to-stop-ice-build-up-on-queensferry-crossing-cables/> (accessed: 07.02.2025).
- [36] Kim J., Seo D.W., Jung K.S. et al. Development of inspection robot for removing snow on stays of cable-stayed bridge. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 246–252, doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.246>

Статья поступила в редакцию 13.02.2025

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4); профессор. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research Worker. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4); Professor. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. Проблема очистки вантовых мостов-гигантов от наледи и снега. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 37–51.

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. The problem of cleaning the cable-stayed giant bridges from ice and snow. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 37–51.