

Научная статья
УДК 621.873 : 69.057.7

Исследование и сравнительный анализ конструкций и специфики работы кранов для монтажа пролетных строений мостовых сооружений

Никита Сергеевич Грязных

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
Санкт-Петербург, Россия
n-gryaznyh@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9009-8604>

Аннотация. Для строительства объектов транспортной инфраструктуры, в частности мостовых сооружений, используются различные средства механизации строительства, наиболее популярными из которых являются краны различной конструкции и назначения. Для ускорения монтажа сборных пролетных строений используются порталные краны, позволяющие смонтировать готовые балки в проектное положение. К сожалению, на Российском рынке такие краны представлены крайне скудно, в связи с чем необходимо провести исследование конструкций и особенностей работы существующих моделей порталных кранов. Для сравнительного анализа использовались системы, в качестве главных балок которых выступали решетчатые фермы и коробчатые стальные балки, работающие в совокупности с гидравлическими приводами. Были проведены исследования по изучению различных типов порталных кранов, изучены зависимости положения груза на работу порталных кранов. В качестве основных показателей были рассмотрены такие как: длины, ширина и высота главных балок порталных кранов, скорость перемещения тележки, максимальная грузоподъемность, масса кранов, а также типы конструкций порталных кранов. Отсутствие достаточного количества данных о различных системах порталных кранов и методике их расчета и проектирования на территории Российской Федерации, дает достаточные основания для проведения исследования и сбора необходимых данных.

Ключевые слова: средства механизации строительства, пролетное строение, мостовое сооружение, порталный кран, гидравлический привод, объекты транспортной инфраструктуры, технология строительства.

Для цитирования: Грязных Н.С. Исследование и сравнительный анализ конструкций и специфики работы кранов для монтажа пролетных строений мостовых сооружений // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 2 (40).

Original article

Research and comparative analysis of constructions and specifics of work cranes for the installation spans of the bridge structures

Nikita S. Gryaznyh

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
n-gryaznyh@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9009-8604>

Abstract. For the building of transport infrastructure objects, in particular bridge structures, various means of constructions mechanization are used, the most popular of which are cranes of various design and purpose. To speed up the installation of prefabricated spans, portal cranes are used, allowing ready-made beams to be install in the design position. Unfortunately, such cranes are extremely poorly represented on the Russian market, therefore it is necessary to research of design and operating features of existing models of portal cranes. For comparative analysis, systems were used whose main beams were lattice trusses and box-shaped steel beams, working in conjunction with hydraulic drives. Research was carried out to study various types of portal cranes, and dependence of position of the load on the work of portal cranes was studied. The main indicators considered were: the length, width, and height of the main beams of portal cranes, the speed of movement of the trolley, the maximum lifting capacity, the weight cranes, as well the types of structures of portal cranes. The lack of sufficient data on various systems of portal cranes and the methodology for their calculation and design on the territory of the Russian Federation provides sufficient grounds for conducting research and collecting the necessary data.

Keywords: mechanical equipment, span, bridge structure, portal crane, hydraulic gear, objects of the transport infrastructure, building method.

For citation: Gryaznyh N.S. Research and comparative analysis of constructions and specifics of work cranes for the installation spans of the bridge structures // *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. № 2 (40).

Введение

Транспортная инфраструктура в России представлена обширным многообразием различных сооружений, таких как мосты, путепроводы, эстакады, подпорные стенки, водопропускные трубы и другие. К сожалению, большая часть этих сооружений приближается к исчерпанию своего ресурса, либо нуждается в работах по капитальному ремонту или реконструкции,

кроме того, требуется возведение новых объектов транспортной инфраструктуры.

В современном транспортном строительстве большое внимание уделяют средствам механизации и ускорения строительства, таким как: краны различной конструкции и назначения, системы для навесного бетонирования, копровые установки, бурильные машины, машины для устройства фундаментов и др. Классификацию средств механизации можно также подразделять на средства для строительства из сборного или из монолитного железобетона, а также подразделять по спектру выполняемых работ (бетонные, монтажные, земляные и др.). К сожалению, спектр специализированных машин и механизмов для строительства в Российской Федерации представлен достаточно скудно, что обуславливает важность и актуальность исследований и разработки отечественного оборудования и техники.

В целях ускорения процесса строительства строительные компании нередко отдают предпочтение конструкциям из сборного железобетона, поскольку такие конструкции имеют ряд преимуществ по сравнению с монолитными, в частности: позволяют минимизировать брак, так как сами конструкции изготавливаются в заводских условиях и проходят должный контроль на всех стадиях производства; позволяют ускорить возведение транспортных сооружений, ввиду отсутствия работ по устройству опалубки, монолитных работ, арматурных работ и др. Кроме того, работы со сборным железобетоном, ввиду ускоренных методов строительства позволяют избежать или минимизировать перебои в транспортном движении в пределах зон строительных работ.

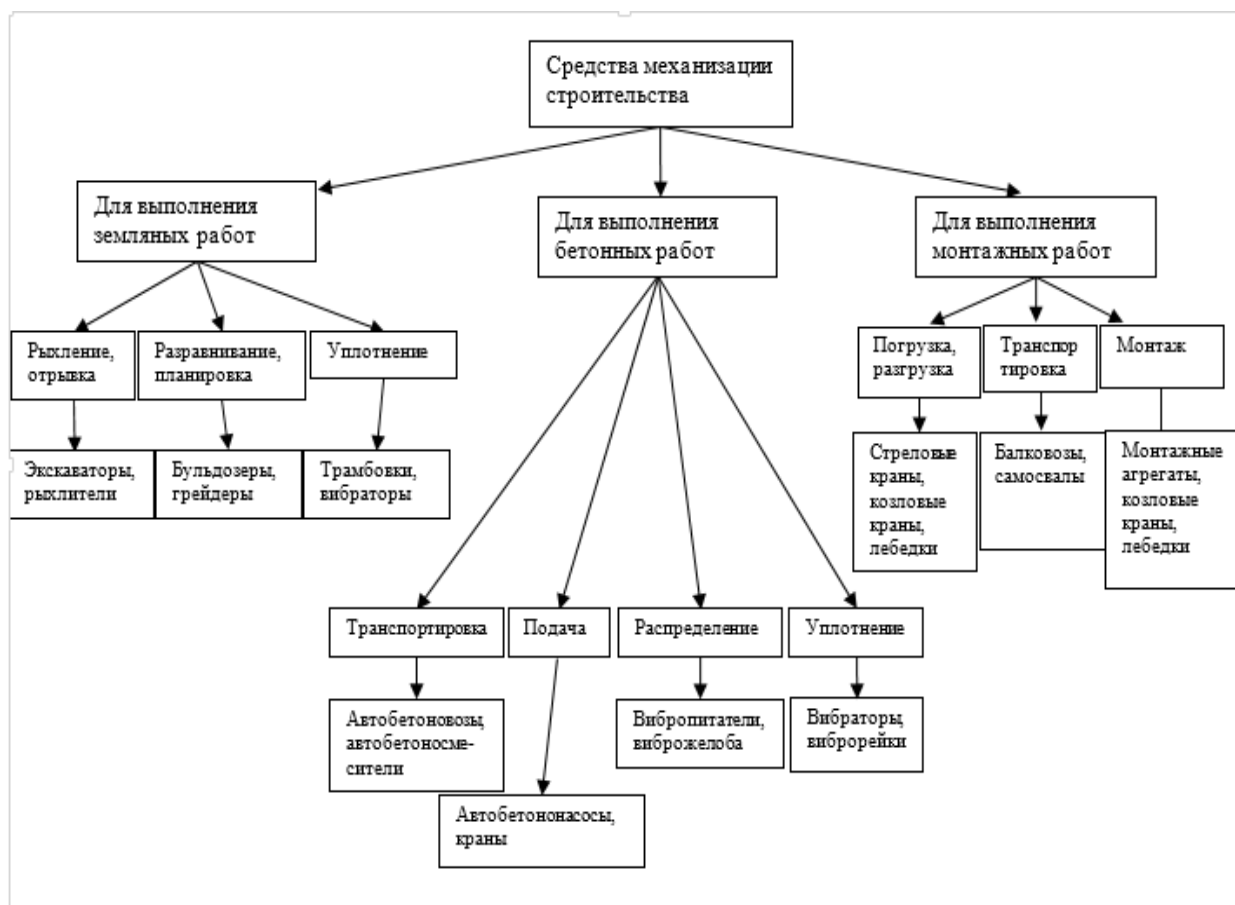


Рис. 1. Схема классификации средств механизации строительства

Кроме представленных на схеме средств механизации (рис. 1), существуют системы, позволяющие сочетать несколько механизмов одновременно, такие как: агрегат для навесного бетонирования мостов – позволяет передвигать опалубку пролетного строения, выполнять работы по его бетонированию и последующему набору бетоном проектной прочности; порталный кран для монтажа балок и блоков пролетного строения – позволяет выполнять работы по погрузке и монтажу балок и блоков в проектное положение. Также существуют различные самоподъемные системы, позволяющие бетонировать высотные здания и сооружения, при этом система остается в сборе на протяжении всего периода выполнения работ.

Портальный кран для монтажа целых балок и блоков пролетных строений мостовых сооружений представляет собой самоподвижную

систему, состоящую из несущих металлоконструкций, таких как главные балки или фермы, опоры крана, поперечные и продольные связи, а также гидравлических устройств и приводов для приведения всей системы и отдельных ее частей в движение, таких как тележка с гидроцилиндрами, полиспасты для поднятия блоков, гидродомкраты для перемещения системы с опоры на опору.

Анализируя отечественные и зарубежные источники, можно сделать вывод об актуальности данной темы, в частности касаясь проектирования и расчета различных систем кранов, сбора нагрузок в таких системах, которые бы соответствовали требованиям строительных требований и норм, действующих на территории Российской Федерации, а также требованиям прочности, надежности, долговечности и нормальной эксплуатации представленных средств механизации.

При возведении мостов из сборного железобетона нередко используются наземные технологические транспортные средства, но их применение нередко связано с рядом трудностей, такими как особенности рельефа в зоне строительства, высокие опоры, труднодоступные места в условиях плотной городской застройки, поэтому на места наземных нередко приходят транспортные технологические средства, позволяющие вести работы в непосредственной близости либо же на самой конструкции, коими и являются порталные краны.

В зарубежных странах с помощью порталных кранов, которые нередко называют «машинами для монтажа мостов» (Bridge erections machines) или «машинами для запуска балок» (Girder launching machine) монтируют в проектное положение блоки пролетных строений или целые пролеты длиной до 50-65 м и массой до 600-1500 тонн. Как правило, работы по устройству пролетных строений проходят в 3 этапа. Первый этап проходит в заводских условиях либо же на специальных площадках или

стендах, во время 1 этапа происходит устройство опалубки, производятся арматурные и бетонные работы, балка распалубливается после набора проектной прочности. Во время второго этапа происходит доставка и подача балок или блоков пролетных строений к месту производства работ с помощью специальных балковозов или иной техники. На третьем этапе балка с помощью специальной тележки поставляется в зону работы крана, поднимается и устанавливается в проектное положение на опорные части, после чего кран перемещается в новое положение после чего третий этап повторяется в случае наличия готовых балок на строительной площадке. Если же речь идет о большепролетном мостовом сооружении, состоящем из большого количества блоков, то по главной балке крана с помощью гидравлических цилиндров перемещается тележка, которая подает блоки в проектное положение (рис. 2). Тележка оснащена системой полиспастов для подъема блоков с понтонов, балковозов, подмостей и т.д. В зависимости от того из скольких блоков и какой массы состоит пролетное строение может варьироваться количество тележек для его устройства. Как уже было сказано, этот метод позволяет обойти ряд трудностей и значительно снизить сроки строительства, но он также и требует высокого уровня технологий и высокой стоимости оборудования.

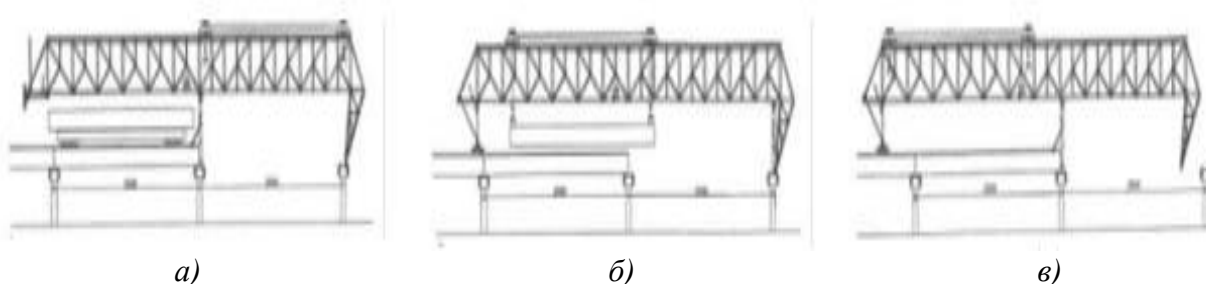


Рис. 2. Схема к монтажу балок пролетного строения мостового сооружения:

- а) захват пролетного строения с устоя или уже смонтированного пролетного строения;
- б) перемещение пролетного строения;
- в) монтаж пролетного строения в проектное положение

Данный метод не учитывает многих деталей, таких как: технология и метод строительства возводимого сооружения, количество задействованных в строительстве бригад, технология сооружения балок пролетного строения, продолжительность строительства и другие. Таким образом, темой исследования предлагается изучить различные конструкции монтажных кранов, провести их сравнительный анализ и выбрать наиболее оптимальную с различных, оговоренных ранее критериев, конструкцию, а также учесть при этом технологию строительства балок пролетного строения, количество и состав рабочих бригад и факторы влияющие на продолжительность строительства. Таким образом предлагается выбрать следующую структуру исследования:

- изучение и выбор оптимального метода сооружения балок и блоков пролетного строения;
- изучение и выбор технологии строительства возводимого мостового сооружения;
- исследования влияния сопутствующих факторов на продолжительность и качество производимых работ;
- выбор совокупности оптимальных решений и их оценка.

Значимость исследования обусловлена в первую очередь отсутствием на территории Российской Федерации подобных средств механизации, а также необходимостью развития современных методов строительства.

Основная часть

Предметом исследования являются зарубежные системы монтажных кранов различных конструкций и характеристик, а также изучение их характеристик и их влияния друг на друга, построение графиков зависимостей, выбор оптимальной конструкции и изучение основ ее проектирования.

Ниже представлены различные зарубежные системы монтажных систем и их характеристики (табл. 1).

Таблица 1

Таблица систем порталных кранов и их характеристик

Модель крана	Основные характеристики крана					Основные характеристики главных ферм/балок					Скорости работы крана	
	Допустимая длина пролета (м)	Грузоподъемность (т)	Максимальный поперечный уклон (%)	Максимальный продольный уклон (%)	Вес с оборудованием (т)	Длина (м)	Ширина (м)	Высота (м)	Расстояние между фермами (м)	Погонный вес (т/м)	Подъем (м/мин)	Перемещение (м/мин)
LGS 140-84	84	140	8	5	692	136,5	2	6,6	7,6	1,2*2	0,1-5,0	0,2-15,0
LGS 1300-45	94	100	6	5	690	142,5	2	6,4	7,6	1,5*2	0,4-1,5	1,5-12,0
LGS 200-100	100	200	-	-	932	175,5	2,2	7,2	7,6	1,5*2	0,2-3	0,5-10,0
LGS 100-55	55	100	-	-	225	89,6	1,15	4,2	5,6	0,7*2	0,1-0,9	0,2-14,0
LGS-C-O-40-53	53,5	450	-	4	291,2	101,25	1,5	5,1	6,0	0,825*2	0,1-1,14	0,5-8,6

Сфера производства порталных кранов достаточно узкоспециализирована и каждый кран проектируется и изготавливается индивидуально под каждый проект. При этом необходимо учитывать и то, что каждый производитель имеет свою технологию и свои нюансы в производстве, а также заказчик имеет свои предпочтения и оставляет за собой право на корректировку [1]. Несмотря на вышесказанное большинство порталных кранов, как видно из представленных выше, представляют собой системы их двух главных треугольных ферм, состоящих из нескольких сварных модулей или блоков. Диагонали и пояса ферм, как правило, крепятся с помощью болтов и штифтов для облегчения транспортировки. Сама система также оснащена лебедками и тележками для перемещения монтируемых блоков и балок. Существуют также и системы с одной главной балкой или фермой, соединения в которых допускают роботизированную сварку, а тележки и лебедки обладают меньшими размерами и мощностями. Сечения главных несущих конструкций в таких системах представляют собой, как правило, две сварные двутавровые балки либо одну треугольную ферму. Такие системы используются для монтажа меньших пролетов, длинами до 50 м либо отдельных блоков пролетных строений. На главные фермы подвешивается платформа, для монтажа оборудования и работы

инженеров, а также пути для перемещения тележек-лебедок. Местные соединения элементов в таких системах предназначены для быстрой сборки, а модульность конструкции позволяет разрабатывать различные вариации сборки [2].

Как уже было сказано, такие системы позволяют производить работы с высокой скоростью, точностью и качеством, а также порталные краны легко использовать повторно. К минусам таких систем можно отнести их большой вес, трудоемкость и высокую квалификацию рабочих, а также их использование предполагает большое количество специализированной техники, особенно на большепролетных сооружениях.

Самый распространенный метод установки portalного крана – с помощью наземных кранов. Краны обеспечивают простоту и скорость производимых работ, а также подразумевают минимум инвестиций. Краны при необходимости можно расположить по всей длине пролета и обеспечить доступ рабочих и грузов к любой точке сборки [3].

При монтаже сборных балок люди нередко сталкиваются с трудностями, связанными с особенностями рельефа (склоны, холмы) либо же высокими опорами, где монтаж балок обычными средствами механизации строительства невозможен. Опоры рассматриваемых порталных кранов же располагаются на опорах мостового сооружения, что позволяет обойти вышеперечисленные трудности, а также позволяет обойти изменение длины пролетов, геометрию и кривизну. Длина главных ферм или балок крана обычно составляет 2-2,5 длины пролета мостового сооружения [4].

Портальный кран, как правило, работает двумя способами в зависимости от того, куда доставлены блоки или балки пролетного строения, которые впоследствии необходимо будет смонтировать (рис. 3). В первом случае балки доставляются под кран, на землю, в этом случае монтажная система поднимает балки вверх и перемещает их на опорные части. Во втором случае балки находятся на устоях, и система отводится на устой,

передняя тележка подхватывает передний край балки, задний край балки находится на балковозе или перевозчике, и когда задний край доходит до края устоя задняя тележка подхватывает задний край балки, после чего балка перемещается на опорные части.

Каждая монтажная система обладает несколькими тележками-лебедками, которые подвешиваются между верхними поясами главных ферм. Основная тележка-лебедка отвечает за подъем и опускание балок и блоков пролетного строения, а поступательная перемещает саму тележку по монтажной системе. Нередко в системах встречается и третья тележка, которая отвечает за перемещение электрогенератора, отвечающего за питание всех операций при возведении мостового сооружения. Зачастую перемещения тележек-лебедок при возведении невелики и их можно заменить менее дорогими длинноходовыми гидроцилиндрами.

Продольное перемещение монтажного крана проходит в два этапа: блок автоматических зажимов фермы крепится к перекладинам, а тележки-лебедки перемещают балку на один пролет вперед; затем тележки-лебедки крепятся к перекладинам, блоки освобождаются, и лебедки перемещения продвигают систему на следующий пролет. Такая последовательность может повторяться несколько раз, поэтому при строительстве многопролетных мостовых сооружений балки могут продвигаться на несколько пролетов вперед, а для экономии времени новые балки могут поставляться не на устой, а на уже смонтированные балки.

На устоях сооружения располагаются траверсы, к которым закрепляются рельсы для бокового перемещения portalного крана, траверсы имеют боковые свесы для размещения краевых балок и запуска portalного крана по кривым. Некоторые portalные краны имеют легкие сервисные краны на концах ферм или балок для перемещения деталей без потребности в наземных кранах.

В последнее время нередко используют однобалочные порталные краны нового поколения, главная балка которых состоит из двух раскосных сварных двутавровых балок. Преимуществами таких систем являются меньшая стоимость главной балки по сравнению с треугольными фермами, лебедочные тележки на таких системах меньше, дешевле и оснащены длинноходовыми гидроцилиндрами, а также такие системы оснащены облегченными носами, которые достигаются за счет вырезанных лазером окон в стенках балок. Нередко для управления скольжением крана при перемещении используют специальный роботизированный пульт управления скользящим режимом [5].



Рис. 3. Портальный кран с одной облегченной главной балкой

Результаты исследования

Как было сказано выше, одной из целей исследования является выбор оптимальной конструкции кранов и изучение основ по их проектированию и конструированию, в связи с чем был произведен расчет в программном комплексе «Лира». В качестве расчетной схемы был выбран кран с одной облегченной главной балкой. Данное решение было принято для того чтобы

облегчить и ускорить расчет и изучить основные принципы по подбору кранов.

Каждый порталный кран разрабатывается под отдельно взятый проект производства работ (ППР), который учитывает технологию строительства сооружения, сроки строительства, методы производимых работ и др.

Немалую роль играют также определение влияния сборности, уровня механизации и других факторов на продолжительность строительства [6].

Автором была разработана расчетная модель крана при монтаже блоков пролетного строения до 30 тонн. Основной междуопорный пролет крана составлял 28 метров, консоли по 23 метра.

Целью расчета являлось определение усилий в конструкции крана при монтаже, а также выявление зависимостей этих усилий от положения монтажных тележек – лебедок.

Для упрощения выявления зависимостей расчетная схема с одной коробчатой главной балкой была разбита на конечные элементы по одному метру, к которым прикладывались монтажные нагрузки, а также нагрузки от собственного веса крана (рис 4).

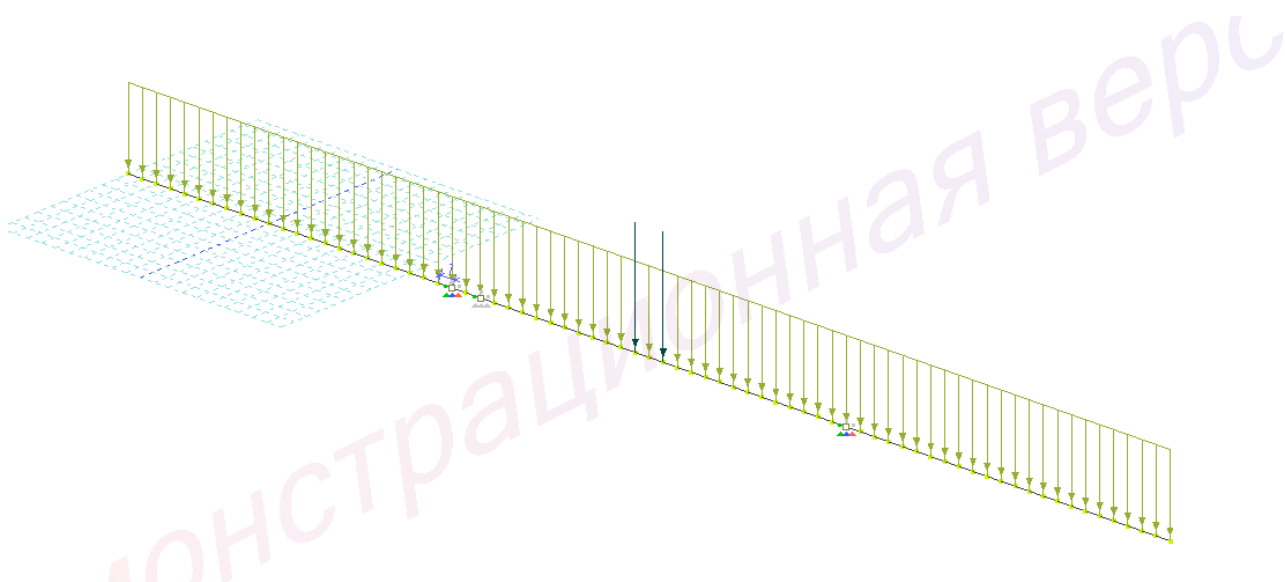


Рис. 4. Расчетная схема порталного крана

Расчетная схема поочередно загружалась монтажной нагрузкой от блоков пролетного строения, при этом тележки перемещались на один метр

от опор (x - расстояние от опор) для выявления зависимости величин изгибающего момента от положения тележек – лебедок (рис. 5-7).



Рис. 5. Эпюра изгибающего момента при $x=1$

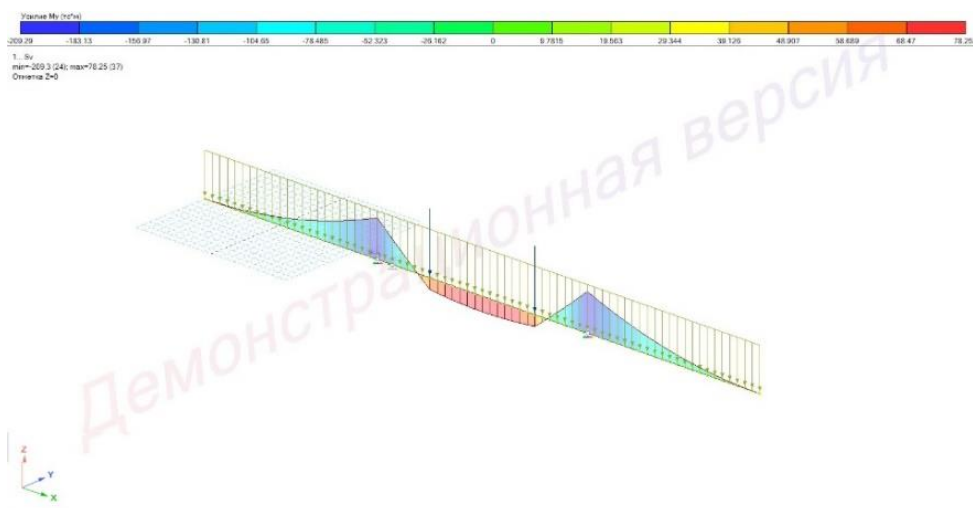


Рис. 6. Эпюра изгибающего момента при $x=7$

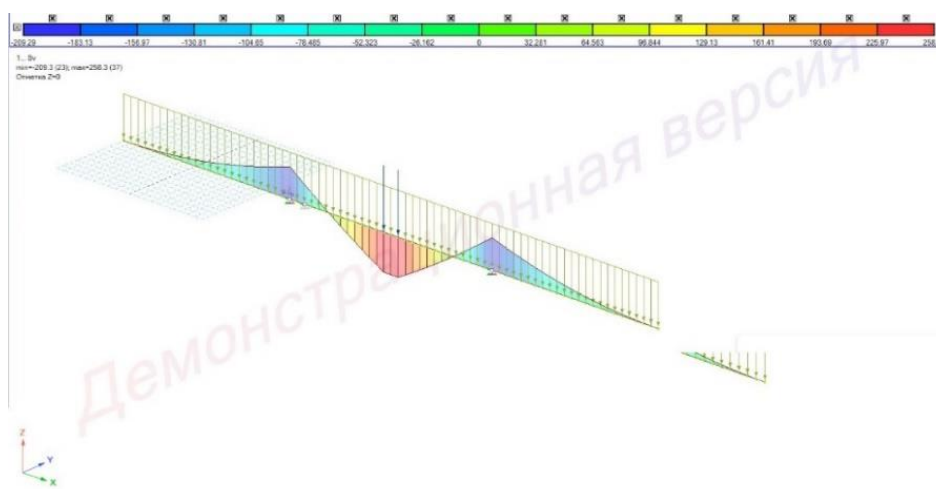


Рис. 7. Эпюра изгибающего момента при $x=13$

В дальнейшем строился график зависимости изгибающего момента от положения тележек (x) (рис. 2).

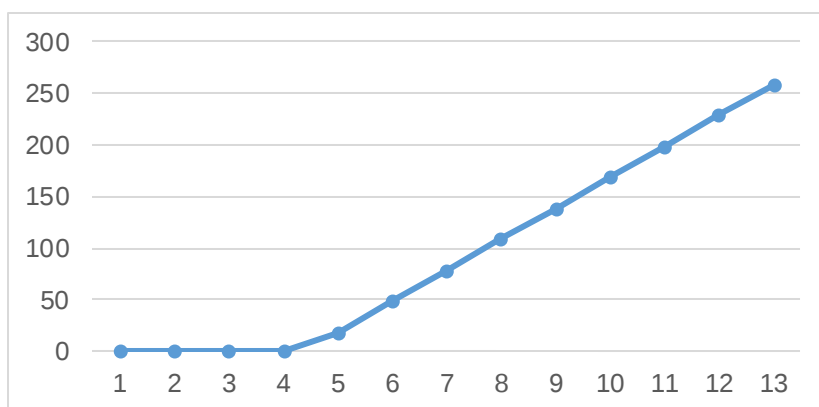


Рис. 8. График зависимости изгибающего момента M_u в середине пролета крана от положения тележек x

Как видно из графика, при достижении $x=5$ м начинает появляться и возрастать изгибающий момент M_u в середине пролета крана, при $x<5$ м наибольшим изгибающим моментом является надопорный момент, который достигается за счет нагрузки от собственного веса крана.

Таким образом, при монтаже пролетного строения поблочно следует опираться на последнюю стадию монтажа, когда тележки–лебедки находятся в середине пролета и монтируют замыкающие блоки. Если же происходит монтаж цельный балок пролетного строения и тележки–лебедки находятся в непосредственной близости от опор, то расчетным изгибающим моментом будет являться отрицательный изгибающий момент в надопорном сечении.

Кроме того, следует обращать внимание на то, что при использовании разных марок кранов приводит к появлению в подкрановых балках и опорах изгибающих моментов и сдвигов, на которые нужно рассчитывать конструкцию крана [7]. При определении нагрузок на механизмы и сооружения необходимо учитывать сейсмические и ветровые нагрузки, в частности, скорость ветра, характер воздействия и другие факторы [8].

Помимо основной конструкции крана необходимо подбирать мощности лебедок тележек, гидроцилиндров и домкратов, в зависимости от

конкретного проекта производства работ, в частности, от способов монтажа и нагрузки от монтируемых конструкций.

Заключение

В современном транспортном строительстве инженеры нередко сталкиваются с конструкциями из сборного железобетона, которые производятся в заводских условиях и монтируются в проектное положение в готовом виде. Для этого необходимо использования различных средств механизации строительства, в частности при производстве работ по строительству мостовых сооружений – порталных кранов. Портальный кран достаточно сложная и материалоемкая конструкция, требующая детальной разработки и изучения особенностей различных систем. Кроме того, при разработке и применении таких систем необходимо проводить мероприятия по выявлению опасностей, оценке уровня рисков и принятию мер по их контролю [9].

В данной статье были изучены различные системы порталных кранов, как механизмов для спуска тяжелых грузов на длинопролетные конструкции, их преимущества и недостатки, а также была замоделирована одна из возможных в строительстве ситуаций монтажа при использовании таких систем.

Результаты исследования показали, что при планировании и разработке проекта производства работ необходимо учитывать весьма обширный ряд факторов, а при разработке систем порталных кранов акцентировать внимание на проектировании основных несущих конструкций, таких как фермы и балочные системы, на подбор гидравлических приводов и тележек, а также на особенности работы в конкретно взятых условиях.

В заключение стоит отметить, что проектирование и производство порталных кранов и средств механизации строительства в целом достаточно трудоемкий и технически сложный процесс, требующий тщательной

подготовки и сбора информации, а также требующий учета различных аспектов машиностроения и транспортного строительства.

Список источников

1. Deal Equipment Report. Innovative Technologies For Bridge Construction, 2022. – URL: https://www.deal.it/sites/default/files/equipment/deal_equipment_report_light.
2. Sicily M. Crane Bridge Girder Erection Beam Launcher, 2022. – URL: <https://2492b15d69befcf9.en.made-in-china.com/product/zxgpBuQDJbcK/China-Crane-Bridge-Girder-Erection-Beam-Launcher-500ton-600ton-800ton-1000ton-Price.html><https://snip.ruscable.ru/Data1/52/52240/index.htm#i716319>.
3. Rosignoli M. Encyclopedia Of Life Support Systems, Bridge Erections Machines, 2023. – URL: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-37-40-00.pdf>.
4. LRFD Bridge Construction Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2022. – URL: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fs36d44bae16611495.jimcontent.com%2Fdownload%2Fversion%2F1650043778%2Fmodule%2F11581789993%2Fname%2FAASHTO_LRFD_Bridge_Design_Specifications.pdf&psig=AOvVaw2szC1yfVoxD7An4lRbfNEU&ust=1712566747749000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAUQn5wMahcKEwjIsMS13q-FAxUAAAAAHQAAAAAQBA.
5. Tianlei, Wang / Global equivalent sliding mode control method for bridge crane / Tianlei Wang ,Nanlin Tan, Jiongzhi Qiu, Yanjiang Yu // IEEE Access. – 2021. – P.160372-160382. – DOI 10.1109/ACCESS.2021.3115164.
6. Шермухамедов, У.З. Современные подходы проектирования и строительства мостов и путепроводов в Республике Узбекистан / У.З. Шермухамедов, А.Б. Каримова // Science and innovation international scientific journal. – 2022. – Vol. 1 (8). – <https://doi.org/10.5281/zenodo.7422524>.
7. Kramarchuk, A. The research bearing capacity of crane beams for possible establishment of bridge crane on them / A. Kramarchuk, B. Ilytsky, T. Bobalo, O. Lytvyniak // Proceedings of CEE. – 2022. – Vol. 47. – P. 202-210. – DOI 10.1007/978-3-030-27011-7_26.
8. Prasetyo, A.T. Industrial building structure planning with cranes / A.T. Prasetyo, N. Yasir // Asian Journal of Engineering, Social and Health. – 2024. – Vol. 3. – № 2. – P. 393-410. – DOI <https://doi.org/10.46799/ajesh.v3i2>.
9. Construction safety in girder installation work on cibitung – cilincing toll road construction project / Komalassari C., Tunafiah H., Natadipura R.K., Jayady A., Danil R., Ismawanto T., Pratama R. // International Conference on Multidisciplinary Research for Sustainable Innovation. – 2024. – Vol. 1. – № 1. – P. 154-165.
10. Pipinato, A. Bridge construction equipment. Innovative bridge construction handbook, 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823550-8.00022-6>.

References

1. URL:
https://www.deal.it/sites/default/files/equipment/deal_equipment_report_light.
2. URL: <https://2492b15d69befcf9.en.made-in-china.com/product/zxgpBuQDJbcK/China-Crane-Bridge-Girder-Erection-Beam-Launcher-500ton-600ton-800ton-1000ton-Price.html><https://snip.ruscable.ru/Data1/52/52240/index.htm#i716319>.
3. URL: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-37-40-00.pdf>.
4. URL:
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fs36d44bae16611495.jimcontent.com%2Fdownload%2Fversion%2F1650043778%2Fmodule%2F11581789993%2Fname%2FAASH%2F_LRFD_Bridge_Design_Specifications.pdf&psig=AOvVaw2szC1yfVoxD7An4lRbfNEU&ust=1712566747749000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CAUQn5wMahcKEwjIsMS13q-FAxUAAAAAHQAAAAAQBA.
5. Tianlei Wang, Nanlin Tan, Jiongzhi Qiu, Yanjiang Yu, IEEE Access, 2021, – pp.160372-160382, DOI 10.1109/ACCESS.2021.3115164.
6. Шермухамедов У.З., Каримова А.Б. // *Science and innovation international scientific journal*, 2022, vol. 1 (8), <https://doi.org/10.5281/zenodo.7422524>.
7. Kramarchuk A., Ilytsky B., Bobalo T., Lytvyniak O. Proceedings of CEE, 2022, vol. 47, pp. 202-210, DOI 10.1007/978-3-030-27011-7_26.
8. Prasetyo A.T., Yasir N. *Asian Journal of Engineering, Social and Health*, 2024, vol. 3, no. 2. – pp. 393-410, DOI <https://doi.org/10.46799/ajesh.v3i2>.
9. Komalassari C., Tunafiah H., Natadipura R.K., Jayady A., Danil R., Ismawanto T., Pratama R. *International Conference on Multidisciplinary Research for Sustainable Innovation*, 2024, vol. 1, no. 1, pp. 154-165.
10. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823550-8.00022-6>.

Рецензент: А.В. Квитко, канд. техн. наук, доц., СПбГАСУ

Информация об авторах.

Грязных Никита Сергеевич, выпускник (специалитет), СПбГАСУ.

Information about authors.

Gryaznyh Nikita S., graduate (specialty), SPbGASU.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 20.06.2024.

The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 20.06.2024.