

Research Article

Received: April 11, 2023

Accepted: May 9, 2023

Published: May 16, 2023

ISSN 2658-5553

Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction

Krupenin, Fedor Romanovich¹ ¹ LLC «Doka Rus», Saint Petersburg, Russian Federation; theocharicot@yandex.ruCorrespondence:* email theocharicot@yandex.ru

Keywords:

Formwork; Self-climbing formwork; Construction; Load-bearing structure; High-rise construction; Modern construction; Management in construction; Construction Management; Optimization in construction

Abstract:

The object of research is the National Space Center, a high-rise building under construction in Moscow. **Method.** The method used involves objective observations to determine the impact of various factors associated with the use of self-lifting formwork on the construction speed of high-rise buildings. Furthermore, the study implements optimized construction methods to reduce the influence of these factors on the building process. **Results.** The results obtained from this research provide insights and solutions for reducing the impact of the investigated factors on the erection of high-rise structures. Understanding these factors will help to consider important nuances during the construction of future high-rise projects using self-lifting formwork techniques.

1 Introduction/Введение

В последние десятилетия строительная промышленность стремительно развивается, особенно в сфере высотного строительства. Высотные здания становятся все более популярными в современном мире, а их строительство – задачей, требующей инновационных подходов и использования новых технологий, одной из которых является применение систем самоподъемной опалубки. Большое количество известных небоскребов были построены на основе железобетонного каркаса с применением самоподъемных систем опалубки, в том числе мировые рекордсмены, среди которых башня Бурдж Дубай (высота 818 м) и башни Петронас в Малайзии (высота 432 м). Расширению сферы применения монолитного железобетона в высотном строительстве в России способствует развитие новых технологий, включая создание и внедрение новых систем опалубки. Это системы и технологии опалубки, которые в основном определяют скорость строительства и трудоемкость операций бетонирования [1], [2]. Рынок высотного строительства выступает как перспективное направление развития строительной отрасли [3], а использование монолитного бетона удобно тем, что из него возможно строить конструкции разной конфигурации с большим списком архитектурно-планировочных решений [4], [5].

Качество опалубочной системы необходимой для выполнения монолитных работ напрямую влияет на качество возводимых конструкций [10]. Поэтому при подборе опалубки особое внимание уделяется следующим характеристикам: геометрическая неизменяемость системы, жесткость, прочность, герметичность в процессе бетонирования. Соблюдение всех вышеперечисленных свойств позволяет перейти к следующему этапу - подбор опалубки по заданным характеристикам конструктивной части проекта [11], [12]. Опалубка представляет из себя совокупность элементов и деталей, предназначенных для образования формы монолитных бетонных или железобетонных конструкций и сооружений, возводимых на строительной

Krupenin, F.

Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction; 2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2801. doi: 10.57728/ALF.28.1



площадке [6]. Опалубка должна обеспечивать заданные размеры и форму возводимой конструкции; быть прочной, жесткой и неизменяемой в рабочем положении и при воздействии всех производственных нагрузок; иметь минимальную адгезию поверхности с бетоном; быть индустриальной и многооборачиваемой, экономичной и технологичной при сборке и разборке, а также не создавать затруднений при установке арматуры и укладке бетонной смеси [7], [17]. Помимо этого, существуют греющие опалубки, позволяющие проводить монолитные работы при отрицательных температурах, в которых передача тепловой энергии происходит по контактному принципу, то есть от разогретой поверхности опалубочных щитов к бетонной смеси [18], [19]. Также существуют несъемные опалубки, которые не подвергаются демонтажу и по завершению процесса бетонирования становятся конструктивной частью объекта [13], [14].

В случае возведения вертикальных элементов высотных зданий и сооружений с постоянным или переменным сечением, может применяться подъемно-переставная опалубка. Данная опалубочная система является разборной, состоит из внешних и внутренних щитов, бывает с шахтными подъемниками или с опиранием на сооружение [8], [9]. По мере твердения бетона система опалубки перемещается вертикально вверх, позволяя производить поярусную заливку бетонной смеси, что является особенностью использования данной опалубки. Ввиду высокой технологичности и сложности применяемого оборудования необходимо привлечение высококвалифицированных кадров [15], [16]. За счет внедрения самоподъемной опалубки появляется возможность без существенных трудозатрат осуществлять создание разнообразных, выразительных по планировочным и архитектурным решениям зданий и сооружений, гибкой системы внутренней планировки, и ограничения по этажности будут не применимы [20]. В отличие от остальных опалубок, самоподъемная опалубка не требует демонтажа при переходе от этажа к этажу, что способствует повышению эффективности строительного проекта. Однако, несмотря на эффективность использования данных систем, существует ряд факторов, влияющих на скорость возведения здания при использовании данного вида опалубки.

Актуальность исследования обусловлена увеличивающимся использованием систем самоподъемной опалубки в строительной отрасли Российской Федерации, а также необходимостью определения и исследования факторов, влияющих на процесс использования самоподъемных систем опалубки при возведении высотных зданий, а также поиском вариантов уменьшения влияния данных факторов на скорость возведения высотного объекта, которые влияют на эффективность строительного проекта.

Целью данной работы является выявление и исследование ключевых факторов, влияющих на скорость возведения здания при использовании самоподъемной системы опалубки, включая следующие аспекты:

1. исследование влияния конструктивных решений возводимого здания на скорость строительства при использовании самоподъемной системы опалубки;
2. исследование влияния квалификации рабочего персонала на скорость работы с самоподъемной опалубкой;
3. оценка влияние условий окружающей среды на скорость возведения здания с использованием самоподъемной опалубки;
4. разработка рекомендаций для оптимизации процесса возведения здания с использованием самоподъемной опалубки с целью повышения его скорости.

В ходе анализа публикаций установлено, что ранее не был проведен анализ движения самоподъемной системы по высоте здания с помощью объективного наблюдения. Отсутствуют графические данные о ходе самоподъемной системы опалубки в течение возведения здания по известному количеству бетонируемых этажей в пределах дат начала и окончания этапа указанных работ, а также ни одним из авторов не произведён расчет средней скорости возведения здания по каждому из этапов. Не выявлены факторы, влияющие на уменьшение или увеличение скорости возведения здания при использовании системы самоподъемной опалубки.

Исходя из вышеперечисленных заключений определены следующие задачи:

1. проведение анализа движения самоподъемной системы по высоте здания с помощью объективного наблюдения;
2. построение графика данных о ходе самоподъемной системы опалубки в течение возведения здания по известному количеству бетонируемых этажей в пределах дат начала и окончания этапа указанных работ;
3. произведение расчетов средней скорости возведения здания по каждому из этапов;



4. выявление факторов, влияющих на уменьшение или увеличение скорости возведения здания при использовании системы самоподъемной опалубки;

5. анализ полученных результатов для применения их в последующих проектах, а также поиск возможных решений для уменьшения влияния каждого из факторов на скорость возведения объектов.

Объектом исследования является здание Национального Космического Центра, имеющее общую высоту 288 м по верхней отметке шпиля. Высота типового этажа составляет 4.2 м. Отметка, до которой работает самоподъемная система опалубки SCP компании DOKA достигает 205 м. Самоподъемная система опалубки работает со 2-го по 46-ой этажи. Планируемая скорость возведения здания составила 3–4 этажа в месяц.

В результате объективных наблюдений определяется влияние факторов использования самоподъемной опалубки на скорость строительства высотных зданий. Методом уменьшения влияния факторов на процесс возведения здания приведены оптимизированные способы строительства. В процессе ведения работ стеновая опалубка соединена с рамами подъемной системы, что позволяет значительно снизить трудозатраты при использовании подъемных механизмов, избегая тем самым стандартного цикла с подъемом, монтажом, разопалубливанием и демонтажом опалубки для перестановки на следующий этаж, а также снизить общий срок возведения объекта. Помимо этого, значительно возрастает безопасность при возведении высотного здания, поскольку стеновая опалубка и самоподъемная система представляют собой единую конструкцию, при которой отсутствует необходимость работы с отдельными элементами стеновой опалубки, снижая тем самым риск возникновения опасной ситуации при сложных погодных условиях, к примеру при сильном ветре. Комплекс мер по обеспечению безопасности труда должен соответствовать требованиям.

В рамках работы над проектом Национального Космического Центра была сформулирована цель для проведения дальнейших исследований, которая заключается в выявлении и исследовании ключевых факторов, влияющих на скорость возведения здания при использовании самоподъемной системы, с дальнейшим использованием полученных результатов на проектах высотных зданий, при возведении которых будут использоваться системы самоподъемной опалубки.

В рамках проведения аналитической работы и построения графика движения самоподъемной системы были получены значения максимальных и минимальных скоростей возведения исследуемого объекта, а также выявлены и проанализированы факторы, влияющие на скорость возведения здания.

Стоит также отметить, что использование данной технологии дает возможность использовать верхнюю платформу в качестве места временного размещения строительных материалов, чаще всего арматуры и каркасов, а нижние подмости использовать для работы с поверхностями уже возведенных стен, например, для шлифования поверхностей и заделки отверстий после использования анкерных стержней.

Путём решения ряда задач по оптимизации приведены способы уменьшения влияния изученных факторов на процесс возведения высотного здания. Изучение влияния факторов при использовании самоподъемной опалубки в дальнейшем поможет учитывать нюансы при возведении объектов высотного строительства.

2 Materials and methods/Материалы и методы

Самоподъемная система опалубки, используемая для данного исследования, представляет из себя жесткую конструкцию, состоящую из верхней горизонтальной стальной платформы, установленной на вертикальные элементы каркаса. В качестве механизма перемещения данной системы используются шахтные подъемники с гидравлическим приводом. Опалубка, используемая для бетонирования монолитных конструкций, закреплена к верхней платформе и перемещается совместно с ней после каждого этапа возведения здания.

При строительстве сложных высотных зданий разрабатываются специальные проекты, предусматривающие перемещение опалубки по высоте, гидравлический привод и размещение отдельных подъемных элементов на строящемся каркасе [21], [22].

Для проведения данного исследования использовалась комбинация объективных наблюдений и анализа данных с использованием построенного графика движения самоподъемной опалубки по ходу возведения здания. Был проведен систематический сбор

Krupenin, F.

Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction; 2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2801. doi: 10.57728/ALF.28.1



данных по скорости возведения здания при использовании указанного типа опалубки. Для этого был использован метод объективных наблюдений. Полученные данные были обработаны с помощью статического анализа и построения графика, необходимого для визуализации результатов наблюдений.

Далее данные были проанализированы с целью выявления закономерностей и тенденций изменения скорости возведения здания при использовании самоподъемной системы опалубки. Данный этап включал в себя определение трендов и выявление аномалий, позволяющих определить, при каких условиях скорость возведения оставалась в пределах планируемых значений и в каких случаях наблюдалось отклонение скорости возведения здания.

Для определения надежности результатов было проведено сравнение полученных значений скорости возведений здания с заранее запланированной скоростью возведения, которое показало, что заранее запланированная скорость возведения здания при использовании самоподъемной системы опалубки достигалась на тех участках графика, где влияние исследуемых факторов отсутствовало или являлось минимальным.

3 Results and Discussion/Результаты и обсуждение

При изучении процессов опалубочных работ был выявлен ряд операций, оптимизация которых позволит сократить продолжительность строительства и, следовательно, повысить эффективность проекта.

Совершенствование методов монтажа опалубки включает в себя рациональный выбор опалубки, включая укрупнение опалубочных панелей в многоразовые карты без необходимости их демонтажа и применение шахтной опалубки, что сокращает продолжительность опалубочных работ. Так же включает нанесение покрытий, исключающих адгезию и необходимость смазывать опалубку и сокращение расстояния перемещения опалубки краном.

Система опалубки выбирается на этапе проектирования, когда определено количество панелей и выбрана последовательность работ по монтажу (демонтажу). На данном этапе рассматриваются основные идеи и решения по оптимизации работ.

Разумный подход к выбору системы опалубки является важным фактором сокращения сроков строительства зданий и сооружений. При выборе опалубки необходимо учитывать характеристики и параметры будущего здания, размеры бетонируемых конструкций, а также климатические условия. Использование новейших систем опалубки для реализации проектов по монолитной технологии способствует улучшению использования технологии и качества строительства [23].

Рассматриваемый объект представляет собой высотное здание с центральным монолитным ядром жесткости и конструкциями за его пределами. Толщины стен монолитного ядра изменяются по мере возрастания этажности здания.

В здании также имеются этажи повышенной сложности, среди которых: 5-й этаж с контурной монолитной балкой с преднапряженной арматурой высотой равной высоте этажа здания, 21-й этаж с высотой этажа равной высоте двух стандартных этажей и 37-38-й аутригерные этажи с большим объемом металлических конструкций вокруг ядра здания.

Начало использования самоподъемной системы состоялось в августе 2021, планируемый срок окончания использования системы намечен на май 2023. Метод возведения заключается в бетонировании стен ядра здания совместно с перекрытием. Отличие данного метода от метода возведения ядра с опережением заключается в следующем: при методе с опережением стены ядра возводятся независимо от возведения перекрытий, позволяя тем самым возведенному ядру уйти вверх от конструкций бетонируемых перекрытий на несколько этажей; перекрытия через специальные закладные элементы позднее приливаются к стенам ядра.

В связи с отсутствием у предыдущих авторов исследований в области движения самоподъемной системы по высоте здания с помощью объективного наблюдения был проведен данный анализ.

При используемом в данном проекте методе бетонирование перекрытий и стен ведется в один этап; бетонируется перекрытие, далее бетонируются стены, после чего самоподъемная система опалубки перемещается на следующий этап по высоте и цикл повторяется: бетонируется перекрытие, после бетонируются стены.

По результатам объективных наблюдений был построен график работы системы самоподъемной опалубки, где по оси абсцисс указаны даты, а по оси ординат указаны этажи, на

Krupenin, F.

Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction; 2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2801. doi: 10.57728/ALF.28.1

которых в определенные моменты находилась самоподъемная система (рис. 1). Информация была предварительно обработана таким образом, чтобы на графике можно было выявить контрольные точки, между которыми происходило замедление и ускорение хода строительства.

Путем соединения контрольных точек на график была получена ломаная линия с определенным углом наклона, где для каждого участка графика была определена скорость строительства в эт./мес.

В связи с планируемой скоростью строительства 3-4 этажа в месяц для анализа принимаются к рассмотрению те участки графика, где скорость значительно ниже данных значений. Участками, где скорость практически достигает или превышает данные значения, возможно пренебречь и не рассматривать. При этом стоит сразу отметить, что этажи, возведенные между данными контрольными точками, являются типовыми, что, несомненно, влияет на скорость возведения.

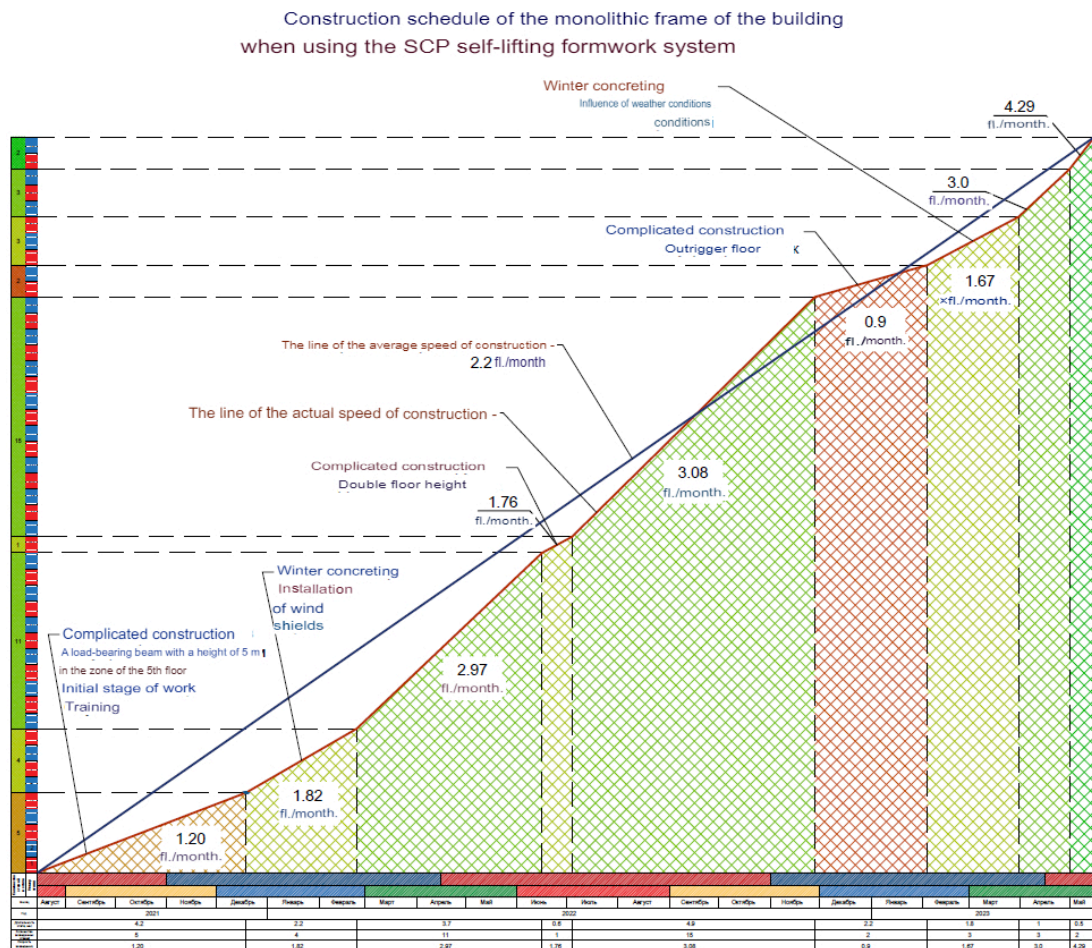


Рис. 1 – График строительства монолитного каркаса здания при использовании системы самоподъемной опалубки
Fig. 1 – Schedule for the construction of a monolithic building using a self-climbing formwork

По графику на рисунке 1 можно заметить, что между первой и второй контрольной точкой средняя скорость составляет 1.2 эт./мес., что является меньше планируемой скорости 3-4 эт./мес. Данный этап занял 4 месяца при пяти возведенных этажах. Как было указано ранее, в зоне пятого этажа имеется контурная монолитная балка большой высоты с преднапряжением. Возведение данной балки требовало больших трудозатрат со стороны застройщика; возведение опорных лесов, протягивание канатов для преднапряжения, установки сложных арматурных каркасов. При используемом методе строительства самоподъемная система не могла двигаться далее вверх по ядру, пока этаж с данной балкой не был забетонирован. Следовательно, можно выделить конструктивный фактор, влияющий на скорость движения самоподъемной системы.

В связи с отсутствием в научных публикациях расчетов средней скорости возведения здания по каждому из этапов стоит отметить, что самоподъемная система опалубки является технически сложной системой, требующей определенного уровня обученности персонала и культуры производства на строительной площадке. Для перестановки системы на следующий этаж каждый

Krupenin, F.

Factors influencing the use of self-lifting formwork in the field of high-rise construction;
2023; *AlfaBuild*; 28 Article No 2801. doi: 10.57728/ALF.28.1



работник должен знать, где и какую задачу он выполняет: отсоединение несущих конструкций системы от бетонных поверхностей, наблюдение за цилиндрами в момент подъема, контроль уровня выдвижения каждого из цилиндров по контрольным точкам на верхней платформе системы. Для обучения персонала также требуется время. Исходя из этого можно с уверенностью сказать, что первые несколько этапов подъема системы персонал обучается на практике, поэтому скорость возведения также замедляется. Соответственно, можно отметить фактор обученности персонала.

На этапе между 2-й и 3-й контрольными точками скорость возведения составляет 1.82 эт./мес. Здесь также следует отметить конструктивный фактор, выразившийся в том, что на данном этапе помимо возведения бетонных конструкций стен ядра и перекрытий также монтировались ветрозащитные экраны, что требовало дополнительных трудозатрат со стороны подрядчика.

Кроме того, данный этап начался в середине декабря 2021-го года, а закончился в конце февраля 2022-го года, соответственно, попав в зону зимнего бетонирования. Зимнее бетонирование влияет на скорость возведения здания. Необходимо устанавливать греющие кабели в бетонируемых конструкциях, а в стесненных условиях между щитами опалубки в шахтах это требует дополнительных усилий. Помимо этого, бетон необходимо прогревать определенное время до набора необходимой прочности, что, как минимум, влияет на возможность перестановки опалубки на следующий этап, поскольку бетон должен набрать необходимую прочность для восприятия веса самоподъемной системы. На основании изложенного можно выявить фактор погодных условий. Очевидно, что данный фактор не зависит ни от конструктивных особенностей здания, ни от персонала, участвующего в возведении здания.

Между 4-й и 5-й контрольными точками скорость составляет 1.76 эт./мес, это объясняется тем, что данный этаж является нетиповым с удвоенной высотой этажа, соответственно, бетонирование данного этажа разбивалось на два этапа. Помимо этого, для возведения перекрытия данного этажа требовались дополнительные трудозатраты для монтажа опорных лесов для бетонирования на высоту 8.4 м. Как вывод в этом случае можно отметить, что имеется влияние конструктивного фактора.

Между 6-й и 7-й контрольными точками скорость составляет 0.9 эт./мес. Данные этажи являются аутригерными этажами повышенной сложности с увеличенной высотой. Перекрытие между данными этажами имеет разные отметки, как следствие - бетонирование данных этажей проводилось в четыре этапа, более того, поскольку высота бетонирования, и, соответственно, высота перемещения системы отличалась от стандартной возникла необходимость устройства новых закладных точек на щитах опалубки, что также повлияло на скорость возведения данных этажей. Также на скорость движения системы самоподъемной опалубки повлияли и конструкции вокруг ядра - перекрытие с балками, металлические конструкции аутригерного этажа. Само перекрытие между 37-м и 38-м этажом занимает неполный контур этажа. Следовательно, для возведения перекрытия между 38-м и 39-м этажом требовалась установка опорных лесов. Конструкции ветрозащиты также повлияли на скорость строительства, поскольку для прохода данных этажей ветрозащитными экранами была необходима установка дополнительных, специальных опорных конструкций. При этом, данный этап попал в зону зимнего бетонирования. Сочетание конструктивного фактора и фактора погодных условий негативно повлияли на скорость возведения здания на данном этапе.

Между 7-й и 8-й контрольными точками скорость составляет 1.67 этажа в месяц. Несмотря на то, что данные этажи являются типовыми, можно допустить влияние на снижение скорости за счет нижележащих нестандартных этажей и связанной с этим перестановки ветрозащитных экранов с нетипового этажа на типовой. Дополнительно данный этап проходил в период зимнего бетонирования. Стоит также отметить, что в данный период в Москве наблюдались сильные ветра, которые также негативно сказываются на скорости возведения, так как замедляют общую скорость работы строительной площадки, вплоть до того, что работы могли быть приостановлены.

На других этапах между описанными выше скорость фактически была равна изначально запланированной.

4 Conclusions/Заключение

В результате проведенной работы получены новые научные результаты:



1. проведен анализ движения самоподъемной системы по высоте здания с помощью объективного наблюдения;
2. построен график данных о ходе самоподъемной системы опалубки в течение возведения здания по известному количеству бетонизируемых этажей в пределах дат начала и окончания этапа указанных работ;
3. произведены расчеты средней скорости возведения здания по каждому из этапов;
4. выявлены факторы, влияющие на уменьшение или увеличение скорости возведения здания при использовании системы самоподъемной опалубки;
5. проведен анализ полученных результатов для применения их в последующих проектах, а также поиск возможных решений для уменьшения влияния каждого из факторов на скорость возведения объектов.

На основании проведенного анализа можно выделить три основных фактора, влияющих на скорость возведения здания при использовании самоподъемной системы опалубки, среди которых конструктивный фактор, фактор обученности персонала и фактор погодных условий.

1. Конструктивный фактор.

Применительно к исследуемому объекту с учетом данных построенного графика можно с уверенностью сделать вывод, что конструктивный фактор является основным фактором негативного влияния на скорость движения самоподъемной системы опалубки.

2. Фактор обученности персонала.

На примере исследуемого объекта можно сделать вывод, что на начальном этапе данный фактор замедлял общую скорость строительства, а в дальнейшем фактор обученности персонала по работе с самоподъемной системой, наоборот, повышал скорость возведения здания.

3. Фактор погодных условий.

Рассматривая исследуемый объект можно сделать вывод, что зимнее бетонирование и прочие погодные условия не оказали сильного влияния на скорость движения самоподъемной системы, поскольку участки, на которых скорость возведения была равна ранее запланированной, частично попали в зону зимнего бетонирования.

Возможные способы снижения влияния выявленных факторов на скорость возведения здания.

Подходя к итогу данного исследования, можно сделать вывод, что влияние практически всех выявленных факторов на скорость движения самоподъемной системы опалубки можно снизить, тем самым доведя скорость возведения здания до заранее планируемой. Ниже перечислены возможные варианты по минимизации влияния выявленных факторов.

1. Изменение метода возведения стен ядра жесткости здания.

Применительно к исследуемому объекту можно было рассмотреть переход на метод возведения стен ядра с опережением, что решило бы проблему прохода самоподъемной системы в зоне этажей со сложными конструктивными решениями.

2. Переход на комбинированную конструктивную схему здания.

На примере проекта Лахта-центр в России в г. Санкт-Петербурге, где ядро здания состоит из монолитного железобетона, а конструкции перекрытий вокруг ядра представляют из себя монолитное перекрытие по стальным балкам, можно было применить подобную схему и для исследуемого проекта, тем самым сделав процесс возведения монолитного ядра независимым от возведения остальных конструкций этажей.

3. Предварительное обучение персонала строительной площадки, участвующего в работе с самоподъемной системой.

Для работников строительной площадки целесообразно проводить обучающие лекции, а также проводить практические занятия по договоренности с другими строительными компаниями на объектах, где используются подобные самоподъемные системы.

Все перечисленные выше факторы и выводы характерны для возведения высотных зданий, которые в будущем будут возводиться в Российской Федерации.

На примере здания Национального Космического Центра (рис. 2) в результате объективных наблюдений было установлено влияние факторов использования самоподъемной опалубки на скорость строительства высотных зданий.



Рис. 2 – Национальный космический центр
Fig. 2 – National Space Centre

1. Выявлено значительное возрастание безопасности при возведении высотного здания, поскольку стеновая опалубка и самоподъемная система представляют собой единую конструкцию, что снижает риски при проведении работ при сложных погодных условиях.

2. Использование данной технологии дает возможность использовать верхнюю платформу в качестве места временного размещения строительных материалов, а нижние подмости использовать для работы с поверхностями уже возведенных конструкций.

3. Путём решения ряда задач по оптимизации приведены способы уменьшения влияния изученных факторов на процесс возведения высотного здания.

Изучение влияния факторов при использовании самоподъемной опалубки в дальнейшем поможет учитывать нюансы при возведении объектов высотного строительства, на основании которых возможна разработка рекомендаций по ведению монолитных работ на высотных объектах при использовании самоподъемных систем опалубки.

References

- 1 Lapina, A.P. and Zakieva, N.I. (2021) Bamboo in Modern Construction and Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1083**. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1083/1/012019>.
- 2 Al-Sherrawi, M.H., Edaan, I.M., Al-Rumaithi, A., Sotnik, S. and Lyashenko, V. (2018) Features of Plastics in Modern Construction Use. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **9**. https://www.academia.edu/37982475/Features_of_Plastics_in_Modern_Construction_Use
- 3 Das, P., Perera, S., Senaratne, S. and Osei-Kyei, R. (2022) Paving the Way for Industry 4.0 Maturity of Construction Enterprises: A State of the Art Review. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2021-1001>.
- 4 Saad, A.M., Dulaimi, M. and Zulu, S.L. (2023) Examining the Influence of UK Public Clients' Characteristics on Their Own Innovation-Decision towards the Modern Methods of Construction (MMC). *Sustainability (Switzerland)*, **15**. <https://doi.org/10.3390/su15054159>.
- 5 Švajlenka, J. and Kozlovská, M. (2018) Perception of User Criteria in the Context of Sustainability of Modern Methods of Construction Based on Wood. *Sustainability (Switzerland)*, **10**. <https://doi.org/10.3390/su10020116>.
- 6 Ginigaddara, B., Perera, S., Feng, Y. and Rahnamayiezekavat, P. (2022) Development of an Offsite Construction Typology: A Delphi Study. *Buildings*, **12**. <https://doi.org/10.3390/buildings12010020>.



- 7 Rohani, M., Fan, M. and Yu, C. (2014) Advanced Visualization and Simulation Techniques for Modern Construction Management. *Indoor and Built Environment*, **23**. <https://doi.org/10.1177/1420326X13498400>.
- 8 Falikman, V.R. (2021) Nanocoatings in Modern Construction. *Nanotechnologies in Construction*, **13**. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-1-5-11>.
- 9 Saad, A.M., Dulaimi, M. and Zulu, S.L. (2023) Broader Use of the Modern Methods of Construction (MMC) in the UK Public Sector: A Business Model Canvas (BMC) Perspective. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, **9**. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100035>.
- 10 Crammond, N. (2002) The Occurrence of Thaumasite in Modern Construction - A Review. *Cement and Concrete Composites*, **24**. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00092-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00092-0).
- 11 Sultan, B. and Alaghbari, W. (2020) INVESTIGATING THE COST OF MODERN CONSTRUCTION IN YEMEN. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJCIET)*, **11**. <https://doi.org/10.34218/ijciet.11.3.2020.010>.
- 12 Meacham, B.J. (2022) Fire Performance and Regulatory Considerations with Modern Methods of Construction. *Buildings and Cities*, **3**. <https://doi.org/10.5334/bc.201>.
- 13 Generalova, E.M., Generalov, V.P. and Kuznetsova, A.A. (2016) Modular Buildings in Modern Construction. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.098>.
- 14 Green, S.D. (2022) Modern Methods of Construction: Reflections on the Current Research Agenda. *Buildings and Cities*. <https://doi.org/10.5334/bc.265>.
- 15 Shibani, A., Agha, A., Hassan, D., Al-Hadeethi, Y. and Choudhury, M. (2021) Effectiveness of the Modern Methods of Construction in Terms of Cost and Time: A Case Study of the United Kingdom. *Article in Journal of Civil Engineering Research*, **2021**. <https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/effectiveness-of-the-modern-methods-of-construction-in-terms-of-c>
- 16 Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J. and Yepes, V. (2022) Multi-Criteria Decision-Making Applied to the Sustainability of Building Structures Based on Modern Methods of Construction. *Journal of Cleaner Production*, **330**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129724>.
- 17 Mandala, R.S.K. and Nayaka, R.R. (2023) A State of Art Review on Time, Cost and Sustainable Benefits of Modern Construction Techniques for Affordable Housing. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1108/CI-03-2022-0048>.
- 18 Das, P., Perera, S., Senaratne, S. and Osei-Kyei, R. (2023) A Smart Modern Construction Enterprise Maturity Model for Business Scenarios Leading to Industry 4.0. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2022-0205>.
- 19 Lin, Y., Gen, R. and Xu, G. (2009) Public-Mailbox-Based Online Homework-Automatic-Processing Platform. 8th IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing, DASC 2009. <https://doi.org/10.1109/DASC.2009.50>.
- 20 Deveci, I. and Onder, I. (2015) Views of Middle School Students on Homework Assignments in Science Courses. *Science Education International*, **26**. https://archive.org/details/ERIC_EJ1086553
- 21 Shibani, A., Agha, A., Saidani, M., Hassan, D., Bari, U., Gherbal, N. and Abduelmula, M. (2021) The Effectiveness of Using Modern Construction Methods as a Solution to Assist the Social Housing Shortage in the United Kingdom. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/the-effectiveness-of-using-modern-construction-methods-as-a-solut>
- 22 Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Driesser, M., Kretschmann, T., Walker, P. and Emmitt, S. (2021) A Circular Construction Evaluation Framework to Promote Designing for Disassembly and Adaptability. *Journal of Cleaner Production*, **316**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128122>.
- 23 Zhao, G. (2011) The Modern Construction of Childhood: What Does It Do to the Paradox of Modernity? *Studies in Philosophy and Education*, **30**. <https://doi.org/10.1007/s11217-010-9213-8>.
- 24 Saad, A.M., Dulaimi, M. and Zulu, S.L. (2023) A Systematic Review of the Business Contingencies Influencing Broader Adoption: Modern Methods of Construction (MMC). *Buildings*, **13**. <https://doi.org/10.3390/buildings13040878>.