

# ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.873.2/.3

Е.А. ПОТАХОВ, канд. техн. наук

инженер технического отдела Службы подвижного состава Управления метрополитена

E-mail: epotakhov@mail.ru

ГУП «Петербургский метрополитен», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Поступила в редакцию 23.05.2023.

## НАГРУЖЕНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ ОТ МЕСТНЫХ НАГРУЗОК В ПРОЦЕССЕ ТЕЛЕСКОПИРОВАНИЯ

*Одним из основных факторов, влияющих на работоспособность телескопических стрел, является потеря местной устойчивости полок и стенок секций. Потеря местной устойчивости секций происходит вследствие развития пластических деформаций в отдельных наиболее нагруженных участках телескопических стрел или в результате потери устойчивого равновесия участков еще на стадии упругой деформации. При этом максимальные напряжения телескопической стрелы образуются в сечениях расположения опорных элементов, где происходит суммирование деформаций от внешних нагрузок и сил, действующих со стороны опорных элементов (местных нагрузок). Целью работы является исследование нагружения телескопической стрелы от действия местных усилий в процессе телескопирования. Анализ нагружения телескопической стрелы в процессе выдвигания (втягивания) секций выполняется на примере стрелового оборудования грузоподъемного крана на железнодорожном ходу «Сокол 80.01М». Для исследования местного нагружения телескопической стрелы грузоподъемного крана в процессе телескопирования применяются численное моделирование. Выбрано три режима телескопирования: последовательное выдвигание (втягивание) секций без груза; синхронное выдвигание (втягивание) секций без груза; последовательное выдвигание (втягивание) секций с грузом. Результатами виртуального эксперимента для каждого режима являются временные зависимости местных усилий, образуемых в местах расположения опор скольжения, и временные зависимости вертикальных нагрузок на цапфы гидроцилиндров телескопирования. Было выполнено сравнение наибольших нагружений стрелы и гидроцилиндров телескопирования, образованных при трех вариантах выдвигания (втягивания) секций. На основе полученных зависимостей местных нагрузок были рассчитаны максимальные напряжения телескопической стрелы в процессе каждого режима телескопирования.*

**Ключевые слова:** телескопическая стрела, местные нагрузки, телескопирование, грузоподъемный кран

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-43-50>

В настоящее время стреловые самоходные краны, оснащенные телескопическим стреловым оборудованием, широко применяются для выполнения строительных, монтажных, погрузочно-разгрузочных работ, а также для ликвидации последствий железнодорожных аварий [1].

Одним из основных факторов, влияющих на работоспособность телескопических стрел, является

потеря местной устойчивости полок и стенок, которая происходит вследствие развития пластических деформаций в отдельных наиболее нагруженных участках телескопических стрел или в результате потери устойчивого равновесия участков еще на стадии упругой деформации [2].

В практике эксплуатации телескопических стрел имели место случаи разрушения поясных

швов, а также образования трещин и пластических деформаций элементов секций вблизи расположения опорных элементов [2–5]. Это объясняется тем, что в сечениях расположения опорных элементов, где происходит суммирование деформаций от внешних нагрузок и сил, действующих со стороны опорных элементов (местных нагрузок), образуются максимальные напряжения телескопической стрелы. При этом напряжения, вызванные давлением опорных элементов, могут в несколько раз превышать напряжения от внешних нагрузок [2, 5, 6].

Несмотря на ряд научных работ, посвященных изучению нагруженности телескопической стрелы грузоподъемных кранов [2–4, 6–13], крайне мало внимания уделено исследованию нагружения телескопического стрелового оборудования от давления опорных элементов в процессе выдвижения (втягивания) секций.

В связи с этим *целью работы* является исследование нагружения телескопической стрелы от действия местных усилий в процессе телескопирования.

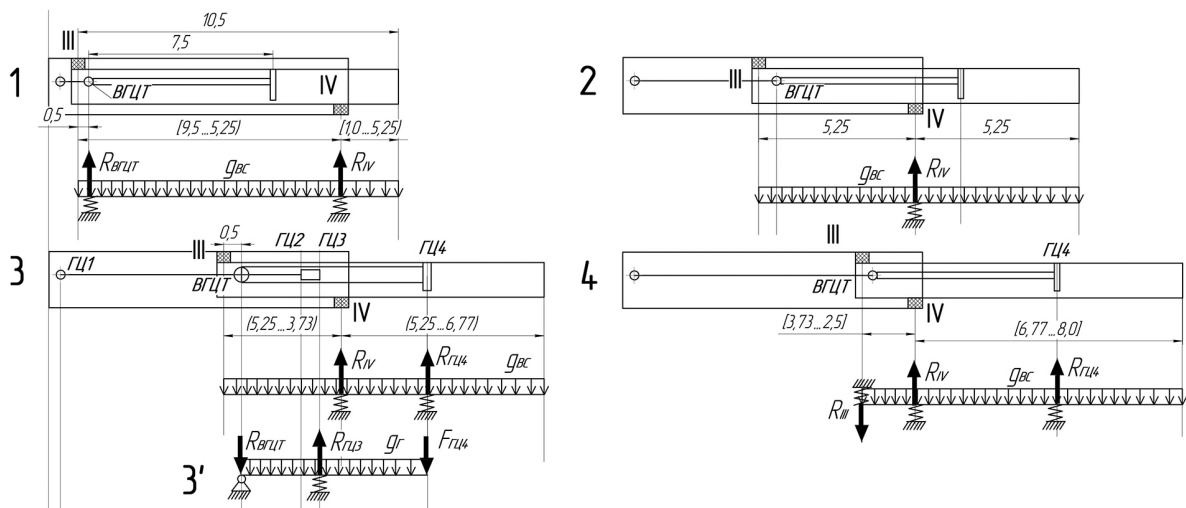
Анализ нагружения телескопической стрелы в процессе выдвижения (втягивания) секций выполняется на примере стрелового оборудования — грузоподъемного крана специального на железнодорожном ходу «Сокол 80.01М», используемого в качестве мобильного средства большой грузоподъемности для выполнения погрузочно-разгрузочных и аварийно-восстановительных работ на железнодорожных путях колеи 1520 мм. В частности, железнодорожные краны типа «Сокол» находятся на вооружении восстановительных поездов Дирекции аварийно-восстановительных средств ОАО «РЖД» [14].

Телескопическая стрела крана состоит из трех секций: основной (корневой), средней и головной (верхней) секций, установленных друг в друга и представляющих собой сварные конструкции прямоугольного сечения (рисунок 1).

Телескопирование секций крана «Сокол 80.01М» осуществляется двумя гидроцилиндрами и предполагает последовательное выдвижение и втягивание секций стрелы в два этапа. Сначала нижним гидроцилиндром осуществляется выдвижение средней секции совместно с головной. После выдвижения в крайнее положение средняя секция встает на два фиксатора, установленных на основной секции. После полного выдвижения средней секции, верхним гидроцилиндром осуществляется выдвижение головной секции. Сложение секций осуществляется в обратном порядке.

Одной из операций стрелового оборудования крана «Сокол 80.01М» является перемещение подвижных секций с грузом на крюке, что позволяет проводить погрузочно-разгрузочные и аварийно-восстановительные работы в замкнутых, ограниченных пространствах. Согласно руководству по эксплуатации 1170.000.00.00 Р.Э «Кран специальный на железнодорожном ходу «СОКОЛ 80.01 М» максимальная масса груза, с которой допускается выдвижение секций, составляет 30 т.

При этом известно, что существуют различные типы кранов, оснащенные механизмами, обеспечивающими независимое перемещение телескопических секций в любой последовательности, а также одновременное (синхронное) выдвижение всех секций стрелового крана [1]. Несмотря на то, что согласно руководству по эксплуатации перемещать секции крана «Сокол 80.01М» необходимо последовательным телескопированием, рас-



**Рисунок 1** — Расчетная схема верхней секции при телескопировании (без груза): 1–4 — этапы нагружения секции; 3' — расчетная схема гильзы гидроцилиндра телескопирования при 3 и 4 этапах; III, IV — опоры скольжения; ВГЦТ — цапфа верхнего гидроцилиндра телескопирования;  $R_i$  — реакции опор;  $F_i$  — силы (нагрузки) от опор;  $g_{BC}$  — распределенные нагрузки от веса верхней секции;  $g_r$  — распределенные нагрузки от веса верхней гильзы гидроцилиндра

**Figure 1** — Calculation scheme of the upper section at telescoping (without load): 1–4 — stages of loading of the section; 3' — design scheme of the telescoping hydraulic cylinder sleeve at 3 and 4 stages; III, IV — sliding bearings; ВГЦТ — pin of the upper hydraulic cylinder of telescoping;  $R_i$  — reactions of bearings;  $F_i$  — forces (loads) from bearings;  $g_{BC}$  — distributed loads from the weight of the upper section;  $g_r$  — distributed loads from the weight of the upper hydraulic cylinder sleeve

смотрение синхронного телескопирования секций данного крана представляет интерес для последующего сравнения максимального нагружения элементов телескопической стрелы при двух способах перемещения секций.

В связи с вышеперечисленным для исследования нагружения телескопической стрелы в процессе телескопирования выбраны три режима: последовательное выдвижение (втягивание) секций без груза; синхронное выдвижение (втягивание) секций без груза; последовательное выдвижение (втягивание) секций с грузом.

Для исследования нагружения телескопической стрелы грузоподъемного крана в областях контакта секций в процессе телескопирования применяются численное моделирование. Компьютерное моделирование представляет возможность определять нагружение элементов технических средств без уменьшения ресурса оборудования, не требует наличия натурного объекта исследования, а также позволяет одновременно учитывать значительное количество факторов и производить вычисления при больших объемах расчетной области.

Численное моделирование процесса телескопирования секций крана «Сокол 80.01М» проводится в среде Motion программного комплекса SolidWork.

Идентичность трехмерной модели реальному прототипу устанавливается подобием конструктивного устройства; соответствием масс элементов виртуального крана с массовыми характеристиками, указанными в руководстве по эксплуатации крана; соответствием реакций аутригеров численного крана с опорными нагрузками железнодорожного крана, рассчитанными по известной методике [15].

Для моделирования процесса выдвижения (втягивания) секций выбрано, что телескопическая стрела параллельна основанию, угол между осью стрелы и продольной осью крана составляет  $90^\circ$ , опорный контур  $6,618 \times 5,906$  м. В соответствии с диаграммами грузовых характеристик и графиком высоты подъема грузоподъемного крана, в качестве начального положения выбрано: длина стрелы 11,0 м (все секции втянуты), вылет 6,0 м, высота оголовка 4,0 м. В качестве конечного положения выбрано: длина стрелы 25,0 м (все секции выдвинуты), вылет 20,0 м, высота оголовка 4,0 м (таблица 1).

**Моделирование последовательного телескопирования секций без груза.** Процесс последовательного выдвижения (втягивания) секций моделируется следующим образом. Грузоподъемный кран устанавливается на грунтовое основание; задается контакт между элементами крана; вводится сила тяжести. Скорость выдвижения (втягивания) стрелы моделируется функцией «линейный двигатель», приложенной к торцу гильзы каждого

Таблица 1 — Исходные данные  
Table 1 — Initial data

| Параметр   | Величина    |
|--|-------------|
| Угол между осью стрелы и продольной осью крана, градус | 90          |
| Габариты опорного контура крана, м                     | 6,618×5,906 |
| Длина стрелы (начальное положение), м                  | 11,0        |
| Вылет стрелы (начальное положение), м                  | 6,0         |
| Высота оголовка стрелы (начальное положение), м        | 4,0         |
| Длина стрелы (конечное положение), м                   | 25,0        |
| Вылет стрелы (конечное положение), м                   | 20,0        |
| Высота оголовка стрелы (конечное положение), м         | 4,0         |
| Время телескопирования, с                              | 176,0       |
| Расстояние выдвижения гидроцилиндра, м                 | 7,0         |
| Масса верхней секции, кг                               | 2500        |
| Масса средней секции, кг                               | 2500        |
| Масса груза, кг  | 5000        |

гидроцилиндра телескопирования: нижний гидроцилиндр выдвигается на 7000 мм в период с 7,0 до 95,0 с, верхний гидроцилиндр выдвигается на 7000 мм в период с 95,0 до 183,0 с виртуального эксперимента.

В результате моделирования процесса последовательного выдвижения (втягивания) секций без груза установлено, что изначально средняя секция опирается на опорные элементы II и цапфы нижнего гидроцилиндра телескопирования. Это обусловлено тем, что центр тяжести секции расположен между опорами I и II. В процессе выдвижения средней секции вместе с неподвижной головной секцией центр тяжести первой смещается в сторону оголовка, в связи с этим опорные элементы II нагружаются, а опора НГЦТ разгружается. В момент времени 55,0 с реакция  $R_{\text{НГЦТ}}$  принимает нулевое значение, а затем сменяет знак с положительного на отрицательный. Это вызвано тем, что центр тяжести средней секции на короткий момент времени совпадает с расположением опорных элементов II, а затем выходит из диапазона опор I и II. При дальнейшем выдвижении средней секции в момент времени 75,38 с средняя секция начинает опираться на элементы I и II, а реакция  $R_{\text{НГЦТ}}$  принимает постоянное значение. При выдвижении верхней секции реакции опор  $R_I$  и  $R_{II}$  увеличиваются, а реакция  $R_{\text{НГЦТ}}$  неизменна (рисунки 2, 3).

В процессе выдвижения нижнего гидроцилиндра телескопирования верхняя секция неподвижна



Рисунок 2 — Реакции опор скольжения: I-IV — опоры скольжения; 1 — при последовательном телескопировании; 2 — при синхронном телескопировании; a — начало движения (7,0 с); b — начало выдвижения верхнего гидроцилиндра телескопирования (95,0 с); c — конец движения (183,0 с)  
 Figure 2 — Reactions of sliding bearings: I-IV — sliding bearings; 1 — in case of consecutive telescoping; 2 — in case of synchronous telescoping; a — beginning of movement (7.0 s); b — beginning of extension of the upper telescoping hydraulic cylinder (95.0 s); c — end of movement (183.0 s)

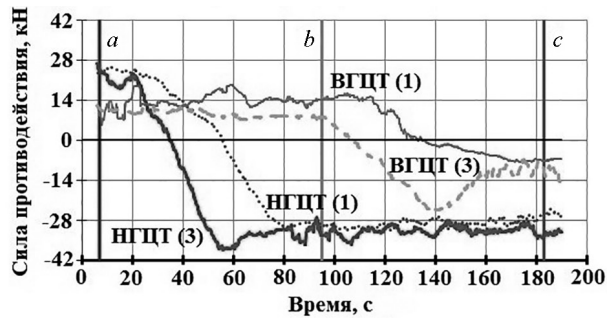
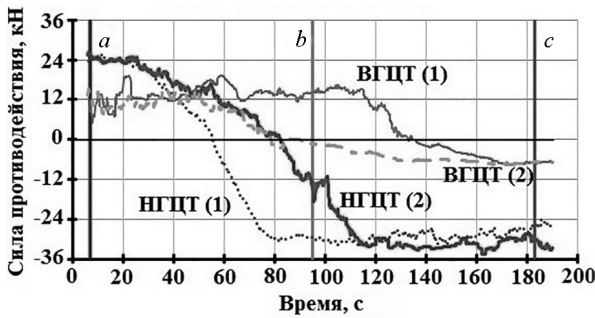


Рисунок 3 — Реакции гидроцилиндров телескопирования: НГЦТ, ВГЦТ — нижний и верхний гидроцилиндры телескопирования; 1 — при последовательном телескопировании; 2 — при синхронном телескопировании; 3 — при последовательном телескопировании с грузом; a — начало движения (7,0 с); b — начало выдвижения верхнего гидроцилиндра телескопирования (95,0 с); c — конец движения (183,0 с)  
 Figure 3 — Reactions of telescoping hydraulic cylinders: НГЦТ, ВГЦТ — lower and upper telescoping hydraulic cylinders; 1 — at consecutive telescoping; 2 — at synchronous telescoping; 3 — at consecutive telescoping with load; a — beginning of movement (7.0 s); b — beginning of extension of upper telescoping hydraulic cylinder (95.0 s); c — end of movement (183.0 s)

и опирается на элементы IV и цапфы верхнего гидроцилиндра телескопирования. Это обусловлено тем, что центр тяжести секции расположен между опорами III и IV. Также в процессе выдвижения средней секции реакции  $R_{IV}$  и  $R_{ВГЦТ}$  постоянны. В процессе выдвижения головной секции центр тяжести верхней секции смещается в сторону оголовка, в связи с этим опорные элементы IV нагружаются, а опора ВГЦТ разгружается (см. рисунок 1, этап 1). В момент времени 134,56 с реакция  $R_{ВГЦТ}$  принимает нулевое значение (см. рисунок 1, этап 2), а затем сменяет знак с положительного на отрицательный (см. рисунок 1, этап 3). Это вызвано тем, что центр тяжести верхней секции на короткий момент времени совпадает с расположением опорных элементов IV, а затем выходит из диапазона опор III и IV. При дальнейшем выдвижении верхнего гидроцилиндра телескопирования, в момент времени 153,60 с верхняя секция начинает опираться на элементы III и IV, а реакция  $R_{ВГЦТ}$  принимает постоянное значение (см. рисунок 1, этап 4; рисунки 2–3).

**Моделирование синхронного телескопирования секций без груза.** При моделировании синхронного выдвижения секций верхний и нижний

гидроцилиндры телескопирования одновременно перемещаются на 7000 мм в период с 7,0 с до 183,0 с виртуального эксперимента.

В результате моделирования можно наблюдать, что в процессе синхронного выдвижения нижнего и верхнего гидроцилиндров центры тяжести средней и верхней секций смещаются в сторону оголовка, в связи с этим опорные элементы II и IV нагружаются, а опоры НГЦТ и ВГЦТ разгружаются. В моменты времени 81,2 и 77,4 с реакции  $R_{НГЦТ}$  и  $R_{ВГЦТ}$  соответственно принимают нулевое значение, а затем сменяют знак с положительного на отрицательный. При дальнейшем синхронном выдвижении секций, в момент времени 115,2 с средняя секция начинает опираться на элементы I и II, в момент времени 124,2 с верхняя секция начинает опираться на элементы III и IV, а реакции  $R_{НГЦТ}$  и  $R_{ВГЦТ}$  принимают постоянное значение. При дальнейшем выдвижении секций реакции опор  $R_I$ ,  $R_{II}$ ,  $R_{III}$  и  $R_{IV}$  увеличиваются, а реакции  $R_{НГЦТ}$  и  $R_{ВГЦТ}$  неизменны (см. рисунки 2, 3).

**Моделирование последовательного телескопирования секций с грузом.** Моделирование проводится аналогично воспроизведению последовательного телескопирования без груза, с отличием, что до выдвижения секций к оголовку телескопичес-



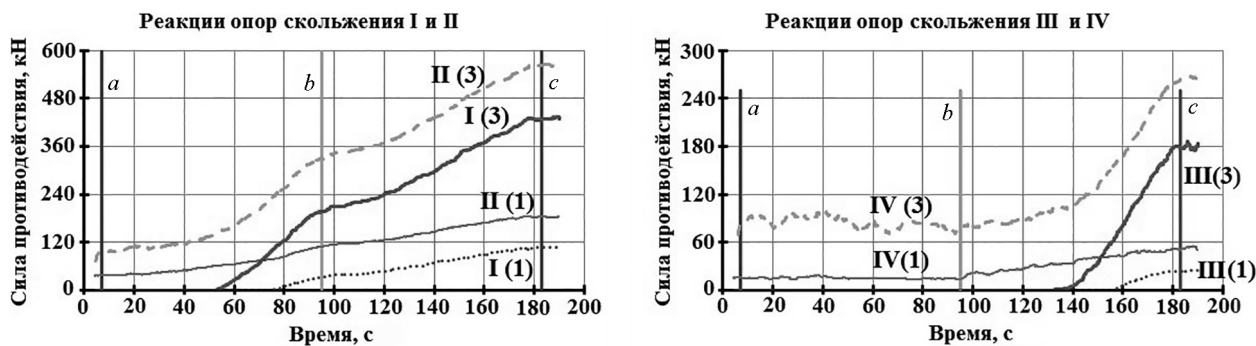


Рисунок 4 — Реакции опор скольжения: I–IV — опоры скольжения; 1 — при последовательном телескопировании без груза; 2 — при последовательном телескопировании с грузом; 3 — при последовательном телескопировании с грузом; *a* — начало выдвигания нижнего гидроцилиндра телескопирования (7,0 с); *b* — начало выдвигания верхнего гидроцилиндра телескопирования (95,0 с); *c* — конец движения (183,0 с)  
 Figure 4 — Reactions of sliding bearings: I–IV — sliding bearings; 1 — at consecutive telescoping without load; 2 — at consecutive telescoping with load; 3 — at consecutive telescoping with load; *a* — beginning of extension of lower telescoping hydraulic cylinder (7,0 s); *b* — beginning of extension of upper telescoping hydraulic cylinder (95,0 s); *c* — end of movement (183,0 s)

кой стрелы прикладывается постоянная сила в направлении силы тяжести, равная 50 000 Н (5 т).

В результате моделирования можно наблюдать, что изначально средняя секция опирается на элементы II и цапфы нижнего гидроцилиндра телескопирования. В процессе выдвигания средней секции вместе с неподвижной головной секцией опорные элементы II нагружаются, а НГЦТ разгружается. В момент времени 32,36 с реакция  $R_{НГЦТ}$  принимает нулевое значение, а затем меняет знак с положительного на отрицательный. При дальнейшем выдвигании средней секции, в момент времени 51,13 с средняя секция начинает опираться на элементы I и II, а реакция  $R_{НГЦТ}$  на непродолжительное время принимает максимальное значение (с 51,13 до 61,60 с). Далее реакция  $R_{НГЦТ}$  уменьшается и принимает постоянное значение. При выдвигании верхней секции реакции опор  $R_I$  и  $R_{II}$  увеличиваются, а реакция  $R_{НГЦТ}$  неизменна (см. рисунки 3, 4).

В процессе выдвигания нижнего гидроцилиндра телескопирования верхняя секция неподвижна и опирается на элементы IV и цапфы верхнего гидроцилиндра телескопирования (рисунок 5), реакции  $R_{IV}$  и  $R_{ВГЦТ}$  постоянны. В процессе выдвигания головной секции опорные элементы IV нагружаются, а ВГЦТ разгружается. В момент времени 106,6 с реакция  $R_{ВГЦТ}$  принимает нулевое значение, а затем меняет знак с положительного на отрицательный. При дальнейшем выдвигании верхнего гидроцилиндра телескопирования, в момент времени 133,6 с верхняя секция начинает опираться на элементы III и IV, а реакция  $R_{ВГЦТ}$  на непродолжительное время принимает максимальное значение (с 133,6 до 143,9 с). Далее реакция  $R_{ВГЦТ}$  уменьшается и принимает постоянное значение (см. рисунки 3, 4).

**Сравнение результатов моделирования.** Сравнивая результаты последовательного и синхронного телескопирования, можно заключить, что опоры скольжения I, II и ВГЦТ нагружаются больше при последовательном выдвигании (втягивании)

секций, опоры скольжения III, IV и НГЦТ более нагружены при синхронном выдвигании (втягивании) секций. При этом значения реакций опор скольжения (I–IV), НГЦТ и ВГЦТ в конце последовательного движения секций равны соответствующим опорным реакциям в конце синхронного телескопирования. Максимальная нагруженность гидроцилиндров телескопирования наблюдается в начале и конце движения.

Опоры скольжения I–IV, а также ВГЦТ и НГЦТ при последовательном телескопировании с грузом более нагружены по сравнению с последовательным выдвиганием (втягиванием) секций без груза. Также при последовательном телескопировании с грузом контакт секций с опорами I и III происходит по времени раньше, чем при последовательном выдвигании (втягивании) секций без груза. Максимальная нагруженность гидроцилиндров телескопирования при последовательном телескопировании с грузом наблюдается в момент нагружения верхней опоры скольжения секции

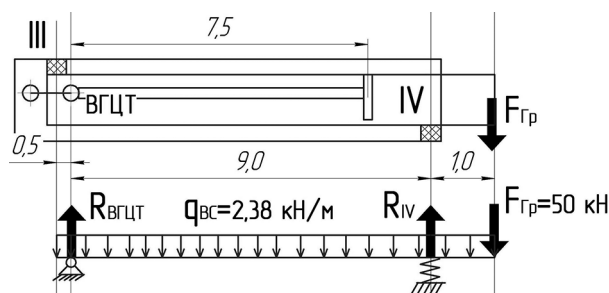


Рисунок 5 — Расчетная схема головной секции стрелы в начальный момент времени при последовательном телескопировании секций с грузом: III, IV — опоры скольжения; ВГЦТ — цапфа верхнего гидроцилиндра телескопирования;  $R_I$  — реакции опор;  $F_{ГР}$  — вес груза;  $g_{BC}$  — распределенная нагрузка от веса верхней секции (суммарно от металлоконструкции секции и гидроцилиндра телескопирования)

Figure 5 — Calculation scheme of the boom head section at the initial moment of time at consecutive telescoping of sections with a load: III, IV — sliding bearings; ВГЦТ — pin of the upper telescoping hydraulic cylinder;  $R_I$  — reactions of bearings;  $F_{ГР}$  — weight of the load;  $g_{BC}$  — distributed load from the weight of the upper section (total from the metal structure of the section and the telescoping hydraulic cylinder)

Таблица 2 — Сравнение максимальных реакций гидроцилиндров телескопирования  
Table 2 — Comparison of maximum reactions of telescope hydraulic cylinders

| Синхронное телескопирование               |                      | Последовательное телескопирование без груза |                      | Последовательное телескопирование с грузом |                      |
|---|----------------------|---|----------------------|--|----------------------|
| Элемент                                   | Значение реакции, кН | Элемент                                     | Значение реакции, кН | Элемент                                    | Значение реакции, кН |
| $R_{\text{НГЦТ}} (7,0 \text{ с})$         | 24,0                 | $R_{\text{НГЦТ}} (7,0 \text{ с})$           | 24,0                 | $R_{\text{НГЦТ}} (7,0 \text{ с})$          | 20,0                 |
| $R_{\text{НГЦТ}} (115,2-183,0 \text{ с})$ | 32,0                 | $R_{\text{НГЦТ}} (75,38-183,00 \text{ с})$  | 28,0                 | $R_{\text{НГЦТ}} (56,80 \text{ с})$        | 40,4                 |
| $R_{\text{ВГЦТ}} (7,0 \text{ с})$         | 12,0                 | $R_{\text{ВГЦТ}} (7,0-95,0 \text{ с})$      | 12,0                 | $R_{\text{ВГЦТ}} (7,0-95,0 \text{ с})$     | 9,8                  |
| $R_{\text{ВГЦТ}} (170,0-183,0 \text{ с})$ | 7,0                  | $R_{\text{ВГЦТ}} (170,0-183,0 \text{ с})$   | 7,0                  | $R_{\text{ВГЦТ}} (138,4 \text{ с})$        | 26,3                 |
| —   | —                    | —   | —                    | $R_{\text{НГЦТ}} (80,0-183,0 \text{ с})$   | 33,0                 |
| —   | —                    | —   | —                    | $R_{\text{НГЦТ}} (160,0-183,0 \text{ с})$  | 9,9                  |

(в момент перехода опирания секции на два опорных элемента).

Сравнение максимальных реакций гидроцилиндров телескопирования в трех режимах представлено в таблице 2.

Исходя из сравнения (см. таблицу 2), можно заключить, что наибольшее нагружение гидроцилиндров происходит при последовательном телескопировании с грузом в момент перехода опирания секции на два элемента.

Нагружение гидроцилиндров в начале последовательного телескопирования с грузом меньше их нагружения в начале последовательного выдвижения секций без груза. Это обусловлено тем, что наличие груза смещает центр тяжести секции в сторону оголовка.

Нижний гидроцилиндр в конце последовательного телескопирования менее нагружен, чем в конце синхронного выдвижения секций без груза. Нагружение гидроцилиндров в конце последовательного телескопирования с грузом превышает их нагружение в конце последовательного выдвижения секций без груза.

Общее напряженное состояние (приведенные напряжения) в наиболее нагруженных зонах полки и стенки телескопической стрелы от действия усилий опорных элементов и внешних вертикальных нагрузок можно определить по зависимости:

$$\sigma_{\text{ЭТ}} = \sqrt{(\sigma_{\text{Х}}^{\text{ВН}} + \sigma_{\text{ХМ}})^2 + \sigma_{\text{УМ}}^2} - (\sigma_{\text{Х}}^{\text{ВН}} + \sigma_{\text{ХМ}}) \sigma_{\text{УМ}} + 3(\tau_{\text{к}} + \tau_{\text{М}} + \tau_{\text{сг}})^2, (1)$$

где  $\sigma_{\text{Х}}^{\text{ВН}}$  — продольные нормальные напряжения от внешней нагрузки с учетом мембранных напряжений;  $\sigma_{\text{ХМ}}$  — продольные напряжения от местных нагрузок;  $\sigma_{\text{УМ}}$  — поперечные напряжения от местных нагрузок;  $\tau_{\text{М}}$  — касательные напряжения от местных нагрузок;  $\tau_{\text{к}}$ ,  $\tau_{\text{сг}}$  — касательные напряжения соответственно от кручения и поперечной силы, вызванные внешними нагрузками [2].

Установив численным методом реакции опорных элементов телескопической стрелы (см. рисунки 2, 4), по методу конечных элементов были рассчитаны напряжения, вызванные местными нагрузками. Напряжения, вызванные внешними на-

грузками, были определены аналитическим методом согласно четвертой теории прочности как напряжения при поперечном изгибе балки. Таким образом, на основе результатов моделирования процесса телескопирования, используя формулу (1), были определены максимальные напряжения телескопической стрелы в процессе каждого режима выдвижения (втягивания) секций.

**Заключение.** В результате проведенного исследования было выполнено численное моделирование процесса телескопирования стрелы грузоподъемного крана. Было выбрано три режима телескопирования: последовательное выдвижение (втягивание) секций без груза; синхронное выдвижение (втягивание) секций без груза; последовательное выдвижение (втягивание) секций с грузом. В результате моделирования для каждого режима получены временные зависимости реакций опорных элементов секций (местные усилия) и нагрузок на гидроцилиндры телескопирования. Было выполнено сравнение максимальных нагружений стрелы и гидроцилиндров телескопирования при трех способах перемещения секций. На основе результатов моделирования процесса телескопирования были определены максимальные напряжения телескопической стрелы в процессе каждого режима выдвижения (втягивания) секций, учитывающие местные и внешне нагрузки.

#### Список литературы

1. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: учеб. для вузов / М.П. Александров. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Высш. шк., 2000. — 552 с.
2. Ряхин, В.А. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин / В.А. Ряхин, Г.И. Мошкарёв. — М.: Машиностроение, 1984. — 232 с.
3. Ряхин, В.А. Анализ местной нагруженности крановых телескопических стрел методом конечных элементов / В.А. Ряхин, Ю.В. Гривезирский, Ю.М. Гольдин // Строительные и дорожные машины. — 1984. — № 4. — С. 22–24.
4. Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes / M. Savkovic [et al.] // Thin-Walled Structure. — 2014. — Vol. 85. — Pp. 332–340. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.09.009>.
5. Cui, Z. Analysis and experimental verification of the strength of telescopic booms for construction machinery / Z. Cui, W. Jiang, L. Cheng // International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology. — 2016. — Vol. 17, no. 27. — Pp. 33.1–33.10. — DOI: <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.27.33>.

6. Нагруженность крановых телескопических стрел / В.А. Ряхин [и др.] // Строительные и дорожные машины. — 1984. — № 6. — С. 9–11.
7. Fragassa, C. Measuring deformations in the telescopic boom under static and dynamic load conditions / C. Fragassa, G. Minak, A. Pavlovic // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. — 2020. — Vol. 18, no. 2. — Pp. 315–328. — DOI: <https://doi.org/10.22190/FUME181201001F>.
8. A One-dimensional dynamic model of hexagonal telescopic boom considering the deformable cross-section / Y. Xie [et al.] // Proc. of the 2019 International Conference on Modeling, Simulation and Big Data Analysis (MSBDA 2019). Advances in Computer Science Research. — Vol. 91. — Pp. 92–97. — DOI: <https://doi.org/10.2991/msbda-19.2019.15>.
9. Analytical method for the out-of-plane buckling of the telescopic boom with guy cables / L. Meng [et al.] // Science Progress. — 2021. — Vol. 104, iss. 1. — Pp. 1–19. — DOI: <https://doi.org/10.1177/0036850420984330>.
10. Design and analysis of telescopic boom for mobile cranes / A. Chandgude [et al.] // International Journal of Advanced Engineering Research and Science. — 2016. — Vol. 3, iss. 4. — Pp. 39–43.
11. Instability load analysis of a telescopic boom for an all-terrain crane / J. Xu [et al.] // Mechanical Sciences. — 2022. — Vol. 13, iss. 2. — Pp. 991–1009. — DOI: <https://doi.org/10.5194/ms-13-991-2022>.
12. Trąbka, A. Influence of changes of mutual position of crane telescopic boom sections on their stress state / A. Trąbka // Technologie wytwarzania, analizy procesów i symulacje obliczeniowe. — 2021. — Pp. 41–50. — DOI: <https://doi.org/10.53052/9788366249875>.
13. Numerical solution of critical force of n-step telescopic boom with superlift device / F. Yao [et al.] // AIP Advances. — 2023. — Vol. 13, iss. 2. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0132769>.
14. Пермяков, М.А. Инновационные разработки в области производства железнодорожных кранов / М.А. Пермяков // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий: техника железных дорог. — 2015. — № 2(30). — С. 54–60.
15. Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины: учеб. для вузов по спец. «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» / А.А. Вайнсон. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 536 с.

POTAKHOV Egor A., Ph. D. in Eng.

Engineer of the Technical Department of the Rolling Stock Service of the Metro Administration

E-mail: [epotakhov@mail.ru](mailto:epotakhov@mail.ru)

St. Petersburg Metro SUE, Saint Petersburg, Russian Federation

Received 23 May 2023.

## LOADS OF THE TELESCOPIC BOOM FROM LOCAL LOADS DURING TELESCOPING

*One of the main factors affecting the performance of telescopic booms is the loss of local stability of the shelves and section walls. The loss of local stability of the sections occurs due to the development of plastic deformations in some of the most loaded sections of the telescopic booms or as a result of the loss of stable equilibrium of the sections even at the stage of elastic deformation. In this case, the maximum stresses of the telescopic boom are formed in the sections of the location of the supporting elements, where the summation of deformations from external loads and forces acting from the side of the supporting elements (local loads) occurs. The aim of the work is to study the loading of telescopic boom from the action of local forces in the process of telescoping. Analysis of the loading of telescopic boom in the process of extending (retracting) the sections is carried out using the example of the boom equipment of a railway crane Sokol 80.01M. Numerical modeling is used to study the local loading of telescopic boom of a crane during telescoping. Three telescoping modes are selected: consecutive extension (retraction) of sections without load; synchronous extension (retraction) of sections without load; consecutive extension (retraction) of sections with a load. The results of the virtual experiment for each mode are the time dependences of the local forces generated at the locations of the sliding bearings, and the time dependences of the vertical loads on the pins of the telescoping hydraulic cylinders. A comparison was made of the greatest loadings of the boom and telescoping hydraulic cylinders formed with three options for extending (retracting) sections. Based on the obtained dependencies of local loads, the maximum stresses of the telescopic boom were calculated during each telescoping mode.*

**Keywords:** telescopic boom, local loads, telescoping, crane

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-3-64-43-50>

## References

- Aleksandrov M.P. *Gruzopodemnye mashiny* [Lifting machines]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. N.E. Bauman Publ., Vysshaya shkola Publ., 2000. 552 p. (in Russ.).
- Ryakhin V.A., Moshkarev G.I. *Dolgovechnost i ustoychivost svarykh konstruktivnykh i dorozhnykh mashin* [Durability and stability of welded structures of construction and road machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 232 p. (in Russ.).
- Ryakhin V.A., Grivezirskiy Yu.V., Goldin Yu.M. Analiz mestnoy nagruzhennosti kranovykh teleskopicheskikh strel metodom konechnykh elementov [Analysis of local loading of crane telescopic booms by the finite element method]. *Construction and road building machinery*, 1984, no. 4, pp. 22–24 (in Russ.).
- Savković M., Gašić M., Pavlović G., Bulatović R., Zdravković N. Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes. *Thin-walled structure*, 2014, vol. 85, pp. 332–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.09.009>.
- Cui Z., Jiang W., Cheng L. Analysis and experimental verification of the strength of telescopic booms for construction machinery. *International journal of simulation: systems, science and technology*, 2016, vol. 17, no. 27, pp. 33.1–33.10. DOI: <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.27.33>.
- Ryakhin V.A., Grivezirskiy Yu.V., Zaytsev L.V., Moshkarev G.N. Nagruzhennost kranovykh teleskopicheskikh strel [Loading of crane telescopic booms]. *Construction and road building machinery*, 1984, no. 6, pp. 9–11 (in Russ.).
- Fragassa C., Minak G., Pavlovic A. Measuring deformations in the telescopic boom under static and dynamic load conditions. *Facta universitatis. Series: mechanical engineering*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 315–328. DOI: <https://doi.org/10.22190/FUME181201001F>.
- Xie Y., Zhang L., Tang Y., Ji A. A one-dimensional dynamic model of hexagonal telescopic boom considering the deformable cross-section. Proceedings of the 2019 International conference on modeling, simulation and big data analysis (MSBDA 2019). *Advances in computer science research*, 2019, vol. 91, pp. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.2991/msbda-19.2019.15>.
- Meng L., Gui Z., Zhang K., Liu J., Liu S. Analytical method for the out-of-plane buckling of the telescopic boom with guy cables. *Science progress*, 2021, vol. 104, iss. 1, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1177/0036850420984330>.
- Chandgude A., Agarwal A., Mathew C., Chavan S. Design and analysis of telescopic boom for mobile cranes. *International journal of advanced engineering research and science*, 2016, vol. 3, iss. 4, pp. 39–43.
- Xu J., Zhuo Y., Qi Z., Wang G., Zhao T., Wang T. Instability load analysis of a telescopic boom for an all-terrain crane. *Mechanical sciences*, 2022, vol. 13, iss. 2, pp. 991–1009. DOI: <https://doi.org/10.5194/ms-13-991-2022>.
- Trąbka A. Influence of changes of mutual position of crane telescopic boom sections on their stress state. *Technologie wytwarzania, analizy procesów i symulacje obliczeniowe*, 2021, pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.53052/9788366249875>.
- Yao F., Li J., Yang H., Xie C., Lv S. Numerical solution of critical force of n-step telescopic boom with superlift device. *AIP advances*, 2023, vol. 13, iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0132769>.
- Permyakov M.A. Innovatsionnye razrabotki v oblasti proizvodstva zheleznodorozhnykh kranov [Innovative developments in the field of production of railway cranes]. *Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopoly Problems: railway engineering*, 2015, no. 2(30), pp. 54–60 (in Russ.).
- Vaynson A.A. *Podemno-transportnye mashiny* [Hoisting and transport machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 536 p. (in Russ.).