

УДК 621.86

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-43-52

П.А. Григорьев, Л.А. Сладкова, В.В. Крылов

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УСИЛИЙ В ОПОРАХ СТРЕЛОВОГО САМОХОДНОГО КРАНА

Предложено усовершенствование стрелового самоходного крана при работе на слабонесущих грунтах. Практическая реализация предложенного усовершенствования для обеспечения устойчивой работы самоходных стреловых кранов на слабонесущих грунтах различного состояния обоснована теоретическими и экспериментальными исследова-

ниями. Сходимость результатов исследований подтверждена критериями Кохрена, Стьюдента и Фишера с доверительной вероятностью 0,95 и низким уровнем величины относительной ошибки.

**Ключевые слова:** стреловой самоходный кран, слабонесущие грунты, моделирование, усилие, просадка опор, устойчивость.

P.A. Grigoriev, L.A. Sladkova, V.V. Krylov

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION FOR EFFORT CHANGES IN SUPPORTS OF BOOM SELF-PROPELLED CRANE

In the paper on the basis of the Rostechnadzor report data there is revealed the topicality of the work connected with stability loss of boom self-propelled cranes during the work on weak load-bearing soils. The fulfilled out theoretical investigations of effort distribution in supports depending upon the angle of a boom pitch (boom extension), the angle of boom rotation in a horizontal plane and the weight of the load to be lifted allowed offering a practical realization of measures for boom self-propelled cranes updating at the expense of the introduction of underlying mechanisms allowing not only the assurance of surface horizontal positioning, but the change of soil bearing capacity (supporting surface).

For the determination of the effectiveness of the device offered ensuring a table work on weak load-bearing soils there was developed a procedure for the

fulfillment of experimental investigations consisting of two stages. At the first stage there were defined efforts in crane supports depending upon a weight of the load to be lifted and sp-acial boom position. At the second stage there was carried out an estimate of crane support subsidence into soil of different state for basic and updated machines. The investigation results are confirmed with confidence probability of 0.95 by Cochran, Student and Fisher criteria.

As a result of experimental investigation carrying out there was defined that the application of an updated design allows increasing self-propelled crane stability by 1.41... 2.27 times.

**Key words:** boom self-propelled crane, weak load-bearing soils, modeling, efforts, support subsidence, stability.

### Введение

Анализ ежегодных отчетов Ростехнадзора за период с 2008 по 2018 г. свидетельствует о том, что число аварий среди общего числа грузоподъемных средств самоходных кранов на колесном и гусеничном ходовом оборудовании составляет 26 и 19 % соответственно [1]. Выявленные классификационные признаки причин аварий в зависимости от характера их возникновения подробно описаны в научнотехнической литературе [2; 3] и делятся на техногенные, природные и организационно-эксплуатационные. Следует отметить, что в представленном классификационном

перечне не в полной мере отражены исследования по вопросу обеспечения устойчивости самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах, которые можно отнести к каждому из классификационных признаков [4]. Очевидно, что при изменении погодных условий изменяется несущая способность грунтов, недостаточная проработка конструкции крановых опор не позволяет проводить горизонтирование поверхности, а неумелые или несанкционированные действия машинистов кранов ведут к возникновению аварийной ситуации.

Исследования в области определения устойчивости [5-8] стреловых самоходных кранов показали, что результаты проведенных экспериментов отличаются друг от друга числовыми значениями. К тому же они не в полной мере отражают изменение просадки грунта под опорами в зависимости от совокупного действия веса подни-

маемого груза и положения стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Актуальность темы позволила сформулировать задачу по разработке научно обоснованной методики проведения экспериментальных исследований для обеспечения устойчивости самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах.

**Аналитическая оценка распределения усилий под опорами**

Неустойчивая работа самоходных кранов на слабонесущих грунтах определяется неравномерностью распределения усилий под опорами. Рассмотрим распре-

деление усилий под опорами в зависимости от совокупного действия веса поднимаемого груза и пространственного положения стрелы (рис. 1).

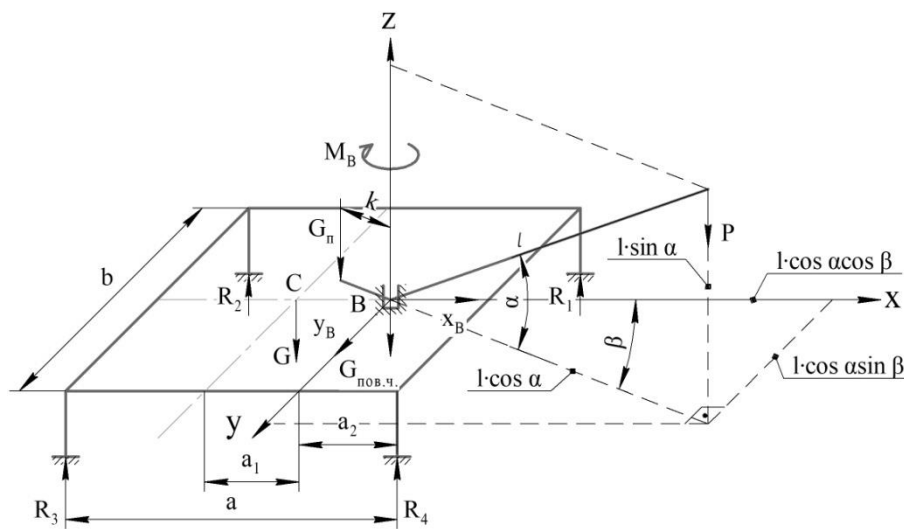


Рис. 1. Расчетная схема крана на выносных опорах:

- G<sub>n</sub> – вес противовеса; P – вес груза; G – вес шасси крана; G<sub>пов.ч.</sub> – вес поворотной части крана;
- R<sub>1</sub> – реакции в опорах; l – длина стрелы; a – база выносных опор; b – расстояние между выносными опорами;
- a<sub>1</sub> – расстояние от оси вращения поворотной части до центра массы шасси крана;
- a<sub>2</sub> – расстояние от оси вращения поворотной части крана до оси, проходящей через опоры R<sub>1</sub> и R<sub>4</sub>;
- k – расстояние от оси вращения поворотной части до центра массы противовеса крана;
- α – угол наклона стрелы к горизонту (вылет стрелы); β – угол отклонения стрелы от оси, совпадающей с продольной осью крана

С учетом отсутствия продольного перемещения крана в процессе выполнения погрузочно-разгрузочных работ задача

решается из условия равновесия системы, представленной на рис. 1. Решаем систему уравнений

$$\begin{cases} x_B = 0; \\ y_B = 0; \\ R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - G - P - G_n - G_{пов.ч.} = 0; \\ Pl \cos \alpha \sin \beta - G_n k \sin \beta + R_1 \frac{b}{2} + R_2 \frac{b}{2} - R_3 \frac{b}{2} - R_4 \frac{b}{2} = 0; \\ -Pl \cos \alpha \cos \beta + G_n k \cos \beta + Ga_1 + R_1 a_2 + R_4 a_2 - \\ -R_2 (a - a_2) - R_3 (a - a_2) = 0; \\ -M_B = 0. \end{cases}$$

При этом считаем, что, например,  $R_1 = A$  является точкой отсчета усилия в первой опоре при допустимом ее погружении

в грунт. Тогда величины усилий в других опорах будут равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = A; \\ R_2 = \frac{G}{2} + \frac{P}{2} + \frac{G_n}{2} + \frac{G_{нов.ч.}}{2} - \frac{Pl \cos \alpha \sin \beta - G_n k \sin \beta}{b} - A; \\ R_3 = \frac{Pl \cos \alpha \sin \beta - G_n k \sin \beta}{b} - \frac{Pl \cos \alpha \cos \beta - G_n k \cos \beta - Ga_1}{a} - \\ - \frac{G}{2} - \frac{P}{2} - \frac{G_n}{2} - \frac{G_{нов.ч.}}{2} + \frac{(G + P + G_n + G_{нов.ч.})a_2}{a} + A; \\ R_4 = \frac{Pl \cos \alpha \cos \beta - G_n k \cos \beta - Ga_1}{a} + G + P + G_n + G_{нов.ч.} - \frac{(G + P + G_n + G_{нов.ч.})a_2}{a} - A. \end{array} \right. \quad (1)$$

Из полученных зависимостей (1) видно, что распределение усилий под опорами является функцией системы параметрических уравнений, зависящей от габаритных размеров машины по площади. Равномерность распределения усилий под опорами при известной грузоподъемности, габаритах опорной поверхности машины  $a$  и  $b$  определяется заданным начальным усилием  $A$  одной из опор.

Полученные выражения (1) для распределения усилий под опорами позволяют после несложных математических преобразований получить зависимости для углов  $\alpha$  и  $\beta$  для выбора рационального положения стрелы крана, обеспечивающего горизонтирование платформы и устойчи-

вую работу самоходного крана при эксплуатации на слабонесущих грунтах.

Таким образом, теоретические исследования распределения усилий под опорами в зависимости от веса поднимаемого груза, угла установки стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях позволили установить неравномерность их распределения.

Очевидно, что устойчивая работа стреловых самоходных кранов может быть обеспечена равномерностью просадки опор в грунт либо за счет изменения состояния опорной поверхности – грунта. Предлагаемое нами усовершенствование стрелового самоходного крана позволит решить обе задачи.

### Описание конструкции предлагаемого устройства горизонтирования

В основу предлагаемого устройства положена задача обеспечения горизонтирования поверхности при работе кранов на слабонесущих грунтах за счет изменения состояния поверхности.

Предлагаемое устройство горизонтирования кранов на слабонесущих грунтах предполагает изменение состояния грунта и увеличение площади опорной поверхности под крановыми опорами и/или ходо-

вым оборудованием. Для этого на раме 5 крана с установленной на ней стрелой 4 (рис. 2) спереди или сзади установлены кронштейны 8, в которых горизонтально размещается вал с барабаном 7. На барабане расположена гибкая лента 9, которая может быть выполнена в форме траков. Барабан свободно вращается на валу для разматывания и последующего опускания ленты.

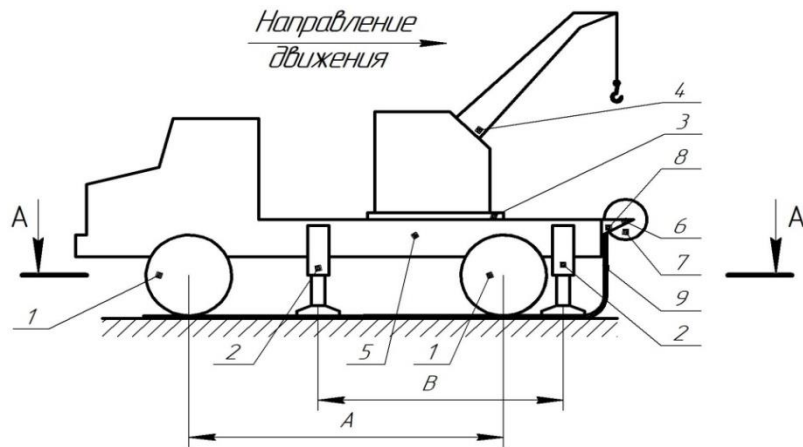


Рис. 2. Стреловой кран на колесном ходу

Нижняя часть ленты 9 имеет шарнирно-сочлененную с ней горизонтальную поверхность, длина которой должна быть не менее расстояния от линии сбегания ленты с барабана до точки касания ходового оборудования 1 с поверхностью грунта.

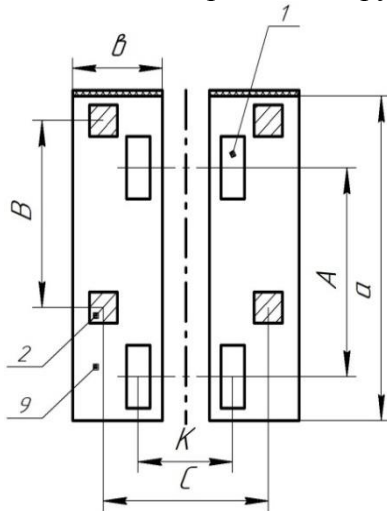


Рис. 3. Стреловой кран на колесном ходу (сечение А-А)

Следует отметить, что общая длина ленты 9 должна быть не менее базы машины (рис. 3). Барабан 7 с лентой 9 (рис. 2) может перемещаться вдоль оси 6.

Однако такое конструктивное решение имеет определенные недостатки, так как значительно увеличиваются габариты машины из-за выноса оси. Для устранения этого недостатка барабан, расположенный на оси 6, предлагается выполнить из двух частей. При этом ширина барабана 7 должна быть не менее расстояния между крайними внешними точками ходового оборудования 1 и выносных опор 2 (аутри-

геров) (рис. 3), что позволит снизить материалоемкость предлагаемого устройства.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. После остановки крана при помощи привода (условно не показан) приводится во вращение горизонтально установленная ось 6 барабана с лентой 9. Ось барабана устанавливается в кронштейнах 8 спереди (сзади) машины. При вращении барабана происходит опускание ленты 9 до момента контакта горизонтальной поверхности с поверхностью грунта, которая соприкасается с колесом машины. После опускания ленты в указанное положение машина начинает движение вперед при расположении барабана спереди или назад при расположении барабана сзади, совершая наезд на ленту. За счет сил сцепления между колесами крана и лентой происходит ее разматывание. Движение крана осуществляется до тех пор, пока ходовое оборудование 1 полностью не разместится на ленте 9. (Считаем, что ширина ленты должна быть не менее расстояния от линии сбегания ленты с барабана до точки касания ходового оборудования 1 с поверхностью грунта.) После этого опускаются аутригеры 2 и располагаются на ленте 9.

Предлагаемое устройство позволяет изменить состояние опорной поверхности и значительно увеличить ее площадь, что ведет к обеспечению горизонтирования машин на слабонесущих грунтах, а также позволяет автоматизировать процесс повышения устойчивости стрелового крана на слабонесущих грунтах за счёт укладки опорной поверхности под стреловой кран.

### Методика проведения экспериментальных исследований

Обоснование полученных теоретических положений подтверждено двухэтапным экспериментом, проводимым на модели самоходного крана КС-3577-4-1 грузоподъемностью 14 т с длиной стрелы 8 м (коэффициент линейного моделирования  $k_l = 31,6$ ). Модель экспериментальной установки (рис. 4) содержит раму (платформу), на которой расположены поперечные балки 2, по концам которых размещены выносные опоры 3. Высота выноса опор регулируется гайками 4. Крановое оборудование 5 для обеспечения поворота относительно вертикальной оси (угол  $\beta$ ) размещается на поворотном круге 6. Изменение угла наклона к горизонту (угол  $\alpha$ ) достигается за счет наличия шарнира 8.

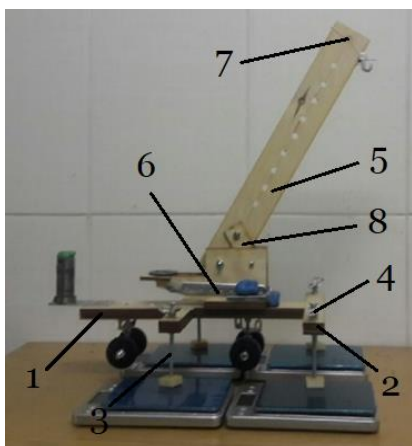


Рис. 4. Экспериментальная установка

На первом этапе исследований оценивались изменения усилий под опорами, а на втором – проседание опор крана при работе на грунтах различного состояния. Исследования проводились на основании теории планирования трехфакторного эксперимента. Границы исследований ориентированы на эксплуатационные характеристики рассматриваемого крана. Угол  $\alpha$  – от  $8^{\circ}35'$  до  $60^{\circ}23'$  (в зависимости от грузовой характеристики крана), угол  $\beta$  – от  $0$  до  $90^{\circ}$ , а масса поднимаемого груза – от  $0$  до  $14$  т [9]. Схема расположения опор крана для экспериментальных исследований приведена на рис. 5.

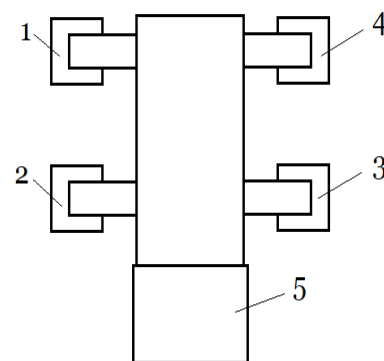


Рис. 5. Расположение опор крана:  
1-4 – опоры крана; 5 – кабина крана

При проведении эксперимента использовалось сертифицированное измерительное и испытательное оборудование.

Для обеспечения горизонтирования кран устанавливался на горизонтально расположенной плите с установленными на ней лабораторными весами [10] с точностью измерения  $0,01$  г. Высокая точность весов определена проведением модельного эксперимента.

Выходные параметры (усилие давления на грунт  $P$  или величину проседания грунта  $h$  под каждой опорой) можно записать как функционал вида

$$P = f(\alpha, \beta, G).$$

Результаты эксперимента оценивались при доверительной вероятности  $0,95$ :

- воспроизводимость – по критерию Кохрена при числе опытов  $N = 2^p = 8$  и числе степеней свободы  $f = k - 1 = 4$ ;

- значимость коэффициентов уравнения регрессии – по критерию Стьюдента при числе степеней свободы  $f = 2N - 1 = 15$ ;

- адекватность уравнения регрессии – по критерию Фишера при числе степеней свободы  $f_1 = N - 1$  и  $f_2 = N - B$ .

Здесь  $N = 2^p$  – число опытов;  $p$  – число факторов;  $k = 5$  – число параллельных опытов;  $B$  – число значимых коэффициентов уравнения регрессии. Выходной параметр (функция отклика) – изменение усилий под опорами – представлен ниже в виде регрессионных зависимостей (табл. 1).

Таблица 1

## Уравнения регрессии усилий в опорах крана

№ опоры крана	Полученная регрессионная зависимость
1	$P_1 = 76,7235 - 65,434X_2 + 54,242X_3 - 18,0655X_1X_2 - 65,5315X_2X_3 + 19,4415X_1X_3$
2	$P_2 = 191,6033 + 11,7973X_1 - 50,1763X_3$
3	$P_3 = 283,0505 + 72,9625X_2 + 36,134X_3 + 80,62X_2X_3$
4	$P_4 = 142,693 + 40,5645X_1 + 107,721X_3 + 37,3855X_1X_3$

Из уравнений регрессии видно, что увеличение веса груза  $G$  ( $X_3$ ) и угла наклона стрелы к горизонту  $\alpha$  ( $X_1$ ) ведет к увеличению усилий под всеми опорами. Изменение положения стрелы крана в про-

странстве  $\beta(X_2)$  способствует снижению усилий под опорами при максимальном значении угла  $\beta$ . Графическая интерпретация изменения усилий под опорами стрелового крана приведена на рис. 6.

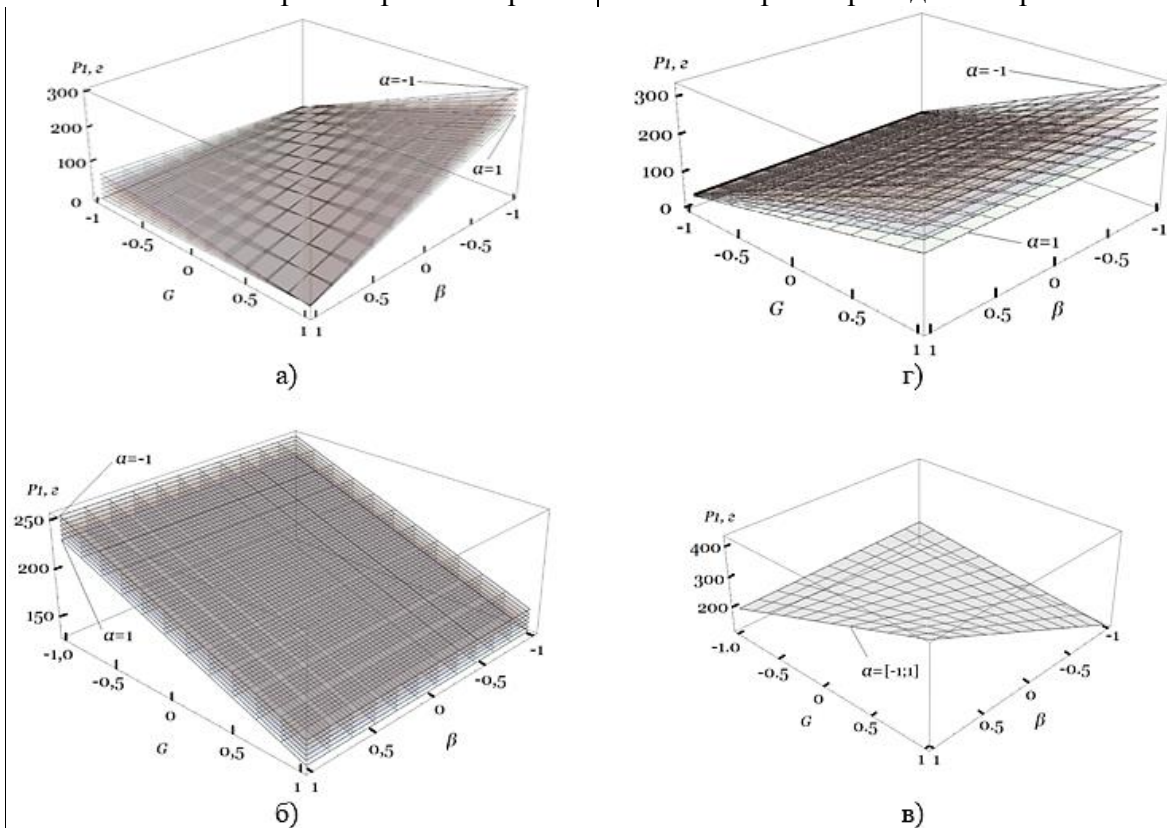


Рис. 6. Изменение усилия  $P$  в опорах крана в зависимости от угла  $\beta$ , массы поднимаемого груза  $G$  при изменении угла  $\alpha$  (вылет стрелы) от -1 до 1:  
а – 1-я опора; б – 2-я опора; в – 3-я опора; г – 4-я опора

На рис. 6 видно, что усилия в первой и четвертой опорах достигают максимального значения при минимальных значениях угла  $\alpha$  и максимальной величине  $G$ , причём в первой опоре – при минимальном значении  $\beta$ , а в четвертой опоре изменение усилия не зависит от значения  $\beta$ ; в опоре 2 – при минимальном значении  $G$  и минимальном значении угла  $\alpha$ , причём изменение величины не зависит от угла  $\beta$ ; в 3-й

опоре – при максимальном  $G$  и максимальном угле  $\beta$ , причём изменение величины не зависит от угла  $\alpha$ .

Оценим рациональные значения изменяемых параметров для обеспечения равенства усилий во всех опорах. Решив совместно вышеприведенные уравнения, получим:  $X_1 = 0,564$ ;  $X_2 = -1,147$ ;  $X_3 = 0,183$ ;  $P = 189,084$ .



### Определение усилий проседания грунта

Анализ уравнений регрессии показал, что для оценки величины погружения  $h$  опоры в грунт необходимо ориентироваться на граничные изменения усилий под опорами. Величина погружения опоры в грунт (проседание опоры) в зависимости от величины прикладываемой нагрузки была определена на втором этапе эксперимента. Модели аутригеров были выполнены на 3D-принтере. Для проведения этой части эксперимента разработана установка (рис. 7), которая позволила оценить в сравнительном варианте величину вдавливания опоры в грунт для конструкции стрелового крана до и после его модернизации.

По внутреннему отверстию отцентрированной направляющей втулки при помощи пригрузочных элементов передавалось вертикальное давление  $P$ , имитирующее усилие, которое может воспринимать опора крана при различных комбинациях исследуемых факторов. Для точности измерения величины проседания штампа на направляющей аутригера была нанесена разметка линейного размера с точностью измерения 0,5 мм.

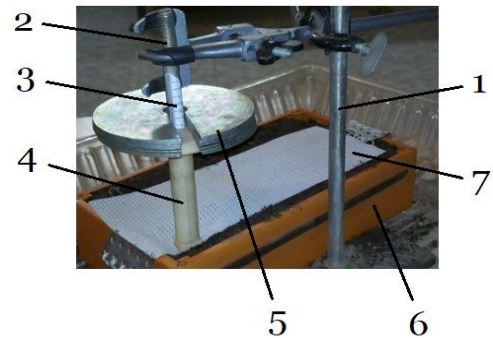


Рис. 7. Установка для определения глубины вдавливания штампа:

- 1 – штатив; 2 – направляющий стержень;  
3 – шкала; 4 – направляющая втулка;  
5 – груз; 6 – лоток с грунтом; 7 – подстилка (для модернизированного варианта)

Эксперимент проводился на различных типах грунтов для модели крана обычного исполнения и модернизированного. Во втором случае на исследуемые грунты под опоры укладывалась лента, позволяющая увеличить несущую способность грунта. При этом опора на ленте располагалась для самого неблагоприятного случая нагружения (по краю ленты).

Результаты эксперимента на втором этапе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований по определению глубины  $h$  вдавливания плоского штампа в грунт

Тип грунта	Вид рабочего оборудования	Усилие вдавливания $P$ , г					
		22,90	77,05	130,16	235,72	422,58	607,12
Песок сухой	До модерн.	0,50	1,00	1,50	2,20	4,30	7,85
	После модерн.	0,90	1,00	1,50	1,70	2,30	2,85
Грунт сухой	До модерн.	2,90	5,80	8,15	11,75	17,60	22,55
	После модерн.	0,60	2,05	3,70	5,55	8,55	10,90
Песок влажный	До модерн.	0,40	0,80	1,00	1,05	1,45	1,80
	После модерн.	0,20	0,45	0,65	0,70	1,20	1,45
Грунт влажный	До модерн.	2,40	3,70	5,00	7,65	12,30	17,05
	После модерн.	1,75	3,05	4,20	5,85	8,40	10,80

Графическая интерпретация результатов определения просадки в зависимости от усилий представлена на рис. 8. Формат линии тренда зависимости  $h = f(P)$  дает наилучшие показатели при линейном распределении результатов экспериментальных исследований, о чем свидетельствует

величина среднеквадратического отклонения  $R^2$ .

На рис. 8 видно, что величина просадки аутригеров модернизированного крана при работе на неустойчивых грунтах ниже, чем у немодернизированного, независимо от типа грунта. Причем эта разли-

ца увеличивается с увеличением вдавливающей силы, что характерно для более-грузных кранов. Для кранов низкой грузо-

подъемности эта разница будет несущественна.

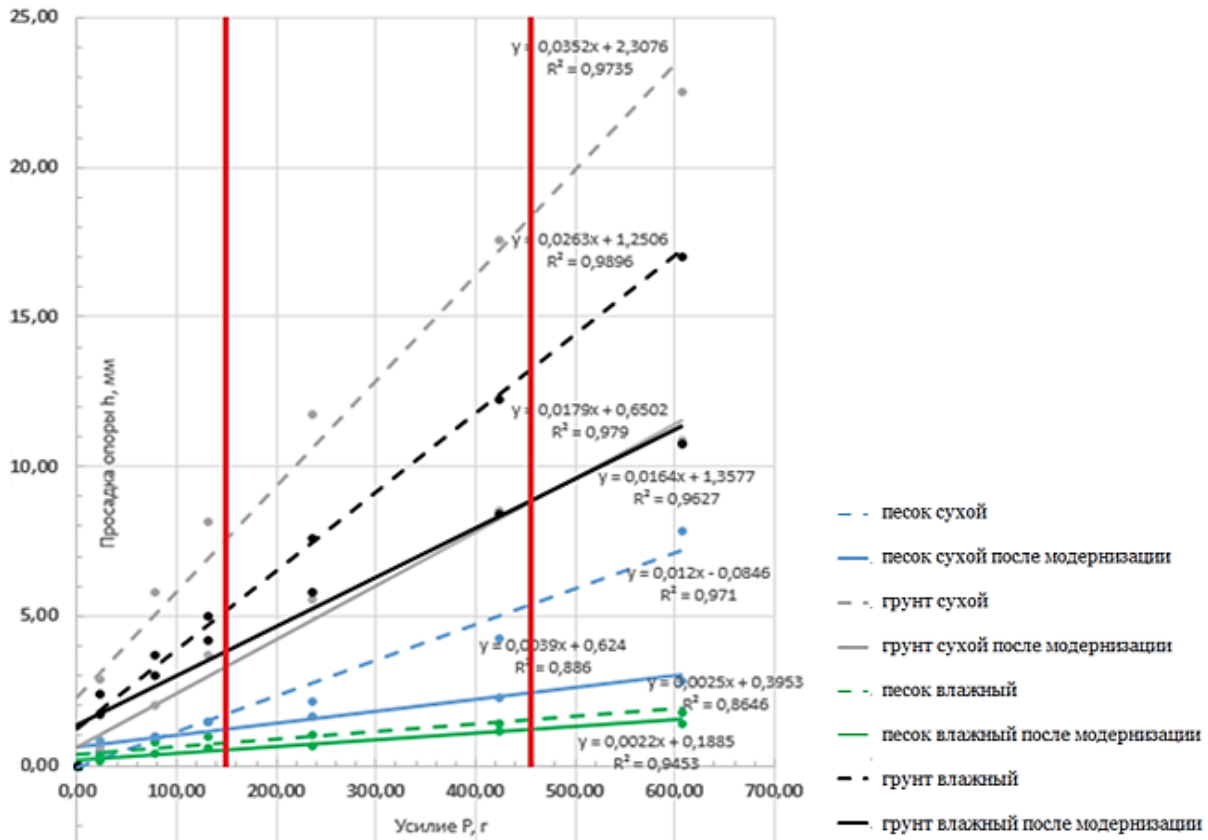


Рис. 8. Изменение просадки штампа  $h$  для различных значений усилий вдавливания  $P$

Очевидная рациональность принятого решения изменяется в зависимости от веса поднимаемого груза. При увеличении веса груза для условий проведенных исследований эффективность увеличивается в 1,41...2,27 раза.

Из сказанного следует, что при работе на влажном песке применять модернизированное оборудование нецелесообразно в силу адгезионных свойств влажного песка. В остальных случаях его применение целесообразно.

## Выводы

1. Эксперимент, проведенный на геометрической модели крана КС-3577-4-1 грузоподъемностью 14 т с длиной стрелы 8 м, выполненной с возможностью варьирования изменяемых параметров (угла наклона стрелы к горизонту (вылет стрелы)  $\alpha$ , угла поворота стрелы  $\beta$  и массы поднимаемого груза  $G$ ), с высокой степе-

Сравнительный анализ максимального проседания грунта из условия равенства усилий под опорами при проведении теоретических и экспериментальных исследований при переходе от параметров модели к параметрам оригинала показал, что величина погрешности не превышает величины суммарной ошибки при определении показаний приборов при проведении экспериментальных исследований на модели крана. Это положение справедливо для всех исследуемых в процессе эксперимента типов грунтов.

нью доверительной вероятности (0,95) показал:

- равновесие системы наступит при равенстве усилий в опорах при  $X_1 = 0,564$ ;  $X_2 = -1,147$ ;  $X_3 = 0,183$ ;  $P = 189,084$ ;

- для оценки величины погружения  $h$  опоры в грунт необходимо ориентировать-



ся на граничные изменения усилий под опорами;

- погружение опор модели крана в грунт в зависимости от прикладываемой нагрузки дает наилучшие показатели при линейном распределении результатов, о чем свидетельствует величина среднеквадратического отклонения  $R^2$ , стремящаяся к единице.

2. Предлагаемое усовершенствование конструкции стрелового самоходного крана позволило не только обеспечить его горизонтирование на слабонесущих грунтах, но и создать условия для изменения состояния опорной поверхности.

3. Величина просадки аутригеров модернизированного крана при работе на

неустойчивых грунтах ниже, чем у немодернизированного, независимо от типа грунта. Причем эта разница увеличивается с увеличением давления на грунт, что характерно для большегрузных кранов.

4. Рациональность принятого решения изменяется в зависимости от веса поднимаемого груза. При увеличении веса груза для условий проведенных исследований эффективность увеличивается в 1,41...2,27 раза. При работе на влажном песке применять модернизированное оборудование нецелесообразно в силу адгезионных свойств влажного песка. В остальных случаях его применение целесообразно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору // Ростехнадзор. 2013-2019. URL: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/index.php?sphrase\\_id=1656336](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/index.php?sphrase_id=1656336) (дата обращения: 01.10.2019).
2. Котельников В.С., Шишков Н.А. Аварийность и травматизм при эксплуатации грузоподъемных кранов. М.: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. 264 с.
3. Савченко Н.В., Савченко А.Н. Анализ причин аварий крановых механизмов // Промышленные и строительные технологии. 2015. № 1. С. 1-9.
4. Григорьев П.А. Классификационные признаки обеспечения безопасности крановых конструкций // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: сб. докл. XXIII Моск. междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. М., 2019. С. 300-304.
5. Зырянова С.А. Методика автоматизированного построения математической модели стрелового грузоподъемного крана // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014. № 2 (36). С. 81-87.
6. Jeng S.L., Yang C.F., Chieng W.H. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2010. V. 2 (38). P. 145-170.
7. Ватулин Я.С., Потахов Д.А., Потахов Е.А. Численное моделирование предельных состояний стреловых самоходных кранов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 4 (697). С. 19-27.
8. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Stability Assessment as a Criterion of Stabilization of the Movement Trajectory of Mobile Crane Working Elements // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. V. 23. P. 65-77.
9. КС-3577-4.00.000 ТО. Кран автомобильный КС-3577-4. Техническое описание и руководство по эксплуатации.
10. ГОСТ Р 53228-2008. Весы неавтоматического действия. Ч. 1. Метрологические и технические требования. Испытания (с Изменением N 1). М.: Стандартинформ, 2010. 133 с.
1. Annual Reports on Activities of the Federal Department on Ecological, Technological and Nuclear Supervision // Rostechnadzor. 2013-2019. URL: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/index.php?sphrase\\_id=1656336](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/index.php?sphrase_id=1656336) (Address date: 01.10.2019).
2. Kotelnikov V.S., Shishkov N.A. Accident Rate and Injuries at Hoisting Crane Operation. M.: Scientific Technical Center for Safety in Industry of State Engineering Supervision of Russia, 2004. pp. 264.
3. Savchenko N.V., Savchenko A.N. Causes analysis of crane mechanisms accidents // Industrial and Construction Technologies. 2015. No.1. pp. 1-9.
4. Grigoriev P.A. Classification signs of safety support of crane equipment // Hoisting-Transport, Construction, Road, Railway Machinery and Robotic Systems: Proceedings of the XXIII-d Moscow Inter. Inter-College Scientif.-Tech. Conf. of Students, Master Students and Young Scientists. M., 2019. pp. 300-304.

5. Zyryanova S.A. Procedure for automated formation simulator of boom load-hoisting // Bulletin of Siberian State Road-Transport Academy. 2014. No.2. (36). pp. 81-87.
6. Jeng S.L., Yang C.F., Chieng W.H. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2010. V. 2 (38). P. 145-170.
7. Vatulin Ya.S., Potakhov D.A., Potakhov E.A. Limiting state digital modeling of boom self-propelled cranes // College Proceedings. Mechanical Engineering. 2018. No.4 (697). pp. 19-27.
8. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Stability Assessment as a Criterion of Stabilization of the Movement Trajectory of Mobile Crane Working Elements // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. V. 23. P. 65-77.
9. KS-3577-4.00.000 TO Truck Crane KS-3577-4. Technical Description and Operating Manual.
10. GOST R 53228-2008. Non-automatic Scales. Part.1. Metrological and Technical Requirements. Tests (with Change No.1). M.: Standardinform, 2010. pp. 133.

Ссылка для цитирования:

Григорьев П.А., Сладкова Л.А., Крылов В.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование изменения усилий в опорах стрелового самоходного крана // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 43–52. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2-43-52.

Статья поступила в редакцию 03.12.19.

Рецензент: д.т.н., профессор, генеральный директор  
ООО «Русский сертификационный центр»

Савельев А.Г.

Статья принята к публикации 29. 01. 20.

#### Сведения об авторах:

**Григорьев Павел Александрович**, аспирант, ассистент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта (МИИТ), e-mail: grigorievpavel1996@yandex.ru.

**Сладкова Любовь Александровна**, д.т.н., профессор кафедры «Наземные транспортно-

**Grigoriev Pavel Alexandrovich**, Post graduate student, Assistant of the Dep. “Ground Technological Vehicles” Russian University of Transport (MIIT), e-mail: grigorievpavel1996@yandex.ru.

**Sladkova Lyubov Alexandrovna**, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Ground Technological Vehicles” Russian

технологические средства» Российского университета транспорта (МИИТ), e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

**Крылов Вадим Викторович**, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта (МИИТ), e-mail: vadimkrylov96@yandex.ru.

University of Transport (MIIT), e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

**Krylov Vadim Victorovich**, Post graduate student of the Dep. “Ground Technological Vehicles” Russian University of Transport (MIIT), e-mail: vadimkrylov96@yandex.ru.