



DOI: [10.71167/uaceg.2024.570101](https://doi.org/10.71167/uaceg.2024.570101)

Получена: 26.07.2023 г.

Приета: 07.09.2023 г.

ОТНОСНО МАКСИМАЛНОТО НАТИСКОВО НАТОВАРВАНЕ ОТ МОСТОВ КРАН ВЪРХУ НОСЕЩИТЕ КОЛОНИ НА СГРАДА

К. Радлов¹, А. Таушанов²

Ключови думи: мостов кран, натискава сила, строителна конструкция, колона, коефициент на динамичност, ударен импулс

РЕЗЮМЕ

Изследванията в настоящото проучване са съсредоточени върху важни въпроси, свързани с определянето на натисковата сила, която се предава от мостов кран върху носеща колона на сграда, когато кранът е позициониран в близост до колоната. В разработката са разгледани възможни опростени подходи и общоприети зависимости за определяне на максималното вертикално натоварване, предавано от мостовия кран върху носеща конструкция на сградата, които са дадени в нормативните документи и стандартите. Набелязани са основните меродавни натоварващи комбинации при работа на мостовия кран, при които би могло да се реализира максимално вертикално натоварване върху строителната конструкция. Разработен е механо-математичен модел за изследване на динамичното поведение на окачения към куката на крана товар. Съставено е диференциално уравнение за движение на механичната система с отчитане на промяната в коравината по време на повдигането на товара от нивото на терена с работна възможна скорост. Чрез решаване на предложеното уравнение може да се извърши по-точно определяне на коефициента на динамичност φ_2 . Разгледан е числен пример, за който са сравнени максималните вертикални натоварвания върху колоните на сградата, получени чрез използване на общоприетите опростени зависимости от нормативните документи с тези, получени с предложения модел. С помощта на модела е извършено и изследване на коефициента на динамичност φ_2 , при промяна на скоростта на издигане и при промяна на дължината на въжето. Направените изводи могат да бъдат полезни за изясняване на случаите, когато усилието във въжето действително е по-

¹ Калин Радлов, доц. д-р инж., кат. „Технология и механизация на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kradlov@abv.bg

² Александър Таушанов, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: taushanov@uacg.bg

голямо от полученото по методологията, предписана в стандартите за проектиране. Подценяването на усиλιето във въжето не само би довело до инцидент в крана, но и би увеличило вертикалното натоварване върху носещите колони на сградата.

1. Въведение

Мостовите кранове представляват един от най-често използваните видове товароподемни машини в производствени цехове и промишлени халета [1]. Те често пъти намират приложение в ролята на механизация на товаро-разтоварните и монтажните работи в строителни предприятия, които се занимават с монтаж и сглобяване на строителни конструкции. Характерният начин за монтаж на мостовите кранове към строителната конструкция (чрез стоманени ходови колела, непосредствено разположени върху подкранов релсов път), позволява директно предаване на вертикалното натоварване (натискова сила) от мостовия кран към колоните на сградата. Известно е, че максималното вертикално натоварване от мостовия кран върху носещата колона ще възниква тогава, когато мостовият кран извършва подечни операции с окачен максимален товар и се явява позициониран непосредствено над колоната на сградата. Целта на настоящото изследване е да се анализира действителната стойност на максималната натискова сила, която е възможно да бъде предадена от мостовия кран върху носещите колони на сградата.

2. Изчисляване на натоварвания от товароподемен кран върху строителна конструкция съгласно Еврокод и действащите Европейски стандарти за кранове (EN)

По смисъла на т. 1.5.3.16 от стандарт [2] при проверките за носимоспособност на носещи колони на сгради, натисковото натоварване от мостовия кран представлява т.нар. „променливо въздействие“, чиято изчислителна стойност F_d в основната комбинация за оразмеряване на носещата колона при краткотрайна изчислителна ситуация (т. 6.4.3.2 от [2]), следва да се отчете като:

$$F_d = \psi_0 \gamma_Q Q_K, \quad (1)$$

където ψ_0 е коефициент на комбиниране за променливо въздействие;

Q_K – характеристична стойност на променливото въздействие;

γ_Q – частен коефициент на сигурност за променливо въздействие, който отчита възможността за неблагоприятни отклонения от стойността на въздействието, както и несъвършенствата при моделирането на въздействието.

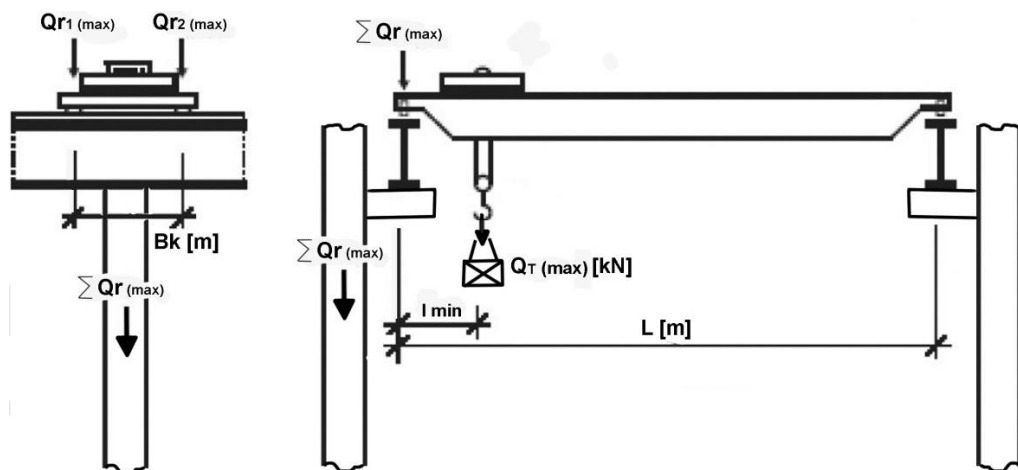
Коефициент на комбиниране „ ψ “ за натоварване от кран се прилага само тогава, когато натоварването от кран не представлява „основното кратковременно натоварване“ в разглежданата изчислителна комбинация за строителната конструкция. По смисъла на т. 1.5.3.17 от стандарт [2] за стоманената колона натоварването от крана би следвало да се разглежда като т.нар. „често повтаряща се стойност на променливо въздействие“, чиято изчислителна стойност F_d в основната изчислителна комбинация за проверките за носимоспособност на носещата колона на сградата би следвало да се отчете по следния начин:

$$F_d = \psi_1 \gamma_Q Q_K, \quad (2)$$

където ψ_1 е коефициент на комбиниране за често повтарящо се променливо въздействие. Конкретно за натоварванията от кранове върху строителни конструкции в системата Еврокод има разработен специален стандарт [3], по смисъла на който, при изчисленията на строителните конструкции с натоварвания от кранове се прилагат следните стойности за коефициентите на комбиниране: $\psi_0 = 1$; $\psi_1 = 0,9$. Съгласно указанията на стандарт [3] (таблица А1 в Приложение А) частният коефициент на сигурност за всички натоварвания от мостови кранове върху сграда, при извършване на якостна проверка на колоните на сградата, навсякъде се приема за: $\gamma_Q = 1,35$.

По смисъла на стандарт [3] натоварванията от мостови кранове към строителните конструкции на сградите могат да бъдат разглеждани не само като „променливи въздействия“, но също и като „особени въздействия“. В групата на „особените въздействия“ попадат само буферните сили и преобръщащите сили, които по своя смисъл изразяват „горизонтални натоварвания“, и следователно не се счита, че могат да играят съществена роля върху вертикалното натоварване, предавано от мостовия кран върху сградата.

Максимално вертикално натоварване от мостовия кран върху строителната конструкция и носещите колони се реализира тогава, когато мостът на крана е позициониран непосредствено над носещата колона на сградата, крановата количка е разположена в края на моста и се извършват операции с окачен максимален (номинален) товар (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема на разполагане на мостов кран непосредствено над носещата колона, при което се предава максимално вертикално натоварване

На фиг. 1 са използвани следните означения: B_K – база на крана в m; L – отвор на крана в m; $Q_{T(max)}$ – максимално натоварване от окачен товар в kN (то включва: номинален товар + динамични сили). Съгласно [4] към теглото на товара трябва да се включат също масата на част от товароподемните въжета и масата на товароухващото устройство; l_{min} – разстояние на максимално приближаване на крановата количка в края на моста в m; $Q_{r1(max)}$, $Q_{r2(max)}$ – максимални вертикални натоварвания под двете ходови колела на моста на крана откъм по-натоварената страна в

kN. Сумарното максимално предавано вертикално натоварване от моста на крана към строителната конструкция е:

$$\Sigma Q_{r(\max)} = Q_{r1(\max)} + Q_{r2(\max)}. \quad (3)$$

Съгласно таблица 2.2 от стандарт [3], основната изчислителна комбинация с натоварвания от мостов кран, при която може да се реализира максимално вертикално натоварване върху колоните на сградата, е „група натоварване 1“ – извършване на операции, които са свързани с непосредствено повдигане (отлепяне) на товар от нивото на терена с номинална скорост, а от най-голяма важност за правилното определяне на вертикалното натоварване (натискова сила) върху колоните на сградата е именно това, да бъде определена адекватна стойност за коефициента на динамичност φ_2 . „Група натоварване 1“ включва в себе си следните отделни (частни) натоварвания:

- собствено тегло на цялата носеща конструкция на мостовия кран, умножено с коефициент на динамичност $\varphi_1 = 1,1$ (който отчита вибрациите в носещата конструкция на крана по време на изпълнение на операцията по повдигане);
- натоварване от ускоряване на моста на крана, с отчитане на коефициент на динамичност φ_5 (няма пряка връзка с разглежданото вертикално натоварване върху колоните на сградата);
- тегло на повдиган товар от крана, умножено с коефициент на динамичност

$$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 v_h, \quad (4)$$

където v_h е равномерна скорост на повдигане в m/s; $\varphi_{2,\min}$ и β_2 – коефициенти, чиито минимални стойности се препоръчва да бъдат определяни въз основа на т.нар. „клас по товароподемност на крана НС“, съгласно таблица 2.5 от стандарта [3]. Максималните възможни стойности (за клас НС4 – наличие на корава носеща конструкция на крана и начин на управление на подемния механизъм, който позволява резки изменения на скоростта) са:

$$\varphi_{2,\min} = 1,20, \quad \beta_2 = 0,68. \quad (5)$$

Важно е да се отбележи, че коефициентът на динамичност φ_2 (който отчита динамичния ефект от рязко повдигане/отлепяне на товар от терена) се прилага само към окачения товар на крана.

Съгласно новия Европейски стандарт [4] натоварването от повдигане (отлепяне) на товар от нивото на терена с номинална работна (нормална експлоатационна) скорост трябва да се отчита като регулярно натоварване върху крановата конструкция от група А (при нормална експлоатация). В този случай определянето на скоростта на подеъм v_h за заместване във формулата (5) за изчисляване на коефициента на динамичност φ_2 , трябва да се извършва въз основа на определен „клас на тип на подеъмния механизъм HD“ по следния начин:

1. Подеъмният механизъм няма микроскорост или началото на вдигането е възможно без микроскорост, т.е. $v_h = v_{h,\max}$ (клас HD1), където $v_{h,\max}$ е максималната възможна скорост на подеъм;
2. Подеъмният механизъм има микроскорост и началото на вдигането става само на микроскорост, т.е. $v_h = v_{h,CS}$, където $v_{h,CS}$ е постоянната микроскорост на подеъм (клас HD2);

3. Подемният механизъм има възможност да поддържа постоянна микроскорост, докато товарът се повдигне от терена, т.е. $v_h = v_{h.CS}$, където $v_{h.CS}$ е постоянната микроскорост на подем (клас HD3);
4. Началото на вдигането се извършва с постоянно увеличаваща се скорост $v_h = 0,5v_{h.max}$ (клас HD4);
5. Управлението на подемния механизъм е плавно и автоматично, като осигурява незначително влияние на скоростта върху подемна динамична сила; $v_h = 0$ (клас HD5).

Съгласно стандарт [4] натоварването от повдигане (отлепяне) на товар от нивото на терена с максимална възможна скорост трябва да се отчита като специално натоварване върху крановата конструкция от група С (при извънредни обстоятелства). В този случай определянето на скоростта на подем v_h става по следния начин:

1. Клас HD1 – не се разглежда;
2. Клас HD2 – $v_h = v_{h.max}$;
3. Клас HD3 – не се разглежда;
4. Клас HD4 – $v_h = v_{h.max}$;
5. Клас HD5 – $v_h = 0,5v_{h.max}$.

Стандарт [4] допуска също коефициентът на динамичност φ_{2t} да бъде определен въз основа на по-детайлни анализи/изчисления (или по експериментален път), без позоваване на класовете на подем. Формула за изчисляване на теоретична стойност на коефициента на динамичност φ_{2t} специално за мостовите кранове има указана в стандарта [7], а именно:

$$\varphi_{2t} = 1 + \frac{2,8v_{h.max}}{0,45 + \sqrt{\frac{R_R l_{кл.въже}}{1500Z_A}}}, \quad (6)$$

където R_R е клас на якост на въжето съгласно стандарт [5] в МПа; $l_{кл.въже}$ – дължина на един клон на въжето (в общия случай това е разстоянието от долен ролков блок до горен ролков блок) в m; Z_A – реалният коефициент на използване на якостта на подемното въже.

3. Числен пример за изчисляване на максимално вертикално натоварване, предавано от мостовия кран върху колони на сграда съгласно действащите стандарти

За целите на настоящото изследване се разглежда мостов кран с номинална товароподемност 50 t, който работи в производствен цех. Основните технически характеристики на крана са следните: номинална скорост на подем: 7,8 m/min; микроскорост на подем: 1,0 m/min; максимална височина на вдигане – $H = 12$ m; отвор

на моста на крана – $L = 16$ m; база на крана – $Bk = 4$ m; маса на крановата количка – 14 t (тона); маса на моста на крана (без количката) – 35 t; клас на якост на въжето $R_R = 2160$ МПа; диаметър на товароподемното въже 20 mm (6×37 броя телчета (дилки) с метална сърцевина). Въжетата за товароподемните кранове биват специфицирани по стандарт [5]. Приема се площ на напречното сечение на едно въже: $A_K = 1,65 \cdot 10^{-4}$ в m^2 ; кратност на вдвоен полиспаг $a_n = 6$ (т.е. общо $2 \cdot 6 = 12$ въжета); модул на еластичност на въжето $E_K = 1,28 \cdot 10^8$ kPa; коефициент на еластична коравина по вертикала на цялата група подежни въжета (12 броя) при крайно долно положение на товара (дължина на отпускане на въжетата 12 m), измерен в точката на окачване на товара (т.е. при куката): $k_1 = 21120$ kN/m; коефициент на еластична коравина по вертикала на цялата група подежни въжета (12 броя) при крайно горно положение на товара (дължина на отпускане на въжетата 2,4 m), измерен в точката на окачване на товара (т.е. при куката): $k_2 = 105\,600$ kN/m; коефициент на използване на въжето по якост $Z_A = 8,55$; наличие на корава носеща конструкция на крана и такъв начин за управление на подемния механизъм, който позволява резки изменения на скоростта – клас НС4; клас на тип на подемния механизъм HD3 – управлението на подемния механизъм би могло да поддържа постоянна микроскорост, докато товарът се повдигне от терена. За целите на настоящите изчисления се приема коефициент на относително затихване $\xi = 0,03$ (damping ratio 3 %), както и коефициент на линейно съпротивление на въжено-полиспагната система $c = 60$ kN.s/m.

На база на горните входни данни се изчислява коефициент на динамичност съгласно указанията на действащите стандарти:

- при повдигане/отлепяне на товар от терена с микроскорост (регулярно натоварване от група А по [4]) $\varphi_2 = 1,2 + 0,02 \cdot 0,68 = 1,21$;
- при повдигане/отлепяне на товар от терена с максимална възможна скорост (специално натоварване от група С по [4]) $\varphi_2 = 1,2 + 0,13 \cdot 0,68 = 1,29$;
- теоретична стойност на коефициента на динамичност φ_{2t} по (6):

$$\varphi_{2t} = 1 + \frac{0,1876}{0,45 + 636} = 1,003. \quad (7)$$

Най-високата изчислена стойност на коефициента на динамичност при повдигане/отлепяне на товар от нивото на терена с максимална възможна скорост, получаван съгласно Европейските стандарти, е $\varphi_{2,\max} = 1,29$. По този начин приблизителната стойност за максималното вертикално натоварване върху носещата колона, което се предава от крана, се изчислява по формулата:

$$F_{\text{кран.макс}} = \gamma_Q \left[\left(\frac{m_{\text{мост}} g}{2} + m_{\text{количка}} g \right) \right] \varphi_1 + Q_{\text{ном}} \varphi_{2,\max}. \quad (8)$$

След заместване на числените стойности се получава:

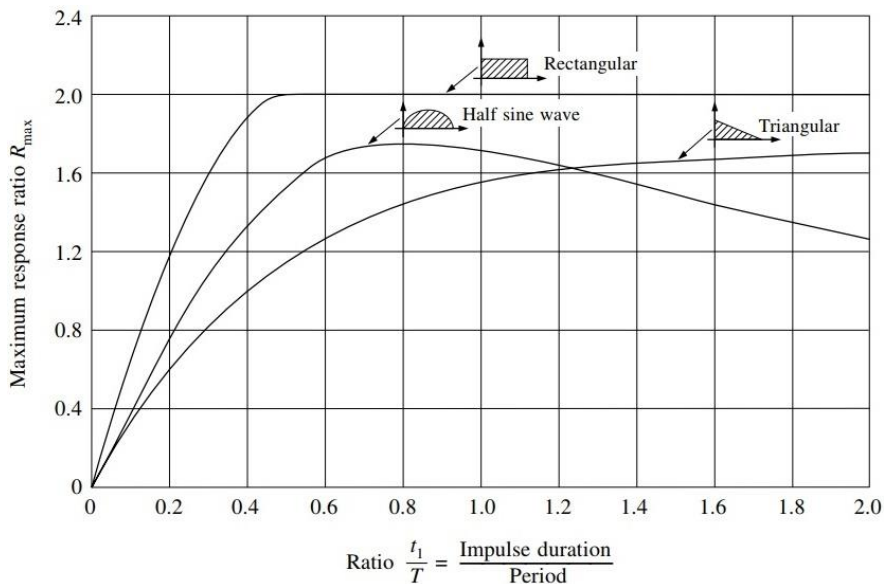
$$F_{\text{кран.макс}} = 1,35 \cdot \left[\left(\frac{35,9,81}{2} + 14,9,81 \right) \right] \cdot 1,1 + 500 \cdot 1,29. \quad (9)$$

Максималното вертикално натоварване върху носещата колона е $F_{\text{кран.макс}} = 1638,35$ kN, с което се извършват изчисленията на носимоспособност по Еврокод.

Друг възможен подход за определяне на коефициент на динамичност е чрез използване на теорията на удара (понякога наричана теория на ударния импулс, поради термина на английски език „impulsive loading“). Натоварването от удар (impulsive loading) върху конструкция е динамично. То се представя като функция на силата (във времето), която е с големи стойности (ординати), но с много кратка продължителност.

Силата, която се получава в резултат на удара, може да се разглежда (моделира) като ударен импулс.

Затихването (явлението *damping*) има много по-малко значение при контролирането на максималните стойности на усилия и премествания, предизвикани от краткотрайно ударно-импулсно натоварване, отколкото при периодични или хармонични смущения с голяма продължителност, тъй като максималните стойности на натоварването в конструкцията при конкретен импулсен товар ще бъдат постигнати за много кратко време, преди силите на затихване да успеят да абсорбират съществено количество енергия от конструкцията. Известни са решенията за получаван коефициент на динамичност (коефициент на реагиране) β от единичен удар (ударен импулс) с различни форми: триъгълен, правоъгълен, с форма на полусинусоида и др. Решението се дава във вид коефициент на динамичност в зависимост от съотношението на продължителността на ударния импулс t_1 към собствения период на конструкцията T (фиг. 2).



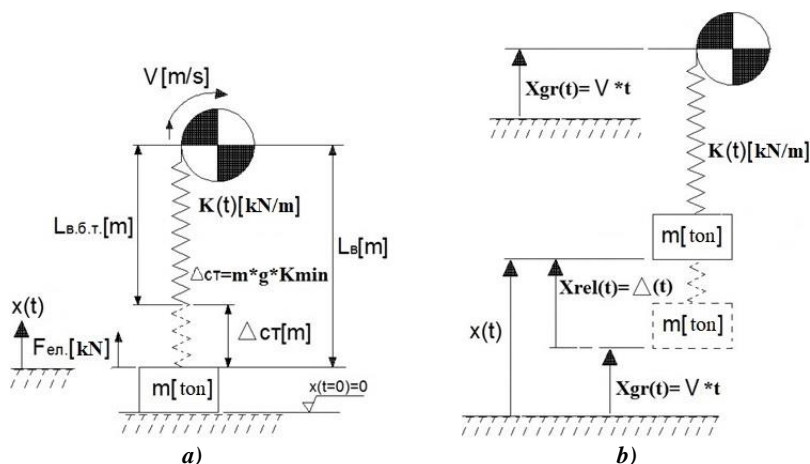
Фиг. 2. Спектър за максималната динамична реакция за три вида ударен импулс [6]

При повдигане (отлепяне) на товар от терена с максимална възможна скорост, предполагаемото ударно-импулсно натоварване би следвало най-много да се доближава до формата на полусинусоидален импулс (half-sine wave), за който случай може да се види, че максималният възможен коефициент на динамичност е около $\beta = 1,76$ (фиг. 2) [6]. Трябва обаче да се има предвид, че разглежданата форма на полусинусоидален ударен импулс (half-sine wave) е теоретично идеализирана. В практически случай при наличие на различна форма на ударния импулс е възможно да се получат коефициенти на динамичност с различна стойност.

4. Разработване на механо-математичен модел за изследване на реалната стойност за коефициента на динамичност при непосредствено повдигане на товар от нивото на терена

Разработен е механо-математичен модел, който е представен на фиг. 3. При анализа се използват следните означения:

$x(t)$, $\dot{x}(t)$ и $\ddot{x}(t)$ са съответно стойностите на динамичното преместване, скорост и ускорение на разглежданата степен на свобода (масовия център на товара);



Фиг. 3. Разработен механо-математичен модел:

- a) основни геометрични параметри на модела в началния момент ($t = 0$);
 b) общ вид на механо-математичния модел

$L_{в.}$ – дължина на въжето при крайно долно положение на товара (опънато въже и товар върху терена) в m;

$L_{в.б.т.}$ – дължина на въжето без окачен товар в m;

$A_{в.}$ – площ на напречното сечение на всички въжета, към които е окачен товара в m^2 ;

E_K – модул на еластичност на въжето в kPa;

V – номинална скорост на вдигане на товара в m/s;

За първите няколко секунди от началото на повдигането (отделянето) на товара от нивото на терена окаченият товар може да се разглежда като система с една динамична степен на свобода, която е подложена на равномерно движение – издигане с постоянна скорост V , при което възникват инерционни сили. Моделът, с който е изследвана системата, се подчинява на диференциалното уравнение за равновесие:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - V) + k(x - Vt) = 0. \quad (10)$$

В горното уравнение са използвани общоприетите означения за маса m , коефициент на затихване c и коефициент на коравина k . Коравината на въжето е променлива, като тя започва да се увеличава след началото на повдигането (отделянето) на товара от нивото на терена. Нейната приблизителна стойност в първите секунди от отделянето (повдигането) на товара от нивото на терена с достатъчна степен на точност може да се приеме за равна на:

$$k = \frac{E_K A_B}{L_{\text{в.б.т.}} - Vt} \quad (11)$$

Дължината на въжето се изчислява по формулата:

$$L_{\text{в.б.т.}} = L_B - \Delta_{\text{ст}}, \quad (12)$$

В КОЯТО:

$$\Delta_{\text{ст}} = \frac{mg}{k(t=0)} \quad (13)$$

е статично провисване на въжето при крайно долно положение на товара (опънато въже и товар върху терена) в т. Уравнението, от което ще бъде изчислена дължина на въжето без окачен товар, е:

$$L_{\text{в.б.т.}} = \frac{L_B}{1 + \frac{mg}{E_K A_B}} \quad (14)$$

Коефициентът на затихване c в kN.s/m също представлява функция на времето. Тъй като се оказва, че влиянието на явлението затихване (damping) върху стойността на максималното усилие във въжето е малко (максималното усилие във въжето възниква в първите секунди от началото на повдигането/отделянето на товара от нивото на терена), може да се приеме опростяващата предпоставка, че c има постоянна стойност, съответстваща на коефициента на относително затихване.

След решаване на диференциалното уравнение и получаване на динамично движение на окачения товар след неговото отлепяне (отделяне) от терена $x(t)$ се изчислява приблизителната стойност на деформацията (удължението) на въжето във времето по следната зависимост:

$$\Delta(t) = x(t) - Vt, \quad (15)$$

където t е времето от началото на повдигането на товара от земята в с. След отчитане и на първоначалната статична деформация на въжето (от силата на собственото тегло на товара) приблизителната стойност на общата деформация във въжето за първите три секунди от началото на повдигането (отлепянето) на товара от терена се приема за равна на:

$$\Delta_{\text{общо}}(t) = \Delta(t) - \Delta_{\text{ст}}. \quad (16)$$

Силата на опън в товароподемното въже се изчислява по следната зависимост:

$$F_{\text{опън}}(t) = k(t) \Delta_{\text{общо}}(t). \quad (17)$$

5. Решаване на числен пример при скорост на вдигане на товара 7,8 m/min и максимална височина на подем $H = 12$ m

Приема се номинална скорост на вдигане на товара 7,80 m/min, т.е. $V_n = 0,13$ m/s и максимална височина на вдигане (подем) на крана $H = 12$ m, т.е. дължина на въжето при

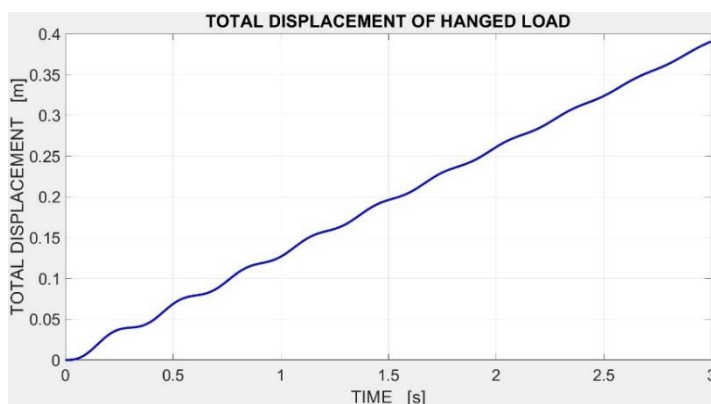
крайно долно положение на товара (опънато въже и товар върху терена) е $L_b = 12$ m. Останалите параметри са съгласно гореприетите входни данни. Така се изчисляват: $L_{в.б.т.} = 11,977$ m, $\Delta_{ст} = 0,023$ m, а изразът за коравината е:

$$k = \frac{253440}{11,977 - 0,13t}. \quad (18)$$

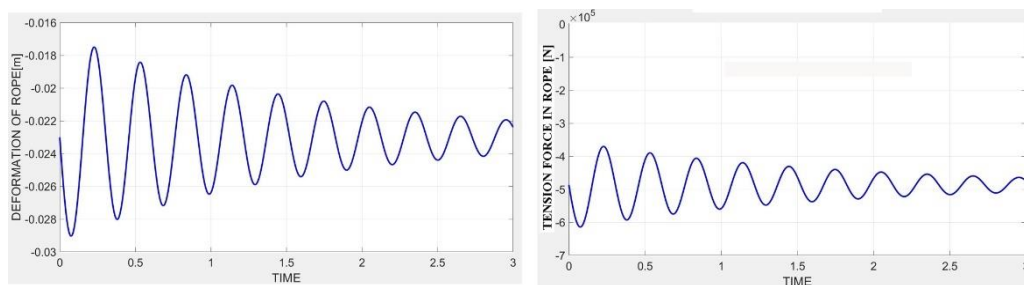
Заместват се стойностите в диференциалното уравнение и се получава:

$$50\ddot{x} + 60(\dot{x} - 0,13) + \frac{253440}{11,977 - 0,13t}(x - 0,13t) = 0. \quad (19)$$

След решаване на диференциалното уравнение се получават показаните на фиг. 4 графики за динамичното преместване на окачения товар $x(t)$ за първите 3 секунди от началото на повдигане на товара от нивото на терена.



Фиг. 4. Динамично преместване на окачения товар $x(t)$ за първите 3 секунди от началото на повдигане на товара от нивото на терена при скорост на подем 7,80 m/min и височина на вдигане $H = 8$ m



Фиг. 5. Деформация на въжето $\Delta(t)$ и сила на опън във въжето $F_{оп}(t)$ за първите 3 секунди от началото на повдигане на товара от нивото на терена при скорост на подем 7,80 m/min и височина на вдигане $H = 8$ m

Общата деформация на въжето и силата на опън във въжето за първите 3 секунди от началото на повдигането на товара от нивото на терена се изчисляват по формули (16) и (17). Получените графики на деформацията на въжето и силата на опън във въжето са показани на фиг. 5.

Максималната динамична сила на опън във въжето е равна на 615 kN. Действителният (реалният) коефициент на динамичност към окачения товар, който се получава от математическото решение на динамичния модел с диференциални уравнения, е равен на $\varphi_2 = 615/500 = 1,23 < 1,29$. Полученият коефициент на динамичност във въжето φ_2 се покрива от предлаганата регламентирана стойност в стандартите [4] ($\varphi_2 = 1,29$), като е значително по-малък от максимално възможната стойност, която се предлага при разглеждане на постановката от гледна точка на теорията на ударния импулс $\beta = 1,76$ [6].

6. Анализ на чувствителността на изменение на коефициента на динамичност при увеличаване на скоростта на вдигане или намаляване на височината на подем на крана

Извършени са допълнителни изследвания за чувствителността на крайния резултат и анализ на характера на изменението на коефициента на динамичност φ_2 при увеличаване на скоростта на вдигане или намаляване на височината на подем на крана. Получени са следните резултати:

- При скорост на вдигане на товара 12 m/min и максимална височина на подем $H = 12$ m, максималната динамична сила на опън във въжето се получава 690 kN. Коефициентът на динамичност към окачения товар се получава: $\varphi_2 = 690/500 = 1,38$. При изчисляване на същия коефициент на динамичност по [4] се получава: $\varphi_2 = 1,2 + 0,2 \cdot 0,68 = 1,34 < 1,38$, т.е. регламентираната в стандарт [4] стойност не покрива получената стойност при решаване на механо-математичния модел.
- При скорост на вдигане на товара 16 m/min и максимална височина на подем $H = 12$ m максималната динамична сила на опън във въжето се получава 760 kN, и съответно коефициентът на динамичност е: $\varphi_2 = 760/500 = 1,52$. При изчисляване на същия коефициент на динамичност по [4] стойността му е $\varphi_2 = 1,2 + 0,26 \cdot 0,68 = 1,38 < 1,52$, т.е. регламентираната в стандарт [4] стойност не покрива получената стойност при решаване на механо-математичния модел.
- При максимална височина на подем $H = 9$ m и скорост на вдигане на товара 7,8 m/min, максималната динамична сила на опън във въжето се получава 645 kN, а коефициентът на динамичност към окачения товар е: $\varphi_2 = 645/500 = 1,29$ и в този случай е равен на предлаганата регламентирана стойност в стандартите [4] $\varphi_2 = 1,2 + 0,13 \cdot 0,68 = 1,29$.
- При максимална височина на подем $H = 6$ m и скорост на вдигане на товара 7,8 [m/min] максималната динамичната сила на опън във въжето се получава 675 kN. Коефициентът на динамичност към окачения товар се получава $\varphi_2 = 675/500 = 1,35 > 1,29$. Получаваният коефициент на динамичност във въжето φ_2 не се покрива от предлаганата регламентирана стойност в стандартите [4] $\varphi_2 = 1,2 + 0,13 \cdot 0,68 = 1,29$.

7. Анализ на получаваните резултати и заключения

Въз основа на извършените изследвания, обобщения и анализи в настоящата разработка могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. При увеличаване на скоростта на вдигане на крана се наблюдава нарастване на стойността на коефициента на динамичност във въжето φ_2 (фиг. 6a), а оттам и нарастване на максималната вертикална (натискова) сила върху колоната на сградата. При скорости на вдигане над 8 m/min получаваната стойност за коефициент на динамичност φ_2 от решаване на механо-математичния модел вече не се покрива от регламентираната стойност, която се предлага в действащите европейски стандарти (EN).
2. При намаляване на височината на подем на крана също се наблюдава нарастване на стойността на коефициента на динамичност във въжето φ_2 (фиг. 6b), а оттам и нарастване на максималната вертикална (натискова) сила върху колоната на сградата. За конкретния разглеждан изчислителен случай – при височини на подем, по-малки от 9 m, стойността на коефициента на динамичност във въжето φ_2 нараства и придобива стойност, която не се покрива от предлаганата регламентирана стойност в действащите европейски стандарти (EN).
3. При всичките разглеждани изчислителни случаи получаваните стойности на коефициента на динамичност във въжето φ_2 са по-малки от максимално възможната стойност, която се предлага при разглеждане на постановката от гледна точка на теорията на ударния импулс – полусинусоидален (half-sine wave impulse), с максимален възможен коефициент на динамичност (response ratio) $\beta = 1,76$ [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mitev, N.* Design of lifting machines. Publishing house "Vasil Aprilov", Gabrovo, 2010.
2. EN 1990:2002, Eurocode. Basis of structural design.
3. EN 1991-3:2006, Eurocode 1: Actions on structures – Part 3: Actions induced by cranes and machinery.
4. EN 13001-2:2021, Crane safety – General design – Part 2: Load actions.
5. EN 12385-4:2002+A1:2008, Steel wire ropes – Safety – Part 4: Stranded ropes for general lifting applications.
6. *Clough, R. W., Penzien, J.* Dynamics of Structures. Third Edition, Computers & Structures, Inc., Berkeley, 1995.
7. EN 15011:2021, Cranes – Bridge and Gantry cranes.

ABOUT MAXIMAL COMPRESSIVE LOADS ON BUILDING COLUMNS CAUSED BY OVERHEAD BRIDGE CRANE

K. Radlov¹, A. Taushanov²

Keywords: *bridge crane, compressive force, building structure, column, dynamic magnification factor, impulsive loading*

ABSTRACT

The research in the present work is aimed at determining the compressive force transmitted by a bridge crane on a supporting column of a building. The development examines the possible simplified approaches and generally accepted dependencies for determining the maximum vertical load transmitted by the bridge crane, which are given in normative documents and standards. The main allowable combinations of loads during operation of the overhead crane are noted, in which the maximum vertical load of the building structure can be realized. A mechano-mathematical model was developed to study the dynamic behavior of the load suspended on the crane hook. A differential equation of motion for the mechanical system is formulated, taking into account the varying stiffness when the load is lifted from ground level at a possible operating speed. By solving the proposed equation, a more accurate determination of the dynamic magnification factor can be made. A numerical example was considered, for which the maximum vertical loads on the building columns, obtained by using the generally accepted simplified dependencies from the normative documents, were compared with those obtained with the proposed model. Through the model, a study of the dynamic magnification factor was also carried out, with the hoist velocity and the length of the rope varied. The conclusions drawn can be useful for clarifying the cases where the tensile stress in the rope is actually greater than that obtained by the methodology prescribed in the design standards. Underestimating the tensile stress in the rope would not only lead to an accident in the crane, but would also increase the vertical load on the supporting columns of the building.

¹ Kalin Radlov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Construction Technology and Mechanisation", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kradlov@abv.bg

² Alexander Taushanov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Structural Mechanics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: taushanov@uacg.bg