



DOI: [10.71167/uaceg.2026.590211](https://doi.org/10.71167/uaceg.2026.590211)

Получена: 04.11.2025 г.

Приета: 01.12.2025 г.

ОТНОСНО РАЗРУШИТЕЛНИЯ ПОТЕНЦИАЛ ПРИ АВАРИЯ НА КУЛОКРАН И ПАДАНЕ НА ПРОТИВОТЕЖЕСТЕН БЛОК ОТ ГОЛЯМА ВИСОЧИНА

К. Радлов¹, Д. Благов²

Ключови думи: кулокран, сила на удар, жилищна сграда, разрушителен потенциал

РЕЗЮМЕ

Разглеждат се въпроси, свързани с оценката на безопасността при експлоатация на кулокранове на строителни обекти. Фокусът е върху анализ на разрушителния потенциал при инцидентно падане (изпускане) на противотежестен блок на кулокрана от голяма височина при случай на аварийна ситуация. Допуснато е, че той пада върху съществуваща етажна плоча, разположена отдолу. Чрез математически формули и софтуерен продукт, базиран на метода на крайните елементи, са анализирани няколко различни варианта за възможния сблъсък на блока с плочата. Оформени са изводи и заключения, даващи представа за разрушителния потенциал на противотежестите. Това би спомогнало за адекватна преценка относно потенциалните съществуващи рискове на строителната площадка и предприемане на адекватни мерки и подобряване на нивото на безопасност.

1. Въведение

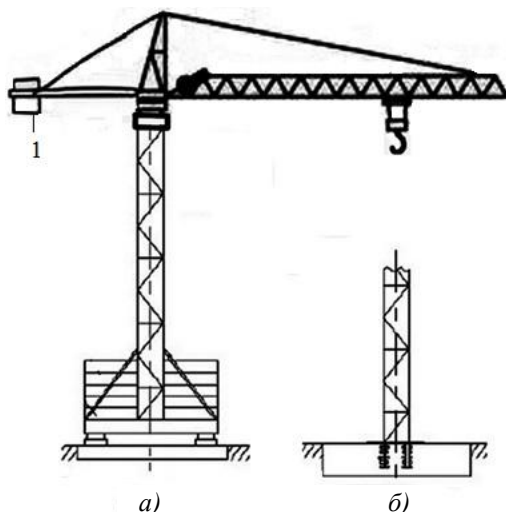
Кулокраните биват масово използвани при изграждането на сгради и строителни съоръжения с голяма височина. Общо погледнато, кулокраните представляват най-

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 Дилиан Благов, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dblastov_fce@uaceg.bg

големите машини на строителните обекти, поради което се счита, че при случай на авария те носят сериозен потенциален риск за нанасяне на големи щети на близкостоящи сгради и оборудване и/или нараняване на строителните работници.

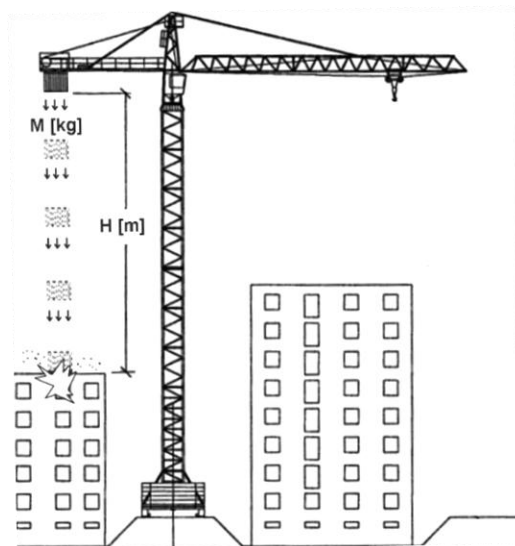
Въз основа на извършен анализ и обобщение на наличните данни за възникнали инциденти с кулокранове в световен мащаб в разработката [1] е установено, че почти 2/3 (67 %) от възникналите тежки инциденти с кулокранове на строителни обекти са били регистрирани при кулокранове от типа „стационарни с горно въртене и хоризонтална стрела“ (вж. фиг. 1). Характерно за този тип кулокранове е разполагане на противотежестните блокове на контрастрелата на голяма височина и тези противотежести могат да имат значителна собствена маса – от 10 до 35 тона (в зависимост от дължината на стрелата и товароподемността на крана). Стационарните кранове с горно въртене и хоризонтална стрела могат да бъдат монтирани към фундаментни блокове или чрез директно анкерирание на кулата към фундаментната плоча на сградата (вж. фиг. 1).



Фиг. 1. Стационарен кулокран с горно въртене и хоризонтална стрела, който е масово използван в строителството:

а) монтаж към фундаментни блокове; б) директно анкерирание на кулата на крана към фундаментната плоча на сградата; 1 – противотежестни блокове

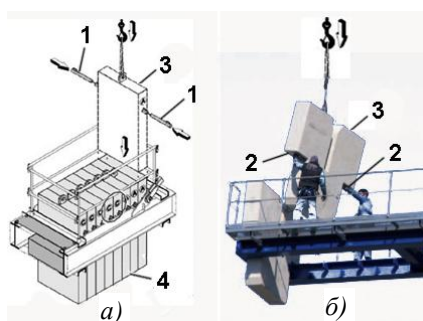
Височината на кулата на стационарните кулокранове с горно въртене, когато са фиксирани само към земна основа (т.е. без допълнителни странични укрепващи връзки към строителната конструкция), е ограничена в зависимост от вида и типоразмера на крана – обикновено до около максимум 40 – 50 метра. При използване на допълнителни хоризонтални странични връзки към строителната конструкция обаче, височината на кулата при тези кранове е практически неограничена, като често пъти се случва тя да надхвърля 100 метра. Целта на настоящата разработка е да бъде извършен анализ на част от потенциалните разрушения, които е възможно да бъдат нанесени при случай на аварийна ситуация с подобен кулокран с горно въртене, когато противотежестта на крана с маса M пада върху етажната плоча на съществуваща или новострояща се сграда от голяма височина H – вж. фиг. 2.



Фиг. 2. Разглеждан случай при падане на противотежестта на кулокран върху етажна плоча на сграда

2. Анализ на основни технически параметри на често използваните кулокранове в нашата строителна практика и възможната скорост на падане/удар на противотежестта на крана върху етажната плоча при случай на авария

Противотежестите при съвременните кулокранове биват изградени посредством асемблирането на няколко на брой здрави единични стоманобетонни блокове (вж. фиг. 3а). По този начин се образува т.нар. „група/пакет противотежестни блокове“, които биват монтирани към задния край на контрастрелата на кулокрана (вж. фиг. 3б).



Фиг. 3. Възможни начини за монтаж на отделните противотежестни блокове към контрастрелата на кулокран:

- а) чрез допълнителни заклинващи стоманени пръти (при стоманобетонни блокове с проста паралелепипедна форма); б) чрез специален заклинващ ръб/жлеб (при стоманобетонни блокове с по-сложна форма)*

На горната фиг. 3 са използвани следните обозначения: 1 – допълнителни заclinващи стоманени пръти; 2 – специален заclinващ ръб/жлеб; 3 – противотежестен блок (единична противотежест); 4 – група/пакет противотежестни блокове. По своето целево предназначение, противотежестта (групата/пакетът противотежестни блокове) на кулокрана служи за уравнивяване/балансиране на собственото тегло на крановата стрела, масата на крановата количка и масата на окачения полезен товар. Това налага кулокрановите, които имат дълги стрели (над 70 m) и товароподемност във върха на стрелата над 2,5 t, да имат голяма маса на противотежестта, която в общия случай може да надхвърли 20 t.

Едни от най-масово използваните кулокранове в Р България през последните години са кулокрановите от марка Linden Comansa, от серия/модел 2100, които имат предимството да работят с дълги стрели и голям обсег (с максимален обсег на куката от 74 m до 84 m). Тези кранове имат максимална/номинална товароподемност при минимален обсег (кука при основата на кулата) в много широк диапазон – от 12 t (при кулокран Linden Comansa 21LC335) до 50 t (при кулокран Linden Comansa 21LC750). Номиналната товароподемност във върха на стрелата (при максимален обсег) на тези кранове варира от 2,7 t (при кулокран Linden Comansa 21LC335) до 7,3 t (при кулокран Linden Comansa 21LC750). Максималната възможна височина на кулата е от 73,3 m (при по-тежките кранове 21LC750) до 96,8 m (при по-леките кранове 21LC335). Собствената маса на отделните противотежестни блокове на тези кранове също може да варира в зависимост от товароподемността и конфигурацията на крана, като например за масово използвания кулокран Linden Comansa 21LC550 има 3 вида единични блокове: противотежестен блок тип А – 4 t (габаритни размери $H \times B \times d = 2,32 \times 2,45 \times 0,4$ m), противотежестен блок тип В – 2 t (габаритни размери $H \times B \times d = 1,17 \times 2,45 \times 0,4$ m) и противотежестен блок тип С – 1 t (габаритни размери $H \times B \times d = 0,72 \times 2,45 \times 0,4$ m) [2, 3].

За целите на настоящата разработка се разглеждат четири различни възможни варианта при възникване на инцидент, свързан с падане (изпускане) на противотежестен блок на кулокран върху етажна плоча на сграда, а именно:

1. Случай 1 – падане/изпускане на единичен противотежестен блок с маса $M = 4t$ върху етажна плоча с дебелина 20 cm от височина $H = 20$ m:

– вариант 1.1 – при „плосък удар“ (ударната повърхност на противотежестта е успоредна на равнината на етажната плоча);

– вариант 1.2 – при „удар на ръб“ (противотежестта удря под 45 градуса върху равнината на етажната плоча);

2. Случай 2 – падане/изпускане на единичен противотежестен блок с маса $M = 4t$ върху етажна плоча с дебелина 30 cm от височина $H = 20$ m:

– вариант 2.1 – при „плосък удар“ (ударната повърхност на противотежестта е успоредна на равнината на етажната плоча);

– вариант 2.2 – при „удар на ръб“ (противотежестта удря под 45 градуса върху равнината на етажната плоча).

Скоростта V на противотежестта в момента на удара с етажната плоча се изчислява по общоприетите физични закони за свободно падане на тяло под въздействие на гравитация [4]:

$$V = \sqrt{2gH}, \text{ m/s,}$$

където H е височината на падане в m, а $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – земното ускорение. По този начин се изчислява, че при падане от голяма височина (за целите на настоящата разработка е прието $H = 20$ m) скоростта на противотежестта в момента на удара с етажната плоча ще бъде $V = 19,81 \text{ m/s}$.

3. Аналитични зависимости за изчисляване на енергията на разрушителния потенциал и възможността за продънване (пробиване) на етажната плоча при падане на противотежест на кулокран чрез използване на общопознати формули от теорията на удара

3.1. Аналитични зависимости за изчисляване на силата на удар $F_{\text{удар}}$ при разглеждане на удар на падащ обект върху гредови конструктивен елемент от строителната конструкция

Средната приблизителна големина на силата на удара по законите от теорията на удара в механиката, при разглеждане на удар на падащ обект върху гредови конструктивен елемент от строителната конструкция (т.е. разглеждан като греда на две опори), може да бъде изчислена по следната зависимост [5]:

1) Ако се пренебрегне локалната деформация в зоната на удара, а се разгледа само общата деформация на гредата, силата на удара $F_{\text{удар}}$ в N се изчислява по зависимостта [5]:

$$F_{\text{удар}} = V \sqrt{k_{BS} M},$$

където M е масата на падащия обект в kg;

V – скоростта на удар, m/s;

k_{BS} – коефициент на линейна (огъвна) коравина на гредата в N/m, който би могъл да се изчисли по известната зависимост за коравина в средата на просто подпряна греда:

$$k_{BS} = \frac{48EI}{L^3},$$

където E е модул на еластичност в Pa;

I – инерционен момент на напречното сечение на гредата, m⁴;

L – разстояние между опорите на гредата, m.

Горната формула не е подходяща за приложение в конкретния разглеждан случай поради това, че тя е предназначена за гредови елементи, а и е много трудно да бъде установена точна (константна) стойност за огъвна коравина на етажната плоча в момента на удара.

2) Ако се пренебрегне общата деформация на конструктивния елемент, а вместо това се приеме, че цялата енергия на удара се поема (абсорбира) само в мястото на контакта, то силата на удара $F_{\text{удар}}$ се изчислява по зависимостта [5]:

$$F_{\text{удар}} = \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{5}} \left(M^3 V^6 k_{con}^2\right)^{\frac{1}{5}},$$

където M е масата на падащия обект в kg, а V е скоростта на удара, m/s;

k_{con} , N/m – контактната коравина в мястото на удара, която се изчислява по зависимостта:

$$k_{con} = \frac{4}{3} E \sqrt{R},$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2},$$

където R_1 и R_2 са радиусите на кривина на контактните повърхнини на двата удрящи се обекта в m;

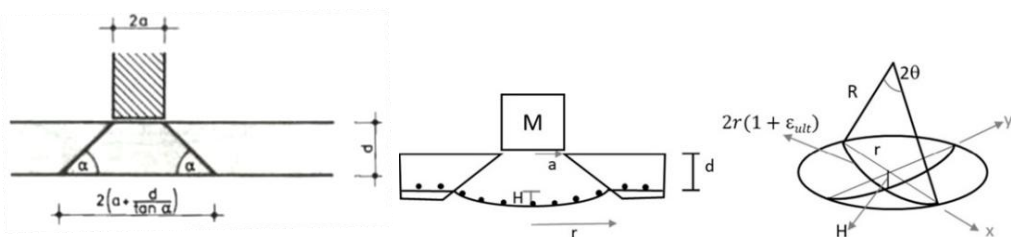
E_1 и E_2 – модулите на еластичност на материала на двата удрящи се обекта, Pa;

ν_1 и ν_2 – коефициентите на Поасон на материала на двата удрящи се обекта.

Горната формула не е подходяща за приложение в конкретния разглеждан случай, поради това че е много трудно да бъдат установени точните стойности на радиусите на кривина на контактните повърхнини на двата удрящи се обекта R_1 и R_2 в момента на удара.

3.2. Аналитични зависимости за изчисляване на максимална енергия на мембранни деформации, която може да бъде поета от етажна плоча при удар W_{mem}

Съгласно разработката [6] се разглежда т.нар. постановка за „продъвяване на конус“ от етажната плоча с дебелина d в m, при ширина на ударника $2a$ в m и радиус на продъвявания конус от етажната плоча r в m – вж. фиг. 4.



Фиг. 4. Разглеждана постановка за „продъвяване на конус“ от етажната плоча

Ако ъгълът на продъвявания конус се обозначи с θ , тогава провисването (вертикалната деформация) H в, m на етажната плоча вследствие от удара ще се изчисли по зависимостта [6]:

$$H = \frac{r}{\sin \theta} (1 - \cos \theta).$$

Ако ъгълът на продъвявания конус условно се приеме за приблизително равен на $\theta = 30,85^\circ$, при максимално допустимо относително удължение на армировката в бетона 5 % ($\epsilon_{ult} = 5\%$), горната зависимост придобива вида:

$$H = \frac{r}{\sin \theta} (1 - \cos \theta) = 0,276r .$$

При ъгъл на продъввания конус, равен на $\theta = 30,85^\circ$, радиусът на продъввания конус от етажната плоча r може да се приеме приблизително равен на (вж. фиг. 4) [6]:

$$r = a + 2d . \quad (1)$$

Съгласно разработката [6] максималната деформационна енергия, която може да бъде абсорбирана (поета) от армировката в етажната плоча (армировката, поемаща огъвните усилия), преди да се стигне до продъвване на плочата – т.нар. „максимална енергия на мембранни деформации, която може да бъде поета от етажната плоча“ (при максимално допустимо относително удължение на армировката в бетона 5 %, се изчислява по зависимостта:

$$W_{mem} = 0,226r^2 \sigma_Y a_S , \quad (2)$$

където r е радиусът на продъввания конус от етажната плоча в m;

a_S – площ на опънатата армировка в едно хоризонтално направление на етажната плоча, mm^2/m (приема се $a_X = a_Y$);

σ_Y – граница на провлачане на армировъчната стомана, МПа.

3.3. Аналитични зависимости за изчисляване на разрушителния потенциал и дълбочината на проникване в бетона при падане на противотежест на кулокран върху етажна плоча на сграда с помощта на емпирични формули за продъвване (пробиване) на стоманобетонен елемент

За целите на настоящата разработка са разгледани общоизвестните емпирично изведени формули от инженерната практика, а именно:

1) Френската формула (т.нар. „СЕА-формула“) [7], която се препоръчва за оценяване на дълбочината на проникване t_p , m в стоманобетонени елементи с обемна плътност на стоманобетона 2500 kg/m^3 :

$$t_p = 0,01943 \left(\frac{1}{142,22 f_c'} \right)^{0,375} \sqrt{\frac{M}{17,717 D}} \left(\frac{V}{0,3048} \right)^{0,75} , \quad (3)$$

където t_p е дълбочината на проникване на падащия обект в стоманобетоневата плоча, в която се удря, в m;

f_c' – якостта на натиск на бетона, МПа;

M – масата на падащия обект, kg;

V – скоростта на падащия обект в момента на удара, m/s;

D – ефективен (номинален) размер/диаметър на удрящия (падащия) обект, m.

2) Японската формула (т.нар. „CRIEPI-формула“) [8]:

$$t_p = 0,274 \left(\frac{60,96}{V} \right)^{0,25} \sqrt{\frac{MV^2}{91177,4Df_c'}} \quad (4)$$

4. Решаване на конкретни числени примери с използване на общопознатите аналитични зависимости

4.1. Приета постановка на задачата

Възможните начини за падане/удар на противотежест на кран върху етажна плоча на сграда могат да бъдат разглеждани в двете си крайности – от плосък удар до наклонен удар (ъгъл под 45 градуса) – вж. фиг. 5.



Фиг. 5. Основни възможни начини за падане/удар на противотежестен блок на кулокран върху етажна плоча на сграда

За целите на настоящата разработка се разглеждат четирите различни възможни варианта при възникване на подобен инцидент, описани в т. 2. Габаритните размери на противотежестта са 2,32 m × 2,45 m × 0,4 m. Етажната плоча се приема с размери 5 × 5 m, като се приема, че тежестта пада точно в средата на плочата. По този начин се избягва влиянието на граничните условия на подпиране на плочата върху взаимодействието между падащото тяло и плочата в зоната на контакта.

4.2. Решаване на числен пример чрез използване на зависимостите за максимална енергия на мембранни деформации W_{mem} , която може да бъде поета от етажна плоча при удар

При падане/изпускане на единичен противотежестен блок с маса $M = 4$ t и удар върху етажна плоча, като примерни входни данни за разглеждания числен пример условно се приемат следните: ефективен размер на удрящия обект при плосък удар: $D_1 = 2a_1 = 1,4$ m; $a_1 = 1,4/2 = 0,7$ m; ефективен размер на удрящия обект при удар на ръб: $D_2 = 2a_2 = 0,4$ m; $a_2 = 0,4/2 = 0,2$ m (вж. фиг. 4); разглеждани възможни дебелини на етажната плоча: $d_1 = 0,2$ m и $d_2 = 0,3$ m; граница на провлачане на материала на армировката в етажната плоча: $\sigma_y = 235$ МПа; процент/степен на армиране на етажната плоча в надлъжно хоризонтално направление: 0,3 %.

Първо се изчислява радиусът на продъввания конус от етажната плоча r , m по гореуказаната формула (1):

1) Случай 1 (етажна плоча с дебелина 20 cm):

– вариант 1.1: при плосък удар и размер на удрящия обект (противотежестен блок)
 $D_1 = 1,4$ m: $r = 0,7 + 2,0,2 = 1,1$ m (т.е. диаметърът на продънване е 2,2 m);

– вариант 1.2: при удар на ръб и размер на удрящия обект (противотежестен блок)
 $D_2 = 0,4$ m: $r = 0,2 + 2,0,2 = 0,6$ m (т.е. диаметърът на продънване е 1,2 m);

2) Случай 2 (етажна плоча с дебелина 30 cm):

– вариант 2.1: при плосък удар и размер на удрящия обект (противотежестен блок)
 $D_1 = 1,4$ m: $r = 0,7 + 2,0,3 = 1,3$ m (т.е. диаметърът на продънване е 2,6 m);

– вариант 2.2: при удар на ръб и размер на удрящия обект (противотежестен блок)
 $D_2 = 0,4$ m: $r = 0,2 + 2,0,3 = 0,8$ m (т.е. диаметърът на продънване е 1,6 m).

След това се изчислява площта на напречното сечение на армировката в бетона в едното хоризонтално направление (X или Y) (приема се, че степента на армиране на етажната плоча в двете хоризонтални направления (X и Y) е еднаква):

– за Случай 1 (етажна плоча с дебелина 20 cm): $a_s = 0,2 \cdot 1,0 \cdot 0,003 = 0,0006$ m²/m²
 $= 600$ mm²/m²;

– за Случай 2 (етажна плоча с дебелина 30 cm): $a_s = 0,3 \cdot 1,0 \cdot 0,003 = 0,0009$ m²/m²
 $= 900$ mm²/m².

Изчислява се „максималната енергия на мембранни деформации, която може да бъде поета от етажната плоча“, по формула (2):

– за вариант 1.1 (етажна плоча с дебелина 20 cm) при плосък удар и размер на удрящия обект (единична противотежест) $D_1 = 1,4$ m:

$$W_{mem,1.1} = 0,226 \cdot 1,1^2 \cdot 235 \cdot 600 = 38560 \text{ J};$$

– за вариант 1.2 (етажна плоча с дебелина 20 cm) при удар на ръб и размер на удрящия обект (единична противотежест) $D_2 = 0,4$ m:

$$W_{mem,1.2} = 0,226 \cdot 0,6^2 \cdot 235 \cdot 600 = 11470 \text{ J};$$

– за вариант 2.1 (етажна плоча с дебелина 30 cm) при плосък удар и размер на удрящия обект (единична противотежест) $D_1 = 1,4$ m:

$$W_{mem,2.1} = 0,226 \cdot 1,3^2 \cdot 235 \cdot 900 = 80780 \text{ J};$$

– за вариант 2.2 (етажна плоча с дебелина 30 cm) при удар на ръб и размер на удрящия обект (единична противотежест) $D_2 = 0,4$ m:

$$W_{mem,2.2} = 0,226 \cdot 0,8^2 \cdot 235 \cdot 900 = 30590 \text{ J}.$$

Кинетичната енергия, която се освобождава при удара, може да се изчисли по известната формула:

$$W_{kin} = \frac{MV^2}{2} = \frac{4000 \cdot 19,81^2}{2} = 784500 \text{ J}.$$

За проверка на възможността (риска) да се стигне до разрушаване на етажната плоча може да се извърши сравнение на освобождаваната „кинетична енергия при удара“

с „максималната енергия на мембранни деформации, която може да бъде поета от разглежданите стажни плочи“ в четирите варианта. Сравнението на резултатите по горните формули недвусмислено показва, че освободената кинетична енергия е много по-голяма от максималната енергия на мембранни деформации при всички варианти. Това сравнение обаче не е коректно, тъй като след момента на удара кинетичната енергия на двете тела значително намалява, както е показано на графиките в т. 5, докато в същото време енергията на мембранните деформации се увеличава. Скоро след момента на удара (в рамките на 1 секунда) количествата на двете енергии се установяват на относително постоянни нива. По-достоверни резултати ще даде сравнението на двете енергии в такъв момент от инцидента, в който те са заели относително постоянни стойности. За целта на това сравнение е извършен числен анализ по метода на крайните елементи, резултатите от който са представени в т. 5.

4.3. Решаване на числен пример чрез използване на емпиричните зависимости за изчисляване на дълбочината на проникване в бетона и вероятността за продъвяване (пробиване) на стоманобетонен елемент

За целите на настоящата разработка се приема якост на натиск на стоманобетона: $f'_c = 20$ МПа. Останалите възприети входни данни са указани в т. 4.1. За споменатите разглеждани варианти се извършва заместване и изчисления по двете възприети формули (3) и (4), които са показани в т. 3.3.

Получават се следните резултати:

– вариант 1 – при падане/изпускане на единичен противотежестен блок с маса $M = 4$ t от височина $H = 20$ m (скорост на удара: $V = 19,81$ m/s, при плосък удар и приет ефективен размер на удрящия обект: $D_1 = 1,4$ m):

СЕА-формула (3):

$$t_{P,1} = 0,01943 \left(\frac{1}{142,22.20} \right)^{0,375} \sqrt{\frac{4000}{17,717.1,4}} \left(\frac{19,81}{0,3048} \right)^{0,75} = 0,286 \text{ m};$$

CRIEPI-формула (4):

$$t_{P,1} = 0,274 \left(\frac{60,96}{19,81} \right)^{0,25} \sqrt{\frac{4000.19,81^2}{91177,4.1,4.20}} = 0,285 \text{ m};$$

– вариант 2 – при падане/изпускане на единичен противотежестен блок с маса $M = 4$ t от височина $H = 20$ m (скорост на удара: $V = 19,81$ m/s, при удар на ръб и приет ефективен размер на удрящия обект: $D_2 = 0,4$ m):

СЕА-формула (3):

$$t_{P,2} = 0,01943 \left(\frac{1}{142,22.20} \right)^{0,375} \sqrt{\frac{4000}{17,717.0,4}} \left(\frac{19,81}{0,3048} \right)^{0,75} = 0,535 \text{ m};$$

CRIEPI-формула (4):

$$t_{P,2} = 0,274 \left(\frac{60,96}{19,81} \right)^{0,25} \sqrt{\frac{4000.19,81^2}{91177,4.0,4.20}} = 0,532 \text{ m}.$$

Следователно, съгласно емпиричните формули, при плосък удар вероятността да се стигне до пробиване/продънване на етажната плоча с дебелина $d_1 = 0,2$ m е много голяма, но е по-малка вероятността да се да се стигне до пробиване/продънване на етажната плоча с дебелина $d_2 = 0,3$ m. При удар на ръб под ъгъл 45 градуса обаче и при двете дебелини на етажните плочи ($d_1 = 0,2$ m и $d_2 = 0,3$ m) по всяка вероятност ще се стигне до пробиване/продънване на плочата.

5. Детайлно изследване на разрушителния потенциал и дълбочината на проникване в бетона при падане на противотежест на кулокран върху етажна плоча на сграда, посредством извършване на нелинеен анализ с помощта на софтуерен продукт по метода на крайните елементи (МКЕ)

5.1. Зададени входни данни и начин за 3D-моделиране в ANSYS

Извършени са изследвания на силата на удар и разрушителния потенциал при падане на противотежестен блок от кулокран върху сграда по метода на крайните елементи (МКЕ), чрез използване на софтуерния продукт ANSYS Workbench 2024 R2 и по-конкретно модула Explicit Dynamics [9]. Използвани са следните примерни входни данни:

5.1.1. Зададени материални характеристики за стоманобетона на етажната плоча и стоманобетона на противотежестния блок

С цел съобразяване на физическия модел на плочата, противотежестния блок и армировката с използваните характеристики при изчисляването на дълбочината на проникване и енергията на деформациите чрез формулите (2), (3) и (4), са приети свойствата на бетона и армировката, както е показано на фиг. 6. За материал на плочата е използван CONC-35MPa, който се намира в библиотеката Explicit Materials на софтуерния продукт ANSYS, използвани при работа с модула Explicit Dynamics. Въпросният модул се използва при решаване на проблеми, свързани с динамиката на системи, подложени на големи изменения за кратко време, както е разглежданият случай.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	2500	kg m ⁻³
Specific Heat Constant Pressure, C _p	654	J kg ⁻¹ C ⁻¹
RHT Concrete Strength		
Use cap on Elastic Surface	Yes	
Compressive Strength fc	2E+07	Pa

a)

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1759,3	kg m ⁻³

б)

Фиг. 6. Характеристики на бетона:

а) на плочата; б) на противотежестния блок

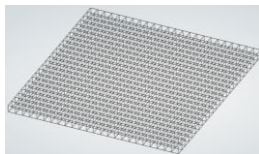
Обемната плътност на бетона и неговата якост на натиск са изменени в съответствие с приетите при използването на емпиричните формули (3) и (4) – вж. фиг. 6а. Бетонът на противотежестния блок е тип Concrete от библиотеката General Materials и

е с променена плътност, за да отговаря на зададените параметри на тялото – маса $M = 4\text{ t}$ и размери $2,32 \times 2,45 \times 0,4\text{ m}$ – вж. фиг. 6б. По-ниската плътност се дължи на наличието на отвори и изрези в тялото на блока, които не са моделирани, тъй като неговата маса и габаритни размери са единствено от съществено значение за настоящия анализ. По същата причина не е моделирана армировката в тялото на противотежестния блок.

Армировката на плочата е моделирана с материал Structural Steel от библиотеката General Materials и е разположена по следния начин, за да се запази максимална близост до заложения във формула (2) коефициент на армиране 0,003 (вж. фиг. 7):

– за Случай 1 (дебелина на плочата $d_1 = 20\text{ cm}$): горна и долна надлъжна армировка с диаметър $\varnothing 14$ през 20 cm, свързана във всички възли с напречна армировка с диаметър $\varnothing 10$;

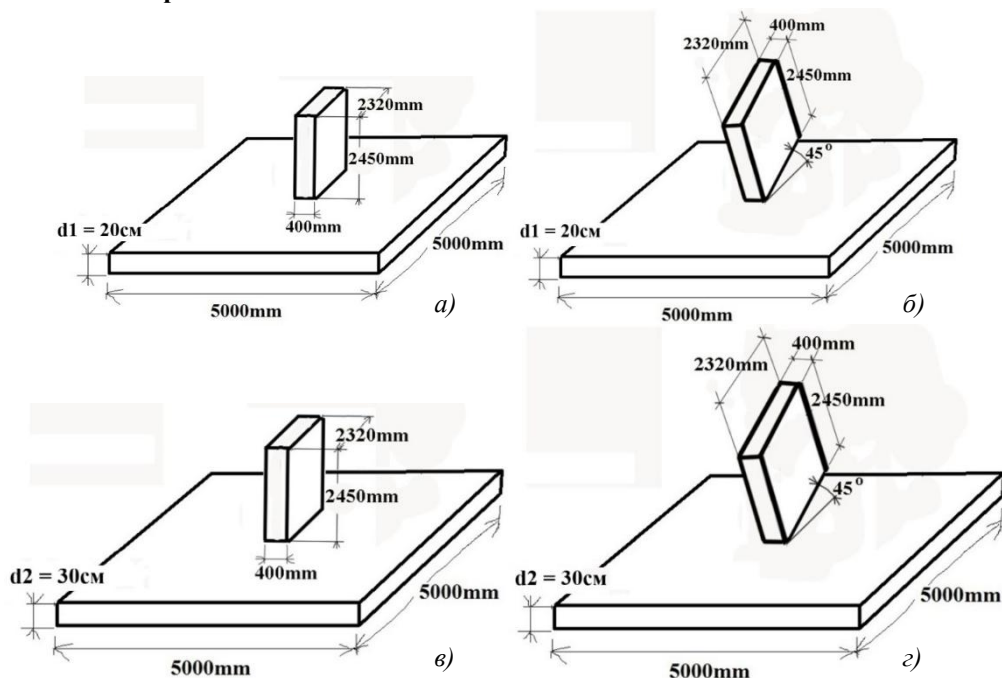
– за Случай 2 (дебелина на плочата $d_2 = 30\text{ cm}$): горна и долна надлъжна армировка с диаметър $\varnothing 16$ през 20 cm, свързана във всички възли с напречна армировка с диаметър $\varnothing 10$.



Фиг. 7. Разположение на армировката в плочата

Връзката между армировката и бетона на плочата е зададена от тип: Body Interaction > Reinforcement. Този начин на задаване е специфичен за модула Explicit Dynamics. Взаимодействието между падащото тяло и плочата се взема предвид при изчисленията след момента на контакта.

5.1.2. Начална постановка на модела в момента на контакт между противотежестния блок и етажната плоча

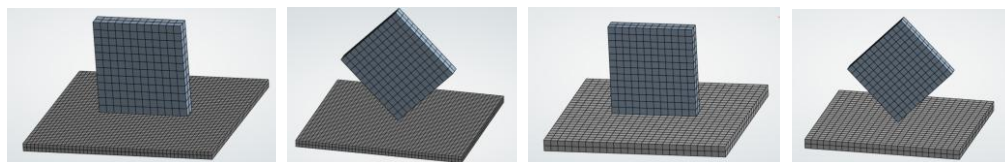


Фиг. 8. Начална постановка на модела в момента на контакта между противотежестния блок и етажната плоча:

а) вариант 1.1; б) вариант 1.2; в) вариант 2.1; г) вариант 2.2

5.1.3. Използвани мрежи

Два вида мрежи са използвани за изследването: „гъста“ и „рядка“. Крайните резултати съвпадат при двата вида, но за визуализацията им е по-подходяща „рядката“ мрежа, показана на фиг. 9 за четирите варианта.



Фиг. 9. Варианти на изследването: плоча с дебелина 20 cm при плосък удар (1.1) и удар на ръб (1.2); плоча с дебелина 30 cm при плосък удар (2.1) и удар на ръб (2.2)

5.2. Резултати от анализа

5.2.1. Деформации и крайно положение на падащото тяло спрямо плочата

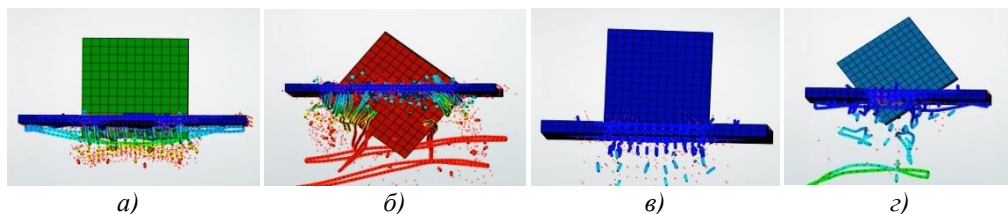
Следните резултати се получават при четирите варианта.

Вариант 1.1 (дебелина 20 cm, плосък удар): противотежестният блок пробива плочата, като има вероятност да я пробие изцяло и да пропадне на долния етаж, но съществува вероятност и армировката да възпре блока от пропадането и той да се установи в равновесие върху плочата (вж. фиг. 10a). Много е възможно резултатът да зависи и от други фактори.

Вариант 1.2 (дебелина 20 cm, удар на ръб): противотежестният блок пробива плочата, като има голяма вероятност да я пробие изцяло и да пропадне на долния етаж, застрашавайки хората и техниката, намиращи се там (вж. фиг. 10б).

Вариант 2.1 (дебелина 30 cm, плосък удар): противотежестният блок не успява да пробие изцяло плочата и след проникване до известна дълбочина в нея настъпва „връщане“ нагоре, причинено основно от армировката, и установяване на блока в равновесие (вж. фиг. 10в).

Вариант 2.2 (дебелина 30 cm, удар на ръб): противотежестният блок пробива плочата, като има малка вероятност да я пробие изцяло и да пропадне на долния етаж, застрашавайки хората и техниката, намиращи се там. По-вероятно е блокът да „заклини“ и да се установи в равновесие върху пробитата етажна плоча (вж. фиг. 10г).

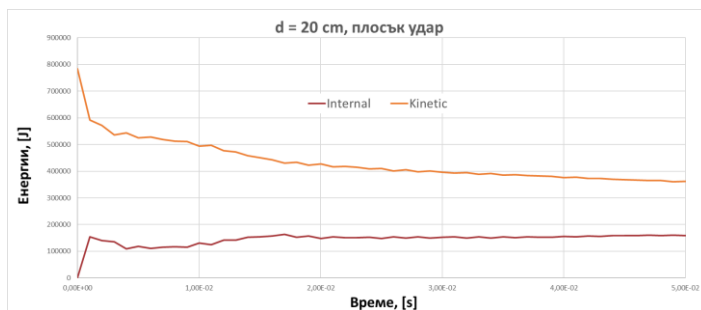


Фиг. 10. Крайно положение на телата след падането на противотежестен блок върху плоча

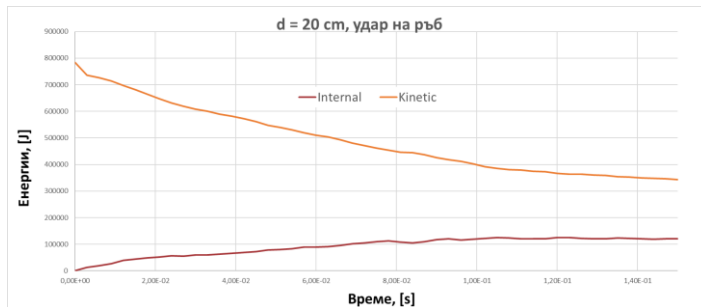
5.2.2. Изменение на енергиите и сравнение на кинетичната енергия на падащото тяло и вътрешната енергия на етажната плоча

На фиг. 11 са показани графики на изменение на енергиите при четирите варианта: кинетичната енергия на падащото тяло е обозначена като „Kinetic“, а енергията на

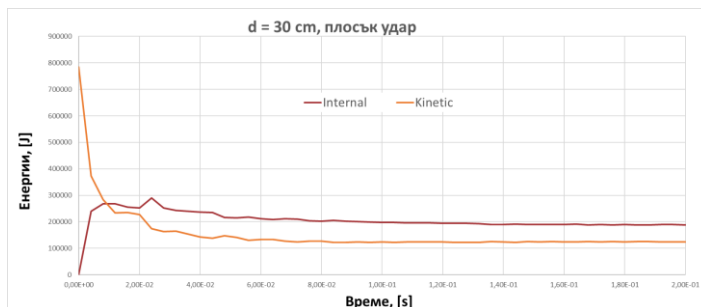
деформациите на етажната плоча е обозначена като „Internal“. Енергията на мембранните деформации е част от тази „вътрешна енергия“, като в нея влиза и енергията на деформациите в бетона, която не е отчетена във формула (2). Сравнението на резултатите, показани на фиг. 11, с тези от т. 5.2.1 показва, че при варианти 1.1, 1.2 и 2.2 кинетичната енергия на падащото тяло през цялото време надвишава енергията на деформациите на плочата, което отговаря на пробиване на плочата от падащото тяло; при това колкото по-голяма е разликата в полза на кинетичната енергия, толкова по-голяма е вероятността да се стигне до пропадане на тялото върху долния етаж. Докато при вариант 2.1 много скоро след удара кинетичната енергия на падащото тяло намалява до нива, по-ниски от тези на вътрешната енергия на плочата, което отговаря на задържане от плочата на падащото тяло. Следователно чрез проследяване на изменението на енергиите в първите части от секундата след контакта до установяването им на относително постоянни нива може да се даде оценка дали ще се осъществи пробиването на плочата или падащото тяло ще проникне в нея само до известна дълбочина, без да достигне до долния рѐб на плочата.



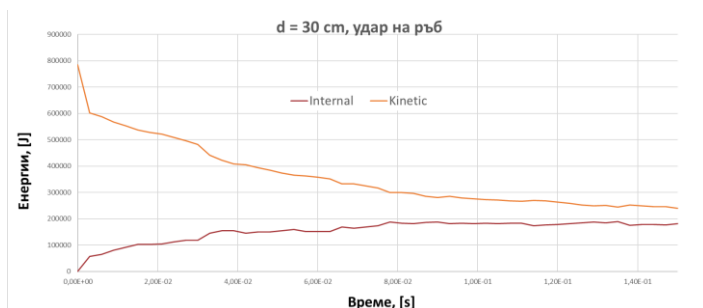
Фиг. 11а. Кинетична и вътрешна енергия при вариант 1.1



Фиг. 11б. Кинетична и вътрешна енергия при вариант 1.2



Фиг. 11в. Кинетична и вътрешна енергия при вариант 2.1



Фиг. 11г. Кинетична и вътрешна енергия при вариант 2.2

5.3. Сравнение на резултатите от числения анализ по МКЕ с тези, получени по формулите за максимална енергия на мембранните деформации и дълбочината на проникване в плочата

Сравнението на резултатите от числения анализ по МКЕ с получените от предложените в [6 – 8] формули (2), (3) и (4) показва следното:

1) Формула (2) за оценка на максималната енергия на мембранни деформации, която може да се поеме от армировката на плочата, дава представа за очакваното ниво на повреди в плочата чрез сравнение с кинетичната енергия, освободена в тялото. Необходимо е обаче да се установи: а) трябва ли и доколко е оправдано да се отчете и енергията на деформациите в бетона, когато се оценява степента на повреди в етажната плоча; и б) как се променя нивото на кинетичната енергия до момента на установяване на крайно положение на падащото тяло и плочата, за да се направи сравнение между крайните стойности на кинетичната и деформационната енергия, което е пряко свързано с оценка на повредите.

2) Формули (3) и (4) дават надеждна оценка на дълбочината на проникване на падащото тяло в етажната плоча дори и без отчитане на армировката в нея. Получените от тях резултати отговарят на тези, показани от числения анализ. Интерес представлява евентуалното включване и на армировката в тези формули.

6. Заключение

1. Предложените в литературата емпирични формули (японска и френска) за изчисляване на дълбочината на проникване на падащ обект в етажна плоча показват приемливи резултати за оценка на риска от пробиване на плочата в зависимост от нейната дебелина, без да отчитат влиянието на армировката в плочата. Тези формули вероятно могат да бъдат модифицирани, за да отчитат: а) влиянието на армировката върху дълбочината на проникване; и б) различни форми и размери на „печата“ при удара, вкл. и при удар под ъгъл, където контактната площ е равна на нула. Би могло да е подходящо по-нататъшното изследване на тези два фактора.

2. Методът за оценка на максималната енергия на мембранните деформации, която може да се поеме от армировката при удар на противотежестния блок върху етажната плоча, може да се използва за оценка на разрушителния потенциал на сблъсъка. Получените резултати обаче се нуждаят от допълнителна интерпретация с цел да се установи възможността за съпоставянето им с резултатите, които предоставя численото изследване с метода на крайните елементи. Възможно е в предложените формули да се

отчете и деформационната енергия на бетона на плочата, или при числения анализ да се отдели енергията на мембранните деформации на армировката от общата вътрешна енергия, развита в етажната плоча.

3. Най-прецизният начин за изследване и прогнозиране на разрушителния потенциал при инцидентно откъсване/падане на противотежестен блок от кулокрана е чрез подробно числено моделиране и съвременни изчислителни програми. Сравняването на кинетичната и вътрешната енергия, изчислена чрез метода на крайните елементи, може да даде добра представа за вероятността от пробив, когато крановата противотежест удари етажната плоча. Дори при груба мрежа от крайни елементи може да се получи приемлива прогноза за очакваните повреди в плочата.

4. При изпускане/падане на противотежестен блок с размери $H \times B \times d = 2,32 \times 2,45 \times 0,4$ m и маса $M = 4$ t от височина 20 m дебелината на етажната плоча може да бъде от съществено значение за вероятността от пробив в плочата. Дебелина от 20 cm най-вероятно няма да предотврати пробив, а при определени обстоятелства (удар на ръб) дори падане на противотежестния блок върху долния етаж, докато дебелина от 30 cm би могла да предотврати пробива от блока при определени обстоятелства (само при плосък или близък до плоския удар).

5. Разширяването на обхвата на формулите от литературата за оценка на максималната енергия на деформациите, които може да поеме етажна плоча при удар на падащо тяло върху нея, както и тези за изчисляване на дълбочината на проникване на падащото тяло в плочата, би могло да представлява практически интерес за бъдещи изследвания.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Radlov, K., Rinkova, E. Analiz na prichinitelite na tejkii incidenti pri osnovnite vidove kulokranove na stroitelните obekti. XII Mejdunarodna nauchna konferenciya „Proektirane I stroitelstvo na sgradi i saorajeniya“, 08 – 10 september 2022, Varna: 168 – 179, ISSN 2738-7887 (Online); ISSN 2738-7879 (CD-ROM); № 3641 v NRS.

2. <http://www.lewiscraneandhoist.com/pdfs/COMANSA-LC550.pdf>, last visited 05.09.2025.

3. https://www.kstcranes.fi/uploads/YNyQb48Z/21LC290_18t.pdf, last visited 05.09.2025.

4. Anas, S. M., Alam, M. Damage response of conventionally reinforced two-way spanning concrete slab under eccentric impacting drop weight loading. // Defence Technology, 2022, 19, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.04.011>, 2022.

5. Pham, T. M, Hao, H. Prediction of the impact force on reinforced concrete beams from a drop weight. DOI: 10.1177/1369433216649384, // Advances in Structural Engineering, 2016, sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav.

6. Khasraghy, S. G., Szczesiak, T., Zwicky, P. Reinforced Concrete Slabs Under Drop-Weight Impact Loads. 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Berlin/Potsdam, Germany, July 10 – 15, 2022, Division 05.

7. Berriaud, C., Sokolovsky, A., Guerraud, R., Dulac, J., Labrot, R. Local Behavior of Reinforced Concrete Walls Under Missile Impact. Paper J 7/9, Fourth International Conference on Structural Mechanics, Berlin, 1977.

8. Ohnuma, H., Ito, C., Nomachi, S. G. Dynamic Response and Local Rupture of Reinforced Concrete Beam and Slab Under Impact Loading. Paper J 5/3, 8-th International Conference on Structural Mechanics, Brussels, 1985.

ON THE DESTRUCTIVE POTENTIAL IN THE EVENT OF A TOWER CRANE ACCIDENT AND A COUNTERWEIGHT BLOCK FALLING FROM A GREAT HEIGHT

K. Radlov¹, D. Blagov²

Keywords: tower crane, impact force, residential building, destructive potential

ABSTRACT

The paper considers issues related to the safety assessment of tower cranes on construction sites. The focus is on the analysis of the destructive potential in the event of an accidental fall (drop) of a tower crane counterweight block from a great height in the event of an emergency. It is assumed that it falls onto an existing floor slab located below. Using mathematical formulas and a software product based on the finite element method, several different options for the possible collision of the block with the slab have been analyzed. Inferences and conclusions have been drawn, giving an idea of the destructive potential of counterweights. This would help to more adequately assess the potential existing risks on the construction site, as well as take adequate measures and improve the level of safety.

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

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