



Получена: 02.05.2023 г.

Приета: 18.07.2023 г.

ВЛИЯНИЕ НА СТЕПЕНТА НА НАТОВАРВАНЕ И УСЛОВИЯТА НА РАБОТА НА СТРОИТЕЛНАТА МЕХАНИЗАЦИЯ ВЪРХУ ЕКОЛОГИЧНИЯ ОТПЕЧАТЪК ПРИ ИЗГРАЖДАНЕТО НА СГРАДИ И СЪОРЪЖЕНИЯ

Ю. Работова-Христова¹, К. Радлов², Л. Хрисчев³, Я. Кънчева⁴, Е. Ринкова⁵

Ключови думи: строителна техника, условия на работа, разход на гориво, екологичен отпечатък, степен на натоварване

РЕЗИЮМЕ

Строителната механизация играе съществена роля за изграждането на всяка сграда или съоръжение. Ключов момент е избирането на рационален комплект машини с цел оптимизация на разхода на гориво при изпълнение на строителните процеси, както и последващото отчитане на реалната степен на екологичното въздействие върху околната среда. В настоящата статия са обобщени и анализирани съществуващи данни относно влиянието на степента на натоварване и условията на работа на строителните машини върху потреблението на гориво и произтичащите от това емисии от въглероден диоксид при изпълнението на строителните процеси. Освен влиянието на условията на работа върху нивото на вредни емисии, са разгледани също и стойностите на коефициентите на натоварване за типичната строителна техника, която се използва при изпълнението на земните работи по време на изграждането на сгради и съоръжения.

¹ Юлия Работова-Христова, докторант инж., кат. „Технология и механизация на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: y.rabotova@gmail.com

² Калин Радлов, доц. д-р инж., кат. „Технология и механизация на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kradlov@abv.com

³ Лъчезар Хрисчев, доц. д-р инж., кат. „Технология и механизация на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: l.hrishev@abv.bg

⁴ Яна Кънчева, гл. ас. инж., кат. „Приложна геодезия“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ykancheva@gmail.com

⁵ Евелина Ринкова, гл. ас. д-р инж., кат. „Технология и механизация на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046, e-mail: rtot_eva@abv.bg

1. Въведение

Тежките строителни машини с дизелови двигатели играят важна роля в изграждането и/или възстановяването на инфраструктурата на отделните държави, имат съществени експлоатационни разходи, а също и оказват значително влияние върху националното потребление на енергия под формата на дизелово гориво, което може да достигне до 38,7 % от общото потребление на дизелово гориво [1].

Данни за изработеното време, изпълнените операции и количеството изразходвано гориво от багер с маса 24,1 – 28,0 t, използвано за строителни дейности на пристанище *Norrtälje* показват, че консумираното гориво е от порядъка на 96,05 l/h [2]. Установено е, че полезният/ефективният живот на използване (т.нар. икономически живот) на тежките хидравлични багери, които се използват в Тежки заводи – Обединено кралство, е около 9 години, при интензивност на използване около 1575 машиночаса/година [3]. Това предполага огромен обем отделяни вредни емисии от един багер през време на общия експлоатационен срок.

Известно е, че при изпълнението на строителните и монтажните работи, строителните машини работят при различни условия на работа и с различна степен на натоварване [4, 5]. Докато отделяните вредни емисии от въглероден диоксид могат да бъдат определяни въз основа на разхода на гориво, посредством използване на количествени методи, много съществен момент в случая се явява правилното отчитане на коефициента на натоварване на машината (степената на натоварване) по време на изпълнение на конкретната строителна работа, тъй като от него основно ще зависи действителният разход на гориво.

Целта на изследването е въз основа на налични данни да се анализира влиянието на степената на натоварване и условията на работа на строителните машини върху потреблението на гориво и произтичащите от това емисии от въглероден диоксид, свързани с изпълнението на строителните процеси. Основният акцент в настоящата разработка е насочен към извършваните земни работи с багери.

2. Кратък обзор на някои съществуващи разработки и тенденции в тази област

Симулацията на дискретно събитие (DES) се използва като възможен подход за оценка на изразходваното гориво и отделяните емисии [6]. Едно от значителните предимства на DES в сравнение с други методи е, че моделът е в състояние да оцени потреблението на гориво от индивидуален проект за изпълнението на конкретен строителен обект.

Съществува предложен модел, даващ възможност да се оцени общото използване на гориво и въглеродният отпечатък на строителен проект, като се вземе предвид размерът, спецификите на строителната площадка и материалите на изгражданата конструкция [7]. Предложеният модел, наречен калкулатор на въглероден отпечатък за строителен проект (CFCCP), използва детайлната (уточнена) количествена сметка на проекта, за да направи прецизно изчисление на общия отпечатък. Очакваните резултати от този модел са общият въглероден отпечатък от строителния проект, който включва въглеродните емисии във вложените материали, въглеродният отпечатък от машините и въглеродният отпечатък от работната сила.

Метод за оценка на потреблението на гориво, с цел оценка на емисиите от изгорелите газове на фини частици черен въглерод (black carbon – BC) и NO_x от

тежкотоварни камиони, е приложен в [8]. Резултатите показват, че един тежкотоварен дизелов камион в САЩ при нормална работа отделя 110 kg NOx/ден и 3,70 kg фин ВС/ден през делничните дни, а емисиите намаляват със 70 – 80 % през уикендите.

Съществува предложен подход, който се основава на вида на изпълняваните строителни и монтажни работи (СМР), като се отчита темпът на строителството и респективно производителността [9]. Оценката, наречена „производителност, използване на гориво и нива на емисии“, представлява общото количество консумирано гориво и обемът на емисиите, емитирани от строителната дейност (и в крайна сметка от целия проект), въз основа на оценката на заложените количества СМР, графици за изпълнение и техническите спецификации.

При някои от изследванията се използват изкуствени невронни мрежи (ANN) при оценката на потреблението на гориво. Методологията ANN е техника за моделиране, при която се правят предвиждания за дадена величина, като се използва набор от входно-изходни данни [10]. Така например, Томпсън [11] използва ANN моделиране, за да предскаже взаимовръзката между изходящия въртящ момент на двигателя и консумацията на гориво, както и отделните емисии отработени газове от дизелови двигатели, при което се извършват също и тестове с динамометър. В друга разработка е описана методология, която се състои от поэтапни процедури, включени в разработен модел, базиран на ANN, която се използва за оценка на разход на гориво и емисии на отработени газове за градски пътища [12]. Моделът е масово използван за прогнозиране на емисиите на CO и NOx, с цел прогнозиране на качеството на въздуха на конкретно пътно кръстовище и/или конкретен магистрален път.

3. Анализ на влиянието на условията на работа и изпълняваните работни операции от машината върху потреблението на гориво и количеството на емисиите

Промяната на условията на работа и изпълняваните работни операции от машината по време на експлоатация води до изменение в потреблението на гориво и количеството на емисиите. Различни фактори, които влияят върху емисиите от двигателите на багерите, включват: теглото на превозното средство, вида на изпълняваните операции, изминатото разстояние, възрастта на машината, условията на работа и т.н. В допълнение, системите за контрол на двигателя, като например системите за синхронизация за впръскване на гориво, също могат да повлияят върху количеството на емисиите [13].

Стандартизираните подходи за оценка на емисиите от строително оборудване, които се извършват в лабораторни условия, се основават на тестване само на двигателя, но не отчитат теглото на цялото шаси. При тях се използва динамометър за оценка на натоварването на двигателя, при което се извършва оценяване на средните емисии за средно претеглена комбинация от стационарни режими [14]. Режимът включва работа на двигателя при определени постоянни обороти и/или натоварване на двигателя. Най-често срещаните тестови процедури, като тестовете с 8, 13 и 21 режима, включват множество режими. *Environmental Protection Agency* (EPA) използва предимно данни от 8-режимния тест, известен като ISO-C1, като основа за модела NONROAD. За тази тестова процедура двигателят работи при номинални обороти в минута за четири нива на въртящ момент (100, 75, 50 и 10 процента от максималния въртящ момент), на междинно ниво на обороти в минута, като по подобен начин се променя процентът на максималния въртящ момент и веднъж на празен ход [15].

Значително по-точни данни за разхода на гориво от двигателя при различните условия на работа и конкретни изпълнявани работни операции от машината могат да бъдат получена въз основа на измервания по време на реална експлоатация на машината в работни условия, при което могат да бъдат отчетени също и ефектите от шасито на машината (напр. собственото тегло на превозното средство), както и специфичните особености при конкретните изпълнявани работни операции. Полевото събиране на реални данни по време на експлоатация на багери включва в себе си отчитане на контролируеми и неконтролируеми фактори. Контролируемите фактори подлежат на предварително планиране, като по принцип включват: избор на машина, вид на изпълнявана технологична операция, място на работа и т.н. Неконтролируемите фактори включват: конкретните условия на строителната площадка, субективното поведение на оператора и т.н. Налични са извършени реални (полеви) измервания върху три багера (багер 1, багер 2 и багер 3), чиито характеристики са дадени в табл. 1 [16]. Мощностите на тези багери варират от 93 до 254 к.с., съответстващи на категориите размери на двигателя NONROAD от 76 до 100 к.с., 101 до 175 к.с. и 176 до 300 к.с., като всички те са произведени съгласно един и същ стандарт за вредни емисии (Ниво 1). Багер 1 е използван на площадка 1 за транспортиране на кофражи и рамки за бетониране на фундаментите на сграда, както и за изкопни работи при изпълнение на нулевия цикъл на сградата. Багер 2 е използван на площадка 2 за изпълнение на специални геотехнически съоръжения – земекопни и спомагателни дейности по укрепване на строителен изкоп. Багер 3 е използван на площадка 3 за товарене на насипни материали в самосвали.

Таблица 1. Характеристики, тест за емисии и информация за строителната площадка за избраните багери

| Характеристики | Багер | | |
|---|---------|-------------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Размер | Малък | Среден | Голям |
| Производител | Kobelco | Caterpillar | Komatsu |
| Модел | SK130 | 320C | PC300-7 |
| Година | 1998 | 2002 | 2001 |
| Номинална мощност на двигателя в конски сили (hp) | 93 | 138 | 254 |
| Обороти на двигателя при номинална мощност (RPM) | 2 200 | 1 900 | 1 900 |
| Обем на двигателя (Liter) | 3,9 | 6,37 | 8,27 |
| Брой цилиндри | 4 | 6 | 6 |
| Тип гориво | Дизел | Дизел | Дизел |
| Емисионен стандарт | Ниво 1 | Ниво 1 | Ниво 1 |

Резултатите от наличните изследвания включват: (1) сравнение на измерените нива на емисии на трите изследвани багера; (2) анализ на измененията в нивото на емисиите по отношение на изменението на режима на натоварване на двигателя; (3) характеризиране на ефекта от конкретни работни операции (напр. краткосрочни събития, като задвижване на кофата на багера) по време на работа върху нивата на емисиите; (4) количествено определяне на изменението на разхода на гориво и нивата на емисиите по отношение на промяната на условията на работа [16].

Таблица 2. Сравнение на осреднения специфичен разход на гориво [lтр/kW.h] и отделяните нива на емисии от трите багера по отношение на работните цикли на двигателя [16]

| Количества | Средно количество на изразходвано гориво и нива на емисии от багера | | |
|--|---|---------|---------|
| | Багер 1 | Багер 2 | Багер 3 |
| Средно количество изразходвано гориво [lтр/kW.h] | 0,45 | 0,46 | 0,47 |
| Средно количество отделян въглероден двуокис CO ₂ [g/kWh] | 0,45 | 0,50 | 0,50 |
| Средно количество отделян азотен окис NO [g/kW.h] | 0,47 | 0,53 | 0,45 |
| Средно количество отделян въглеродород HC [g/kW.h] | 0,59 | 0,61 | 0,65 |
| Средно количество отделян въглероден окис CO [g/kW.h] | 0,73 | 0,88 | 0,68 |
| Средно количество отделяни твърди частици PM [g/kW.h] | 0,37 | 0,33 | 0,35 |

Основните установени резултати от съществуващите изследвания са следните [16]:

- когато оборотите на двигателя се увеличават от приблизително 1 500 на 2 000, едновременно с това се увеличава и налягането в изпускателния колектор на двигателя (MAP), като при това: използването на гориво се увеличава от приблизително 2,3 g/s на 3,8 g/s, а нивото на емисиите на NO_x се увеличава от 0,07 g/s на 0,11 g/s.
- средно 99,8 % от въглерода в горивото се отделя като CO₂.
- между 78 % до 81 % от общото количество отделян NO_x се реализира само в рамките на 50 % от времето на работния цикъл. Това означава, че краткосрочните събития (т.е. изпълнението на отделни кратковременни работни операции) могат значително да повлияят върху средното ниво на отделяните емисии.
- средно времетраенето на всички режими на празен ход и преходни режими на багера представляват около 12 % от общото време за работа на багера, но при тях се реализира само 2 % от общия разход на гориво. Разпределението на количеството на отделяните вредни замърсители (емисии) във времето е приблизително аналогично на разпределението на изразходваното

количество гориво, с изключение на емисиите НС и СО, за които обикновено има по-голям пропорционален принос при режимите на празен ход.

- багер 1 прекарва по-голяма част (почти 85 % от времето) в режим на по-високо натоварване на двигателя (т.е. използвайки кофа) от другите два багера. Следователно там има значително по-високо налягане в изпускателния колектор на двигателя (MAP) по време на изпълнение на работните операции.

4. Определяне на коефициента на натоварване в процеса на работа при някои основни видове строителни машини

4.1. Коефициент на натоварване и разход на гориво на еднокошов багер от среден размер

Според гореизложеното следва, че има две основни значими качествени променливи, чрез които може да се идентифицира диапазон от фактори на натоварване – тип на почвата и продължителност на копаене с багера в рамките на работния ден (т.нар. „интензивност на копаене на багера“).

Таблица 3. Диапазони на коефициента на натоварване за средно голям верижен багер в зависимост от вида на почвата и продължителността на работа [18]

| Коефициент на натоварване | Тип на почвата | Продължителност на работа | Стойност на коефициента на натоварване |
|---------------------------|---|---|--|
| нисък | песъчлива почва и материал с ниска плътност | копаене през по-малко от 50 % от времето в дневния работен график | 20 % – 40 % |
| среден | глинеста почва и материал със средна плътност | копаене през 60 – 85 % от времето в дневния работен график | 40 % – 60 % |
| висок | скална почва и материал с висока плътност | копаене през 90 – 95 % от времето в дневния работен график | 60 % – 80 % |

Табл. 4 представя изчислени стойности на коефициент на натоварване в зависимост от плътността на почвата, в която се копае [16]. От представените резултати е видно, че с увеличаване на плътността на почвата се наблюдава и увеличаване на коефициента на натоварване на еднокошовия багер.

Таблица 4. Стойностите на коефициента на натоварване в зависимост от вида на почвата при еднокошов багер

| Тип на почвата | Плътност на почвата [kg/m ³] | Степен на натоварване | Коефициент на натоварване |
|---------------------------------|--|-----------------------|---------------------------|
| Хумус | 1 370 | ниска | 20 % |
| Тиня (суха) | 1 420 | ниска | 23 % |
| Глина | 1 540 | ниска | 26 % |
| Пясък – сух в насипно състояние | 1 600 | ниска | 31 % |
| Глина и чакъл – сух | 1 660 | ниска | 34 % |
| Чакъл – сух | 1 690 | ниска | 37 % |
| Глина – суха | 1 840 | средна | 40 % |
| Глина и чакъл – влажна | 1 840 | средна | 42 % |
| Пясък и тиня – сух | 1 850 | средна | 43 % |
| Чакъл – сух 6 – 50 mm | 1 900 | средна | 47 % |
| Пясък – влажен | 1 900 | средна | 48 % |
| Пясък и чакъл – сух | 1 930 | средна | 50 % |
| Скала 25 %, свързани почви 75 % | 1 960 | средна | 52 % |
| Пясък и глина | 2 020 | средна | 55 % |
| Глина – мокра | 2 080 | средна | 58 % |
| Пясък – мокър | 2 080 | средна | 60 % |
| Пясък и чакъл – мокър | 2 230 | висока | 65 % |
| Чакъл – мокър 6 – 50 mm | 2 260 | висока | 70 % |
| Скала 50 %, свързани почви 50 % | 2 280 | висока | 75 % |
| Скала 75 %, свързани почви 25 % | 2 790 | висока | 80 % |

4.2. Коефициент на натоварване и разход на гориво на малък челен товарач

Подобно на багерите, за челния товарач коефициентът на натоварване също зависи най-много от вида на разработваната почва. По този начин се получават данните, представени в табл. 5 [18].

Таблица 5. Диапазон на коефициента на натоварване за малък челен товарач в зависимост от вида на почвата и типа на повърхността

| Степен на натоварване | Тип на почвата | Тип работна повърхност | Стойност на коефициента на натоварване |
|-----------------------|---|------------------------|--|
| ниска | песъчлива почва и материал с ниска плътност | равна повърхност | 15 % – 30 % |
| средна | глинеста почва и материал със средна плътност | нормална повърхност | 25 % – 35 % |
| висока | скална почва и материал с висока плътност | неравна повърхност | 30 % – 45 % |

4.3. Коефициент на натоварване и разход на гориво на вибрационен валяк

Коефициентът на натоварване за вибрационния валяк зависи от вида на уплътняваната почва и типа на работната повърхност. По този начин се получават данните, които са представени в табл. 6 [18]. Отново е видно, че видът на почвата, както и типът на повърхността (терена), върху който работи строителната машина, оказват съществено влияние върху стойността на коефициента на натоварване на строителната машина.

Таблица 6. Диапазон на коефициента на натоварване за вибрационен валяк в зависимост от вида на почвата и вида на повърхността

| Степен на натоварване | Тип на почвата | Тип повърхност | Стойност на коефициента на натоварване |
|-----------------------|---|--------------------------------------|--|
| ниска | почвата не е уплътнена до висока плътност | равен терен, минимален наклон | 20 % – 40 % |
| средна | несвързана почва, уплътнена до средна плътност | работа върху терен с наклон над 5 % | 40 % – 60 % |
| висока | свързана почва, плътна и с високо съдържание на влага | работа върху терен с наклон над 15 % | 60 % – 100 % |

5. Заключение

Повечето специалисти в строителството много често пренебрегват проблема с енергийната ефективност на строителната механизация и нейното въздействие върху околната среда. Трябва да се има предвид, че това е важен аспект, на който би трябвало да се обръща нужното внимание, особено в случаите, когато се извършва и оценка на екологичните въздействия от използването на различни типове механизация. Разработването на модел за оценка на изразходването от строителната машина гориво въз основа на производителността на машината може да спомогне при прогнозиране и оценка на енергийното въздействие на даден строителен проект.

В разработката са обобщени и анализирани налични данни относно влиянието на коефициентите на натоварване и условията на работа на строителните машини върху потреблението на гориво и произтичащите от това емисии от въглероден диоксид по време на изпълнението на строителните процеси. Извършеният анализ показва, че потреблението на гориво се явява в правопропорционална зависимост от степента (нивото) на натоварване на двигателя на машината. Също така, много съществено влияние върху потреблението на гориво и количеството на отделяните вредни емисии оказват условията на работа на машината, режимът на работа и видът на изпълняваните работни операции по време на експлоатация.

Благодарности

Членовете на научния екип по договор Д-141/2021 г. изказват своята благодарност на Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ за финансовата подкрепа.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)*. Indonesia Energy Outlook. Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi, 2015.
2. *Evers A.*, Data collection for management of fuel consumption in vehicles and machinery. A study on the challenges and strategic possibilities in the construction industry. Master of Science Thesis. Industrial Ecology, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2017.
3. *Davis Langdon and Everest*. Cenova kniga na Spon's Civil Engineering & Highway Works, 1997, Publisher: Spanish Professionals in Amer, ISBN 0419222006.
4. *Petkov, J.* Tehnologija na stroitelnite procesi. Tehnika, 1989.
5. *Radlov, K., Ivanov, G.* Stroitelni mashini I mehanizacia. Propeler, 2022, ISBN 978-954-392-681-7.
6. *Ahn, C., Pan, W., Lee, S., Pena-Mora, F.* Enhanced Estimation of Air Emissions from Construction Operations based on Discrete Event Simulation // International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Nottingham, UK, 2010.
7. *Ammouri, A. H., Srour, I., Hamade, R. F.* Carbon Footprint Calculator for Construction Projects (CFCCP). // The Advances in Sustainable Manufacturing – 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Berlin-Heidelberg, Germany, 2011.
8. *Dreher, H. C., Harley, R. A.* A Fuel-based Inventory for Heavy Duty Diesel Truck Emissions. // Journal of The Air and Waste Management Association, 1998, 48 (4): 352-358.
9. *Rasdorf, W., Frey, C., Lewis, P., Kim, K., Pang, S., Abolhassani, S.* Field procedures for real-world measurements of emissions from diesel construction vehicles. // Journal of Infrastructure Systems, 2010, 16(3): 216-225.
10. *Ok, S. C., Sinha, S. K.* Construction Equipment Productivity Estimation Using Artificial Neural Network Model. // Construction Management and Economics, 2006, 24 (10): 1029-1044.
11. *Thompson, G. J., Atkinson, C. M., Clark, N., Long, T. W., Hanzevack, E.* Neural Network Modelling of the Emissions and Performance of a Heavy Duty Diesel Engine. // Journal of Automobile Engineering, 2000, 214 (2): 111-126.
12. *Nagendra, S., Khare, M.* Artificial Neural Network Approach for Modelling Nitrogen Dioxide Dispersion from Vehicular Exhaust Emissions. // Ecological Modelling, 2006, 190 (1-2): 99-115.
13. *Nigel, N. C., Kern, J. M., Atkinson, C. M., Nine, R. D.* Factors Affecting Heavy-Duty Diesel Vehicle Emissions. // Journal of the Air and Waste Management Association, 2002, 5(52): 84-94.
14. Code of Federal Regulations, Title 40: Part 89, Subpart E, Appendix B, Table 1, accessed at: http://arb.ca.gov/bluebook/bb06/t40/t_40_udhead523.htm, on January 27, 2008.
15. *Nunnally, S. W.* Construction Methods and Management. Prentice-Hall, Second Edition, Englewood Cliffs. New Jersey, 1987.
16. *Abolhasani, S., Frey, C., Kim, K., Pang, S., Rasdorf, W., Lewis, P.* Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: a case study for excavators. // Journal of the Air & Waste Management Association, 1995, 58(8): 1033-46.

17. Trani, M., Bossi, B., Gangolells, M., Casals, M. Predicting fuel energy consumption during earthworks. // Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3798-3809.

18. Caterpillar, Narachnik za efektivnost na Caterpillar, Published by: Caterpillar Inc., Peoria, Illinois, USA, 2013.

INFLUENCE OF THE DEGREE OF LOADING AND THE OPERATING CONDITIONS OF THE CONSTRUCTION MACHINES ON THE ECOLOGICAL FOOTPRINT IN THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND FACILITIES

Y. Rabotova-Hristova¹, K. Radlov², L. Hrishev³, Y. Kancheva⁴, E. Rinkova⁵

***Keywords:** construction machinery, working conditions, fuel consumption, ecological footprint, load level*

ABSTRACT

Construction machinery plays an essential role in the construction of any building or facility. A key point is the selection of a rational set of machines in order to optimize construction processes, as well as the subsequent consideration of the real degree of ecological impact on the environment. The present paper examines the impact of the load level and operating conditions of construction machinery on fuel consumption and the resulting carbon dioxide emissions due to the execution of construction processes. The influence of the working conditions on the level of emissions, as well as the values of the load factors for the typical construction equipment which is used in the execution of earthworks during the construction of buildings and facilities, are analyzed.

¹ Yuliya Rabotova-Hristova, Eng. PhD Student, Dept. "Construction Technology and Mechanization", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: y.rabotova@gmail.com

² Kalin Radlov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Construction Technology and Mechanization", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kradlov@abv.bg

³ Lachezar Hrishev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Construction Technology and Mechanization", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: l.hrishev@abv.bg

⁴ Yana Kancheva, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Applied Geodesy", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ykancheva@gmail.com

⁵ Evelina Rinkova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Construction Technology and Mechanization", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: rtot_eva@abv.bg