УДК 539.3 DOI: 10.33744/2308-6645-2020-2-47-003-009
UDC 539.3

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЙ КРИВОЛІНІЙНИХ СВЕРДЛОВИН МЕТОДАМИ ЛІНІЙНОГО ТА НЕЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Андрусенко О.М., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, a.andrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9986-5888

OPTIMIZATION OF THE CURVILINEAR BOREHOLE TRAJECTORIES BY THE METHODS OF LINEAR AND NONLINEAR PROGRAMMING

Andrusenko E.N., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, a.andrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9986-5888

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СКВАЖИН МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНОГО И НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Андрусенко Е.Н., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, a.andrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9986-5888

Постановка проблеми.

В даний час методи оптимального проектування систем і виробничих процесів починають займати домінуюче положення в суспільстві, насамперед у зв'язку з обмеженістю і вичерпністю природних і матеріальних ресурсів, необхідністю жорсткої економії енергії і зростання народонаселення. Внаслідок цього відбувається зростання інтересу до прикладних екстремальних задач (тобто задач визначення найбільших і найменших значень, оптимальних умов протікання процесів тощо). Слід підкреслити, що подібні завдання зустрічалися і в історії людства в тому чи іншому вигляді. Екстремальні задачі були предметом досліджень М. Кеплера, П. Ферма, Х. Гюйгенса, В. Ньютона, В. Бернуллі, Ж. Лагранжа, Л. Ейлера, К. Вейєрштрасса та інших. Узагальнення результатів дозволило розробити теорії лінійного і нелінійного програмування, динамічного програмування та оптимального управління. В рамках цього напрямку в 50-ті роки минулого століття були створені метод динамічного програмування Р. Беллмана і принцип максимуму Л. Понтрягіна.

На їх основі створюються прикладні алгоритми та комп'ютерні програми для побудови оптимальних траєкторій польоту в космічній та авіаційній техніці, на транспорті, у багатьох технологічних процесах і в економіці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Застосування методів теорії оптимального проектування й керування може забезпечити суттєві переваги при оптимальному трасуванні траєкторій нафтових і газових свердловин. В даний час ми є свідками того, які складні проблеми виникають у нафтогазовій промисловості у зв'язку з питаннями видобутку і перерозподілу нафтогазових ресурсів. Вони багато в чому загострюються через те, що намітилося їх вичерпання та ускладненням умов їх видобутку. Зараз, як правило, буріння свердловин відбувається на великих глибинах і при граничних значеннях швидкостей, гідростатичних тисків і температур, а також параметрів міцності та зношування матеріалів бурильних колон під істотним впливом фрикційних явищ, ефектів інтенсивних коливань і нестійкості всієї системи. При цьому на ефективність процесу буріння і подальшу продуктивність свердловини, а також ризики виникнення нештатних і аварійних ситуацій більший вплив має геометричний обрис траєкторії свердловини, який в свою чергу, залежить від структури нафтогазового родовища, і примикаючих геологічних порід, а також їх механічних властивостей.

Траєкторія свердловини, а в зв'язку з цим і трудовитрати на її проходку, довжина і вартість значною мірою визначаються взаємним розташуванням бурильної установки і нафтогазоносного резервуара. Тому координати цієї установки на поверхні землі або моря, тобто параметри її позиціонування, можуть бути одними з керуючих параметрів у проблемі оптимізації траєкторії.

Ефективність відбору вуглеводневого палива залежить від структури родовища. Якщо воно володіє низькою пористістю, а внаслідок цього, низькою гідравлічною або газовою проникністю і обмеженою мобільністю, до того ж воно складається з кількох слабко пов'язаних, нахилених під різними кутами ділянок малої товщини, то координати вибійного сектора свердловини кути нахилу також можуть бути обрані в якості керуючих змінних.

На траєкторію свердловини може впливати фактор анізотропії і тріщинуватості породи, що містить нафту або газ, оскільки в цілях збільшення їх відбору, бажано, щоб свердловина була перпендикулярною площинам, що містять ці тріщини.

Напрямок проходки свердловини може також залежати від міцності і твердості породи, її анізотропії і гідрологічних властивостей на ділянках, що примикають до нафто-газоносних зон. У цих випадках при бурінні свердловини бажано уникати її проходження через зони підвищеної твердості і міцності. Така вимога призводить до поділу геологічного середовища на дозволені і заборонені зони, а при постановці задачі оптимального керування – до обмежень на фазові змінні у вигляді рівностей і нерівностей. Різноманітні аспекти цих особливостей відображені в монографії [6].

І нарешті, важливо, щоб при бурінні і закінчуванні свердловини бурильна колона і обсадна труба відчували якомога менші згинні деформації, що підвищують сили контактної та фрикційної взаємодії між колонами і стінкою свердловини, збільшують енергетичні втрати при бурінні і сприяють виникненню ефектів прихоплення. Для зниження ризиків, пов'язаних з цими ефектами, траєкторія свердловини повинна мати якомога меншу викривленність і в якості функціонала вартості використовувати інтеграл від функції кривини, а саму цю функцію застосувати як керуючу змінну.

Відмінні особливості, які супроводжують процеси буріння та видобування вуглеводневих палив, пов'язані з ними ризики прояву негативних ефектів, і прагнення підвищити ефективність вилучення вуглеводневих палив привели до необхідності буріння свердловин різних конфігурацій, серед яких можна виділити вертикальні, похило спрямовані (2D і 3D криволінійні), горизонтальні (з великими віддаленнями від бурильної установки) і розгалужуються. Їх проектування і оптимізація здійснюється на основі досвіду і кваліфікації проектувальника, тому очевидно, що у зв'язку з багатопараметричністю таких постановок і їх складністю, ці проекти можуть виявитися далекими від оптимальних.

В найбільшій мірі це може проявлятися при бурінні тривимірних і розгалужених свердловин в масивах зі складною геологічною структурою.

Застосування для цих цілей методів теорії оптимального проектування й керування [3, 5, 11] дозволяє будувати траєкторії свердловин меншої довжини, що володіють більшою гладкістю і меншою вартістю.

У даній роботі на основі методів диференціальної геометрії вперше запропоновано нелінійні математичні моделі керованого трасування траєкторій свердловин у формі двухточкових і багатоточкових крайових задач; розроблено алгоритми їх розв'язання, засновані на використанні покрокового методу ортогонального проектування цільового функціонала на площині лінеаризованих обмежень в дискретної [1, 2, 4, 8, 10] і континуальної [5, 7, 12] постановках; розв'язано прикладні задачі; проведено їх аналіз.

1. Оптимізація методом лінійного програмування

Якщо геометрія траєкторії свердловини близька до оптимальної, то задачу її оптимізації можна спростити лінеаризируя її в околі розглянутого стану і застосувати методи лінійного програмування.

До цього типу задач належать ті задачі математичного програмування, у яких цільова функція та обмеження лінійні.

Вона формулюється наступним чином. Знайти мінімум функціоналу

$$\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \to \min \tag{1.1}$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq b_i \tag{1.2}$$

і умовах

$$x_1 \geq 0,\ x_2 \geq 0, \dots,\ x_n \geq 0 \tag{1.3}$$

Тут в якості допустимих керувань виступають компоненти $x_1, x_2, \ldots, x_n$ n-вимірного вектора, що задовольняє умовам (1.2) і (1.3).

Так як кожна з цих нерівностей являє півпростір, то область U, що відсікається цими гіперплощинами, являє собою опуклий многогранник. Нагадаємо, що многогранник називається опуклим, якщо відрізок, що з'єднує будь-які дві його внутрішні точки, цілком знаходиться всередині многогранника. Потрібно знайти мінімум лінійної функції (1.1) на цьому многограннику U.

Для ілюстрації геометричної моделі пошуку мінімуму функціоналу (1.1) врахуємо, що при кожному фіксованому значенні a рівняння

$$\Phi(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j = a \tag{1.4}$$

являє собою гіперплощину в n-вимірному просторі. Тоді задача оптимізації полягає в пошуку мінімального a, при якому задовольняються всі співвідношення (1.2) і (1.3). Це означає, що необхідно переміщати площину (1.4) паралельно самій собі так, щоб

1) значення a при цьому зменшувалися,

2) у многогранника U і площини (1.4) залишалася хоча б одна спільна точка (вершина), загальна гіперпряма (ребро) або гіперплощина (грань) многогранника U і площини (1.4).

Кінцеве значення a, при якому умова 2) буде виконуватися тільки для одного з перерахованих елементів многогранника U і буде оптимальним.

На практиці широко використовується симплексний метод розв'язування задач лінійного програмування – це процес спрямованого розв'язання системи рівнянь по крокам (рис. 1), який починається з деякого опорного розв'язку (вершини A опуклого многогранника) і в пошуках кращого розв'язку рухається вздовж ребра AB многогранника, яке виходить з вершини A, що поліпшує значення цільової функції.

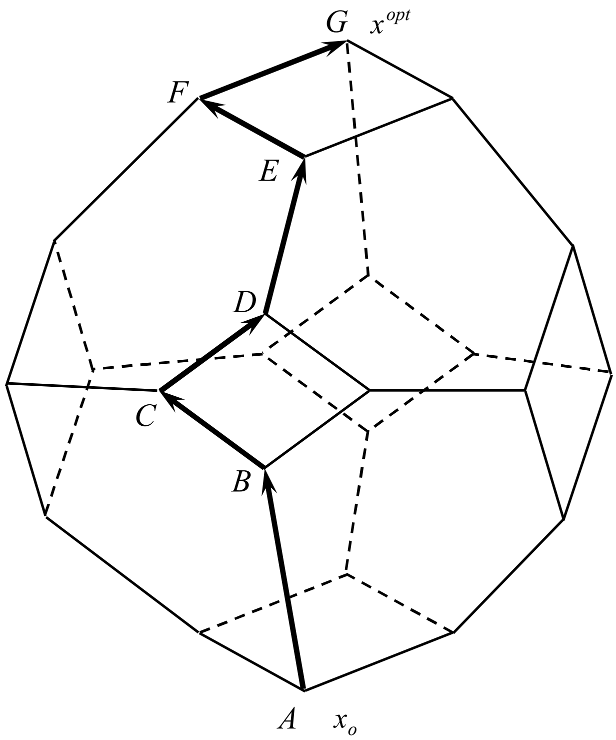

Рисунок 1 – Схема оптимізуючого переміщення вздовж ребер многогранника
Figure 1 – Scheme of optimizing movement along the edges of the polyhedron

Причому з системи (3), (4) вибираються нерівності, що дозволяють потім сформувати з них систему рівнянь, розв'язок якої визначає вершину з меншим значенням функції $\Phi(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. За допомогою такого алгоритму перехід з вершини A в вершину B, поліпшує стан системи, здійснюється лише за один крок.

Виконуючи такі аналогічні кроки оптимізуючих переходів уздовж ребер до сусідніх вершин по ламаній траєкторії *A-B-C-D-E-F-G*, можна прийти в вершину *G*, в якій не знайдеться ребра, що понижує функцію Φ . В цьому випадку, оскільки многогранник *U* є опуклим, вершина *G* буде точкою мінімуму (оптимуму) задачі (1) – (3). Важливо відзначити, що оптимізаційний пошук при цьому завершився за кінцеве число кроків. Цей метод може застосовуватися для оптимізації траєкторій свердловин найпростіших обрисів.

2. Оптимізація в задачах варіаційного числення.

У найпростіших випадках оптимізація траєкторії свердловини може бути виконана методами варіаційного числення.

Теорія оптимального керування – це розділ прикладної математики, в якому вивчаються способи формалізації та методи розв'язання задач про вибір найкращого способу здійснення динамічного процесу. Цей процес може бути описаний за допомогою диференціальних рівнянь, залежать від системи функцій або параметрів, що називаються керуваннями і підлягають визначенню. Шукані керування, а також реалізація самого процесу слід в загальному випадку вибирати з урахуванням обмежень, установлених постановкою задачі.

Задачі, що розглядаються в теорії оптимального керування, виникли з практичних потреб, насамперед, в області механіки космічного польоту і теорії автоматичного керування. Формалізація та розв'язання цих задач поставили нові питання в теорії диференціальних рівнянь і у варіаційному численні. Воно присвячено дослідженню методів відшукання екстремумів функціоналів, що залежать від вибору однієї або декількох функцій при різного роду обмеження (фазових, диференціальних, інтегральних тощо), але без урахування керуючих впливів.

Зазвичай задачі варіаційного числення описуються за наступною схемою. Потрібно мінімізувати функціонал

$$\Phi(x)=\int_{t_0}^{t_1} f\big(\dot{x}(t),x(t),t\big)dt \to \min, \tag{2.1}$$

де $x=[x_1,x_2,\ldots,x_n]^*$, $t_0 \le t \le t$, крапкою позначено диференціювання за змінною t, f - m-мірна диференційовна функція, при додаткових обмеженнях типу рівностей

$$\psi\big(\dot{x}(t),x(t),t\big)=0 \tag{2.2}$$

і деяких крайових умовах.

Тут ψ - m-мірний вектор-функція.

Задача мінімізації інтеграла (2.1) називається задачею Лагранжа. Крім неї розглядають також задачу Майєра

$$\Phi(x)=g\big(t_0,x(t_0),t_1,x(t_1)\big) \tag{2.3}$$

при відповідних обмеженнях.

Ці дві задачі включає задача Больца, для якої

$$\Phi(x)=\int_{t_0}^{t_1} f\big(\dot{x}(t),x(t),t\big)dt + g\big(t_0,x(t_0),t_1,x(t_1)\big), \tag{2.4}$$

з відповідними обмеженнями.

Особливістю задачі Больца є змішаний характер функціоналу, який являє собою суму інтегрального функціоналу і значень функцій $\dot{x}(t), x(t)$ на кінцях.З принципової точки зору задача Больца еквівалентна задачі Лагранжа і приводиться до неї за допомогою спеціальних перетворень.

Найбільш прості випадки в задачах варіаційного керування виникають, коли функціонал (2.1) є одновимірним, обмеження відсутні, а граничні умови фіксовані:

$$\Phi(x)=\int_{t_0}^{t_1} L\big(\dot{x}(t),x(t),t\big)dt \to \min,\ x(t_0)=x_0,\ x(t_1)=x_1 \tag{2.5}$$

З цією задачею зазвичай пов'язують початок класичного варіаційного числення. Його теоретичні основи були закладені Л. Ейлером (L. Euler) і Ж. Лагранжем (J. Lagrange). Ними були розкриті зв'язки варіаційного числення з механікою, фізикою і геометрією. На першому етапі розвитку теорії варіаційного числення зусиллями в основному Г. Лейбніца (G. Leibniz) і Я. і І.

Бернуллі (Jacob et Johann Bernoulli) отримали розв'язки багато конкретних задач (про брахістохрона, про геодезичну).

Мабуть, найбільш привабливою і ілюстративною задачею в теорії побудови оптимальних траєкторій є задача про геодезичну або задача про побудову найкоротших і прямих кривих на поверхнях. Важлива властивість цієї кривої полягає в тому, що вона є обов'язково найкоротшою для двох найближчих точок на цій кривій, але не обов'язково найкоротшою для двох її крайніх (початковою і кінцевою) точок.

Висновки.

В роботі запропонована методика оптимізації геометрії траєкторії нафтової або газової свердловини із застосуванням методів теорії оптимального керування. Розглянуто випадки формулювання задач Лагранжа, Майєра і Больца при різних (лінійних і нелінійних) обмеженнях призначення фазових змінних і керуючих функцій.

Розглянуто простий випадок, коли початковий обрис траєкторії близький до оптимального, тоді після лінеаризації вихідних рівнянь моделі задачі оптимізаціонного пошуку може бути зведена до задачі лінійного програмування, і для її розв’язку використаний симплекс-метод.

У загальному випадку, коли цільова функція і обмеження є нелінійними, формулюється задача теорії оптимального керування. Для її розв’язання може бути використаний покроковий метод проекції градієнта цільової функції на лінеаризовані обмеження. За допомогою спеціальних прийомів для побудованих моделей можуть бути застосовані також методи варіаційного числення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Avriel, Mordecai (2003). Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Dover Publishing.
2. Bertsekas, Dimitri P. (2016). Nonlinear Programming (Third ed.). Cambridge, Massachussets.: Athena Scientific.
3. Betts, J.T. (2016). Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming (2nd ed.). Philadelphia, Pennsylvania: SIAM Press.
4. David M. Himmelblau (1972). Applied Nonlinear Programming. The University of Texas, Austin, Texas. Mc Graw-Hill Book Company.
5. Gulyayev, V.I., Bazhenov, V.A., Koshkin, V.L. (1988) Optimal Control of Mechanical Systems Motion. UMK VO, Kyiv (in Russian).
6. Gulyayev, V., Glazunov, S., Glushakova, O., Vashchilina, E., Shevchuk, L., Shlyun, N., Andrusenko, E. (2019) Modelling Emergency Situations in the Drilling of Deep Boreholes. Cambridge Scholars Publishing.
7. Jan Brinkhuis and Vladimir Tikhomirov (2005) Optimization: Insights and Applications, Princeton University Press.
8. Luenberger, David G.; Ye, Yinyu (2008). Linear and Nonlinear Programming. International Series in Operations Research & Management Science. 116 (Third ed.) New York: Springer.
9. Mokhtar S.Bazaraa (2013). Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. (3 ed). Wiley Publishing.
10. Richard E. Bellman. (2010) Dynamic Programming. Princeton Landmarks in Mathematics, Princeton.
11. Ross, I.M. (2009). A Primer on Pontryagin’s Principle in Optimal Control. Collegiate Publisher.
12. Ruszczynski, Andrze (2006). Nonlinear Optimization. Princeton, NJ: Princeton University Press.

REFERENCES

1. Avriel, Mordecai (2003). Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Dover Publishing.
2. Bertsekas, Dimitri P. (2016). Nonlinear Programming (Third ed.). Cambridge, Massachussets.: Athena Scientific.
3. Betts, J.T. (2016). Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming (2nd ed.). Philadelphia, Pennsylvania: SIAM Press.
4. David M. Himmelblau (1972). Applied Nonlinear Programming. The University of Texas, Austin, Texas. Mc Graw-Hill Book Company.
5. Gulyayev, V.I., Bazhenov, V.A., Koshkin, V.L. (1988) Optimal Control of Mechanical Systems Motion. UMK VO, Kyiv (in Russian).

6. Gulyayev, V., Glazunov, S., Glushakova, O., Vashchilina, E., Shevchuk, L., Shlyun, N., Andrusenko, E. (2019) Modelling Emergency Situations in the Drilling of Deep Boreholes. Cambridge Scholars Publishing.

7. Jan Brinkhuis and Vladimir Tikhomirov (2005) Optimization: Insights and Applications, Princeton University Press.

8. Luenberger, David G.; Ye, Yinyu (2008). Linear and Nonlinear Programming. International Series in Operations Research & Management Science. 116 (Third ed.) New York: Springer.

9. Mokhtar S.Bazaraa (2013). Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. (3 ed). Wiley Publishing.

10. Richard E. Bellman. (2010) Dynamic Programming. Princeton Landmarks in Mathematics, Princeton.

11. Ross, I.M. (2009). A Primer on Pontryagin's Principle in Optimal Control. Collegiate Publisher.

12. Ruszczynski, Andrze (2006). Nonlinear Optimization. Princeton, NJ: Princeton University Press.

РЕФЕРАТ

Андрусенко О.М. Мінімізація вартості нафтових і газових свердловин методами лінійного та нелінійного програмування / О.М. Андрусенко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2020. – Вип. 2 (47).

Поставлено задачу про побудову оптимальних траєкторій нафтових і газових свердловин методами лінійного та нелінійного програмування, а також теорії оптимального керування.

Об'єкт дослідження – геометрія осьової лінії глибоких похило-скерованих, горизонтальних і розгалужених траєкторій нафтових і газових свердловин.

Мета роботи полягає в побудові оптимальної траєкторії нафтової або газової свердловини, що забезпечує її мінімальну вартість, мінімальну довжину і мінімальні значення параметрів її будівництва.

Розроблено методику оптимізації геометрії траєкторії нафтової або газової свердловини із застосуванням методів теорії оптимального керування. Розглянуто випадки формулювання задач Лагранжа, Майєра і Больца при різних (лінійних і нелінійних) обмеженнях призначення фазових змінних і керуючих функцій.

Розглянуто простий випадок, коли початковий обрис траєкторії близький до оптимального, тоді після лінеаризації вихідних рівнянь моделі задача опімізаціонного пошуку може бути зведена до задачі лінійного програмування, і для її розв'язку використаний симплекс-метод.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАФТОВА І ГАЗОВА СВЕРДЛОВИНА, МІНІМАЛЬНА ВАРТІСТЬ, МІНІМАЛЬНА ДОВЖИНА, ТЕОРІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ.

ABSTRACT

Andrusenko E.N. Minimization of the cost of oil and gas borehole by the methods of linear and nonlinear programming. Visnyk National Transport University. Series «Economical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2020. – Issue 2 (47).

The task is posed of constructing optimal trajectories of oil and gas wells by linear and nonlinear programming methods, as well as the theory of optimal control.

The object of study is the geometry of the axial line of deep directional, horizontal and branching trajectories of oil and gas wells.

The purpose of the work is to build the optimal trajectory of an oil or gas well, ensuring its minimum cost, minimum length and minimum values of its construction parameters.

A technique was developed for optimizing the geometry of the trajectory of an oil or gas well using the methods of optimal control theory. Cases of the formulation of the Lagrange, Mayer, and Boltz problems are considered under various (linear and nonlinear) constraints on the values of phase variables and control functions.

The simplest case is considered when the initial outline of the trajectory is close to optimal, then after linearizing the initial equations of the model, the optimization search problem can be reduced to a linear programming problem, and the simplex method is used to solve it.

KEYWORDS: OIL AND GAS WELL, MINIMUM COST, MINIMUM LENGTH, THE OPTIMIZATION THEORY.

РЕФЕРАТ

Андрусенко Е.Н. Минимизация стоимости нефтяных и газовых скважин методами линейного и нелинейного программирования / Е.Н. Андрусенко // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Экономические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2020. – Вып. 2 (47).

Поставлена задача о постороении оптимальных траекторий нефтяных и газовых скважин методами линейного и нелинейного программирования, а также теории оптимального управления.

Объект исследования – геометрия осевой линии глубоких наклонно-направленных, горизонтальных и разветвляющихся траекторий нефтяных и газовых скважин.

Цель работы заключается в построении оптимальной траектории нефтяной или газовой скважины, обеспечивающей её минимальную длину, минимальную стоимость и минимальные значения параметров её строительства.

Разработана методика оптимизации геометрии траектории нефтяной или газовой скважины с применением методов теории оптимального управления. Рассмотрены случаи формулировки задач Лагранжа, Майера и Больца при различных (линейных и нелинейных) ограничениях назначения фазовых переменных и управляющих функций.

Рассмотрен простейший случай, когда начальное очертание траектории близко к оптимальному, тогда после линеаризации исходных уравнений модели задача опимизационного поиска может быть сведена к задаче линейного программирования, и для её решения использован симплекс-метод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НЕФТЯНАЯ И ГАЗОВАЯ СКВАЖИНА, МИНИМАЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ, МИНИМАЛЬНАЯ ДЛИНА, ТЕОРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ.

АВТОР:

Андрусенко Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри вищої математики, e-mail: a.andrusenko@gmail.com, тел. +380672981387, Україна, 01010, м. Київ, вул. Бойчука 42, к. 511, orcid.org/0000-0001-9986-5888.

AUTHOR:

Andrusenko Elena Nikolaevna, Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor department of high mathematics, e-mail: a.andrusenko@gmail.com , tel. +380672981387, Ukraine, 01010, Kiev, Boichuka str. 42, of. 511, orcid.org/0000-0001-9986-5888.

АВТОР:

Андрусенко Елена Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры высшей математики, e-mail: a.andrusenko@gmail.com, тел. +380672981387, Украина, 01010, г. Киев, ул. Бойчука 42, к. 511, orcid.org/0000-0001-9986-5888.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Мозговий В.В., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Київ, Україна.

REVIEWER:

Gaidaichuk V.V., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Mozgovyi, Ph.D., Ph.D., Doctor of Technical Sciences (Dr), professor, National Transport University, Head of Department of Road Construction Materials and Chemistry , Kyiv, Ukraine.