

**Жекеев Самат Омарович\*<sup>1</sup>**

техника және технологиялар магистрі,  
Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,  
Ақтөбе, Қазақстан, [szhekeyev@zhubanov.edu.kz](mailto:szhekeyev@zhubanov.edu.kz), ORCID ID: 0000-0002-8915-9469

**Рыскулов Бегим Канатбаевич<sup>2</sup>**

аға оқытушы,  
Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,  
Ақтөбе, Қазақстан, [begim.ryskulov@bk.ru](mailto:begim.ryskulov@bk.ru), ORCID ID: 0009-0008-1988-5909

**Исакулов Абилхаир Баизаковия<sup>3</sup>**

PhD,  
Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті,  
Ақтөбе, Қазақстан, [abulik92@mail.ru](mailto:abulik92@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-2462-6185

**КОМПЛЕКСТІ ТҰРАҚТАНДЫРУ ЖӘНЕ ТОПЫРАҚТЫ НЫҒАЙТУ**

**Аңдатпа.** Топырақты тұрақтандыру және нығайту органикалық немесе минералды модификатор-қоспаларды, кешенді қоспаларды енгізу арқылы жүзеге асады және бұл процесс топыраққа термиялық немесе механикалық әсер етумен қатар жүруі мүмкін. Гидравликалық және пуццоландық қасиеттер көрсететін ұнтақталған металлургиялық шлактарды қолдану ерекше қызығушылық тудырады.

Зерттеудің мақсаты – зерттелетін үлгілерге механикалық әсер ету барысында сөндірілмеген әк пен ұнтақталған шлаққа негізделген кешенді минералды қоспаны енгізу арқылы модификацияланған топырақтың қасиеттерін зерттеу болды. Эксперимент математикалық жоспарлау әдістеріне және алынған нәтижелердің маңыздылығын коэффициенттер арқылы тексеріп, модельдердің барабарлығын бағалайтын статистикалық өңдеу тәсілдеріне негізделді. Алынған модельдер көп айнымалы функцияларды математикалық талдау әдістерін қолдану арқылы зерттелді. Вариацияланатын факторлар ретінде сөндірілмеген әктің шығыны, ұнтақталған шлақтың шығыны, ұнтақталған шлақтың меншікті беті, сондай-ақ тығыздау қысымы қабылданды.

Жауап функциялары ретінде модификацияланған топырақтың қалыпты жағдайларда 28 тәуліктік қату жасындағы беріктігі және оның орташа тығыздығы алынды.

Зерттеулер көрсеткендей, сөндірілмеген әк пен ұнтақталған шлақты енгізу, әсіресе катудың ерте кезеңдерінде механикалық әсер ету жағдайында, топырақтың пайдалану сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік береді.

Ұнтақталған домна гранулданған шлақтың оңтайлы шығыны мен оның меншікті бетінің мәндері анықталды:  $363 \pm 18$  кг/м<sup>3</sup> және  $383 \pm 10$  м<sup>2</sup>/кг сәйкесінше.

Сөндірілмеген әктің шығыны мен тығыздау қысымына байланысты топырақтың беріктігі мен тығыздығының оңтайландырылған тәуелділіктері алынды, олардың графикалық интерпретациясы жасалды және компьютерлік есептік бағдарлама үшін алгоритм әзірленді.

**Кілт сөздер.** топырақ, тұрақтандыру, саздақ, сөндірілмеген әк, ұнтақталған шлақ, топырақты тығыздау.

**Жекеев Самат Омарович\*<sup>1</sup>**

магистр техники и технологии,

Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова,  
Актобе, Казахстан, [szhekeyev@zhubanov.edu.kz](mailto:szhekeyev@zhubanov.edu.kz), ORCID ID: 0000-0002-8915-9469

**Рыскулов Бегим Канатбаевич<sup>2</sup>**

старший преподаватель.

Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова,  
Актобе, Казахстан, [begim.ryskulov@bk.ru](mailto:begim.ryskulov@bk.ru), ORCID ID: 0009-0008-1988-5909

**Исакулов Абилхаир Баизакович<sup>3</sup>**

PhD,

Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова,  
Актобе, Казахстан, [abulik92@mail.ru](mailto:abulik92@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-2462-6185

**КОМПЛЕКСНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТА**

**Аннотация.** Стабилизация и укрепление грунта достигается путем введения органических или минеральных модифицирующих добавок или сложных смесей, и этот процесс может сопровождаться термической или механической обработкой грунта. Особый интерес представляет использование измельченного металлургического шлака, обладающего гидравлическими и пуццолановыми свойствами.

Целью исследования было изучение свойств модифицированного грунта путем введения композитной минеральной добавки на основе негашеной извести и молотого шлака при механической обработке исследуемых образцов. Эксперимент был основан на методах математического планирования и статистической обработки, которые оценивают адекватность моделей путем проверки значимости коэффициентов и значимости полученных результатов. Полученные модели были проанализированы с помощью методов математического анализа многомерных функций. Рассматриваемыми переменными были расход негашеной извести, расход измельченного шлака, удельная поверхность измельченного шлака и давление уплотнения.

В качестве функций отклика были взяты прочность модифицированного грунта через 28 дней отверждения в стандартных условиях и его средняя плотность.

Исследования показали, что добавление негашеной извести и порошкообразного доменного шлака позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики грунта, особенно при механической нагрузке на ранних этапах отверждения.

Были определены оптимальная дозировка и удельная поверхность гранулированного доменного шлака:  $363 \pm 18$  кг/м<sup>3</sup> и  $383 \pm 10$  м<sup>2</sup>/кг соответственно.

Были выведены оптимизированные соотношения между прочностью и плотностью грунта, содержанием извести и давлением уплотнения, выполнена их графическая интерпретация и разработан алгоритм для компьютерной программы расчета.

**Ключевые слова.** почва, стабилизация, глина, негашеная известь, дробленый шлак, уплотнение почвы.

**Zhekeyev Samat Omarovich<sup>\*1</sup>**

master of Engineering and Technology,  
Aktobe Regional University named after K.Zhubanov,  
Aktobe, Kazakhstan, [szhekeyev@zhubanov.edu.kz](mailto:szhekeyev@zhubanov.edu.kz), ORCID ID: 0000-0002-8915-9469

**Ryskulov Begim Kanatbayevich<sup>2</sup>**

senior lecturer,  
Aktobe Regional University named after K.Zhubanov,  
Aktobe, Kazakhstan, [begim.ryskulov@bk.ru](mailto:begim.ryskulov@bk.ru), ORCID ID: 0009-0008-1988-5909

**Issakulov Abilkhair Baizakovich<sup>3</sup>**

PhD,  
Aktobe Regional University named after K.Zhubanov,  
Aktobe, Kazakhstan, [abulik92@mail.ru](mailto:abulik92@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-2462-6185

## COMPLEX STABILIZATION AND SOIL REINFORCEMENT

**Abstract.** Soil stabilization and reinforcement is achieved by introducing organic or mineral modifier additives, as well as complex mixtures, and this process may be accompanied by thermal or mechanical treatment of the soil. The use of pulverized metallurgical slag exhibiting hydraulic and pozzolanic properties is of particular interest.

The purpose of the study was to investigate the properties of modified soil by introducing a composite mineral admixture based on unquenched lime and ground slag during mechanical treatment of the specimens under investigation. The experiment was based on mathematical planning methods and statistical processing techniques that assess the adequacy of the models by verifying the significance of the coefficients and the significance of the results obtained. The resulting models were analyzed using mathematical analysis methods for multivariate functions. The variables considered were the consumption of unquenched lime, the consumption of ground slag, the specific surface area of the ground slag, and the compaction pressure.

The response functions were the strength of the modified soil at 28 days of curing under standard conditions and its average density.

The studies have shown that the introduction of unquenched lime and pulverized blast-furnace slag allows for a significant improvement in the performance characteristics of the soil, especially under mechanical loading during the early stages of curing.

The optimal dosage and specific surface area of granulated blast-furnace slag were determined:  $363 \pm 18$  kg/m<sup>3</sup> and  $383 \pm 10$  m<sup>2</sup>/kg, respectively.

Optimized dependencies of the soil strength and density on the lime content and compaction pressure were obtained, their graphical interpretation was performed, and an algorithm was developed for a computer program.

**Key words.** soil, stabilization, clay, lime, crushed slag, soil compaction.

**Кіріспе.** Топырақты тұрақтандыру және нығайту – бұл ғимараттар мен құрылыстардың іргетастары ретінде қолданылатын топырақтардың сенімділігін, ұзақ мерзімділігін және механикалық қасиеттерін арттыруға бағытталған инженерлік шаралар кешені. Бұл шаралардың негізінде топырақ қасиеттерін механикалық, термиялық және химиялық әдістермен модификациялау жатыр [1,2,3].

Міндетті шарт – қолданылатын модификатор-қоспалардың түрлерінің топырақ қасиеттерімен үйлесімділігі, сондай-ақ топыраққа әсер ететін термиялық немесе механикалық жағдайлардың қоспа түріне және топырақ сипаттамаларына сәйкес келуі.

Нығайту жұмыстары әлсіз топырақтарда, сондай-ақ пучинистый (ісінгіш) топырақтарда, жол құрылысында да, іргетас негіздерін дайындау кезінде де жүзеге асырылады.

Бұл топқа сазды топырақтар, саздақтар және құмдақтар жатады. Мұндай топырақтар тұрақтандырылмаған жағдайда тек технологиялық және логистикалық процестерді бұзып қана қоймай, сонымен бірге адамның өміріне тікелей қауіп төндіруі мүмкін.

Топырақты тұрақтандыру тиімділігіне табиғи топырақтардың келесі сипаттамалар топтары ең елеулі әсер етеді.

Біріншіден, глинисті және (немесе) құмды бөлшектердің мөлшері.

Екіншіден, топырақтың пластикалығының саны және сутектік көрсеткіші (рН).

Үшіншіден, гумустық заттардың, гипстің, хлоридтердің және сульфаттардың мөлшері.

Топырақтың гидрогеологиялық жағдайы да өте маңызды, соның ішінде оның табиғи ылғалдылығы, жер асты суларының деңгейі, тасқын суларының деңгейі, сондай-ақ жер асты өзендерінің, карстты қуыстардың және басқа да құбылыстардың болуы мүмкін.

Сондықтан белгілі бір әдісті (технологияны) таңдау кезінде топырақтың қасиеттерін зерттеу міндетті түрде жүргізілуі тиіс [4,5,6].

Топырақты тұрақтандырудың мақсаты – оның физика-механикалық қасиеттерін өзгерту.

Тұрақтандыру минералды байланыстырғыштарды, синтетикалық немесе органикалық эмульсияларды, минералды қоспаларды енгізу арқылы, сондай-ақ оларды термиялық әсермен немесе механикалық тығыздаумен біріктіре отырып жүзеге асырылады.

Құмды топырақтар, саздақтар және құмдақтар тұрақтандырылуы мүмкін:

– түзетуші қосымша топырақты тарату және орташа мәнге келтіру жолымен;

– табиғи тығыздықтағы топыраққа тұрақтандырғыш енгізу арқылы.

Топырақ материалына әсер ету ерекшеліктеріне қарай тұрақтандырғыштар гидрофобизаторлар және нығайтқыштар болып бөлінеді.

Нығайтқыштар тек топырақтың тоңазу кезіндегі пучу процессін азайтып қана қоймай, сонымен қатар оның су-физикалық және физика-механикалық қасиеттерін өзгертеді [7,8,9].

Атап айтқанда, бөлшектердің өзара әрекеттесу процестерінде және құрылым түзу кезінде фаза шекараларындағы физика-химиялық құбылыстардың айқындалушы рөлі дәлелденді. Сулау, адгезия, адсорбция, интерфазалық керілу шамасының өзгеруі, ерекше шекаралық қабаттардың түзілуі сияқты процестер зерттелді, олардың көпшілігі топырақтардың қасиеттерінің қалыптасуы мен модификациясының негізін құрайды.

Дисперстік жүйелер мен материалдардың құрылымдық-механикалық қасиеттерін басқарудың мүмкіндігі мен тиімділігі туралы түсініктер дамытылды, әсіресе механикалық әсерлердің (мысалы, вибрациялық, импульстік, тығыздау) және физика-химиялық факторлардың оңтайлы үйлесуі кезінде.

Топырақтану ғылымының дамуына және топырақтарды тұрақтандыру теориясының қалыптасуына жақын алыс шетелдер академиктері және топырақтану мектебінің еңбектері зор үлес қосты [10,11].

Топыраққа химиялық заттарды енгізу, оны нығайтуға бағытталған тікелей

реакцияларға қоса, топырақ бөлшектерінің беттік потенциалын өзгертуге мүмкіндік береді, бұл оның тығыздалу үдерісін жақсартуға ықпал етеді. Бұл анықталған факт топырақты кешенді тұрақтандыру және нығайту шарттарын әзірлеуде қолданылады.

Струйлық (ағындық) цементация технологиясы топырақ бөлшектерін цемент-су суспензиясымен интенсивті араластыру арқылы топырақ-цемент массивін қалыптастыру жағдайларын жасауды көздейді. Практикада струйлық цементацияның әртүрлі әдістері қолданылады: бір-, екі- және үшкомпонентті струйлық цементация [12]. Портландцемент клинкерін топырақты тұрақтандырудың негізгі компоненті ретінде энергетикалық емес материалдармен, мысалы сөндірілмеген әкпен алмастыру, топырақты тұрақтандыру және нығайту шығындарын едәуір төмендетуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ шлактарды және шлак-сілтілі байланыстырғыштарды қолдану да қызығушылық тудырады.

Зерттеудің мақсаты – зерттелетін үлгілерге механикалық әсер ету кезінде сөндірілмеген әк пен ұнтақталған шлаққа негізделген кешенді минералды қоспаны енгізу арқылы модификацияланған топырақтың қасиеттерін зерттеу болды.

**Зерттеу материалдары мен әдістері.** Зерттеу объектісі — пластикалық қасиеті 9,1, максималды тығыздығы  $1720 \text{ кг/м}^3$  және оптималды ылғалдылығы 18,6% болатын құмды сазды топырақ.

Кешенді модификациялайтын қоспаның құрамына кірді:

сөндірілмеген әк (ГОСТ 9179-2018) және ұнтақталған гранулданған домна шлағы (ТУ 0799-001-99126491-2013). Қолданылған әк №02 және №008 електерінен өткенде қалдықтары тиісінше 1,5% және 15%-дан аспауы керек. Белсенді СаО және MgO мөлшері — 80%, ал сөнбеген түйірлердің үлесі 8%-дан аспайды.

Домна шлағының химиялық құрамы:

SiO<sub>2</sub> – 90,76%

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,47%

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,24%

CaO – 0,53%

Na<sub>2</sub>O – 0,57%

Қыздыру кезінде масса жоғалуы – 3,4%

Саздақтың қасиеттері және модификацияланған топырақтың сипаттамалары ГОСТ әдістемелері бойынша анықталды.

Эксперимент математикалық жоспарлау әдістеріне және алынған нәтижелерді статистикалық өңдеуге, сонымен қатар алынған модельдердің маңыздылығын коэффициентпен және модельдердің сәйкестігін тексеруге негізделді.

Алынған модельдер көп айнымалы функцияларды математикалық талдау әдістерін қолдану арқылы зерттелді.

Айнымалы факторлар ретінде қабылданды:

сөндірілмеген әктің шығыны ( $X_1$ ) —  $1 \text{ м}^3$  топыраққа кг арқылы,

ұнтақталған шлақтың шығыны ( $X_2$ ) —  $1 \text{ м}^3$  топыраққа кг арқылы,

ұнтақталған шлақтың меншікті беті ( $X_3$ ),

тығыздау қысымы ( $X_4$ ).

Жауап функциялары ретінде алынды: модификацияланған топырақтың қалыпты жағдайдағы 28 тәуліктік кату жасындағы беріктігі ( $Y_1$ ),

модификацияланған топырақтың орташа тығыздығы ( $Y_2$ ).

Эксперимент жағдайлары 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте. Төрт факторлы эксперимент жүргізу жағдайлары

Фактордың атауы	Символ $X_i$	Фактордың орташа мәні $\bar{X}_i$	Вариация интервалы $\Delta X_i$	Денгейлер бойынша фактор мәндері	
Сөндірілмеген әк шығыны, кг/м <sup>3</sup>	$X_1$	100	40	60	140
Ұнтақталған шлак шығыны, кг/м <sup>3</sup>	$X_2$	240	140	100	380
Ұнтақталған шлақтың меншікті беті, м <sup>2</sup> /кг	$X_3$	300	100	200	400
Тығыздау жүктемесі, МПа	$X_4$	4,0	2,0	2,0	6,0

**Нәтижелер және оларды талқылау.** Көп айнымалы функциялар немесе регрессиялық теңдеулер ретінде процестердің математикалық модельдері белсенді эксперимент нәтижелерін статистикалық өңдеудің нәтижесінде алынды.

Төрт факторлы толық эксперимент жүргізілді, оның негізі ретінде  $24+2 \times 4+4$  типті жоспарлау матрицасы алынды.

Эксперименттік материалды статистикалық өңдеудің нәтижесінде келесі регрессиялық теңдеулер алынды:

Сығу кезінде беріктік үшін:  $Y_1 = 7,1 + 1,2X_1 + 0,7X_2 + 0,5X_3 + 0,4X_4 + 0,6X_1X_4 - 0,4X_2^2 - 0,3X_3^2$

Орташа тығыздық үшін:  $Y_2 = 1880 + 52 X_1 + 18 X_2 + 20 X_3 + 32 X_4 + 18 X_1X_4$

Модификацияланған топырақтың сығу кезіндегі беріктігіне арналған сенімділік интервалдарының шамасы  $\Delta b_1 = 0,2$  МПа, ал орташа тығыздық үшін —  $\Delta b_2 = 12$  кг/м<sup>3</sup> болды. Сенімділік интервалдарының модуль бойынша аз коэффициенттері маңызды деп саналмады (оның шамасы эксперимент қателігінен аспады) және нөлге теңестірілді. Фишер критерийі бойынша тексеру алынған модельдердің белсенді эксперименттің нақты мәндеріне сәйкес екенін көрсетті.

Сығу беріктігіне ең үлкен әсер сөндірілмеген әктің шығынына тиеді ( $X_1$  коэффициенті 1,2).  $Ca^{2+}$  иондары топырақ құрамындағы заттармен физика-химиялық өзара әрекеттесіп, бір жағынан химиялық байланысқан кешендердің түзілуіне ықпал етеді, ал екінші жағынан топырақ бөлшектерінің электрондық потенциалын өзгертеді, оның байланыстылығын өзгертіп, тығыздалу процесін жақсартады ( $X_1$ ,  $X_4$  коэффициенті 0,6).

Шлак шығыны мен оның меншікті бетінің беріктікке әсері біркелкі емес. Ұнтақталған шлақтың шығыны белгілі бір оңтайлы мәннен төмен болғанда беріктік артады, кейін төмендей бастайды ( $X_2$  коэффициенті 0,7 және  $X_2^2$  коэффициенті  $-0,4$ ). Ұнтақталған шлақтың меншікті бетінде де осындай оңтайлылық байқалады ( $X_3$  коэффициенті 0,5 және  $X_3^2$  коэффициенті  $-0,3$ ).

Оңтайлы мәндерді іздеу аналитикалық оңтайландыру әдісімен жүзеге асырылады.

Топырақтың орташа тығыздығы кешенді модификациялайтын қоспаның құрамдастарының әсерінен де, механикалық тығыздаудан да артады. Ең маңызды факторлар — сөндірілмеген әктің шығыны және тығыздау жүктемесі ( $X_2$  және  $X_4$  коэффициенттері сәйкесінше 52 және 34).

Аналитикалық оңтайландыру әдісі статистикалық әдістерді жүзеге асыру нәтижесінде алынған регрессиялық теңдеулердің бір жағынан зерттелетін процестерді адекватты сипаттайтын модельдер екенін, ал екінші жағынан — бірнеше (бұл жағдайда

төрт) айнымалы функциялары екенін мойындауға негізделген, және оларды зерттеу үшін математикалық талдау әдістерін қолдануға болады. Атап айтқанда, функцияларды дифференциалдау әдістерімен зерттеу.

Әдіс НИУ МГСУ-де әзірленген және көптеген құрылыс материалдарының технологиялары мен рецептураларын зерттеу кезінде тексерілген. Әдіс келесі кезеңдерді қамтиды:

Айқын сәйкес келмейтін сызықты әсері бар факторлар бойынша локальды оңтайлылықтарды анықтау (бұл жағдайда — шлак шығыны және оның меншікті беті);

Шлак шығыны мен оның меншікті бетінің табиғи оңтайлы мәндерін анықтау;

Жауап функцияларын (1 және 2) оңтайландыру  $X_2$  және  $X_3$ -тің оңтайлы мәндерін ескере отырып;

Нәтижелерді графикалық және аналитикалық оңтайландыру.

1.  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$  функциясы бойынша локальды оңтайлылықтарды анықтау

$$\partial Y_1 / \partial X_2 = 0,7 - 0,8X_2 = 0 \rightarrow X_2 = \frac{0,7}{0,8} = 0,88$$

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0,5 - 0,6X_3 = 0 \rightarrow X_3 = \frac{0,5}{0,6} = 0,83$$

2. Факторлардың табиғи мәндерін анықтау (1-кестедегі орта мәндер мен вариация интервалдарын ескере отырып):

$$\text{Ұнтақталған шлак шығыны: } P_{\text{ш}} = 240 + 0,88 \times 140 = 363 \pm 18 \text{ кг/м}^3$$

$$\text{Ұнтақталған шлақтың меншікті беті: } S_{\text{ш}} = 300 + 0,83 \times 100 = 383 \pm 10 \text{ м}^2/\text{кг}$$

3. Функцияларды оңтайландыру (полиномдарға (1 және 2)  $X_2 = 0,88$  және  $X_3 = 0,83$  мәндерін қойып):

$$\text{Сығу беріктігі үшін: } Y_1 = 7,6 + 1,2X_1 + 0,4X_4 + 0,6X_1X_4$$

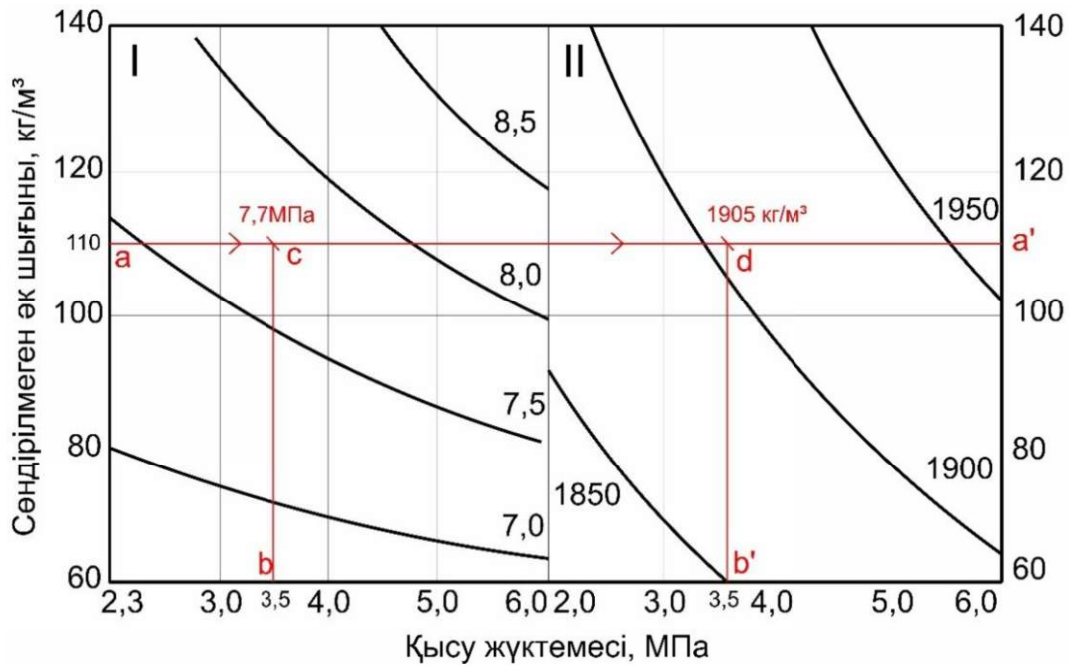
$$\text{Орташа тығыздық үшін: } Y_2 = 1913 + 52X_1 + 32X_4 + 18X_1X_4$$

4. Оңтайландырылған полиномдардың (3 және 4) графикалық интерпретациясы.

Бұл номограмма түрінде ұсынылған (2-сурет).

–Номограмма I секторы модификацияланған топырақтың беріктігінің сәндірілмеген әк шығыны және тығыздау жүктемесіне тәуелділігін көрсетеді;

–II сектор — сол факторларға байланысты топырақтың орташа тығыздығының тәуелділігін көрсетеді.



1-сурет. Модификацияланған және тығыздалған топырақтың қасиеттерін болжауға арналған номограмма, мұндағы ұнтақталған шлак шығыны  $363 \pm 18 \text{ кг/м}^3$  және ұнтақталған шлактың меншікті беті  $383 \pm 10 \text{ м}^2/\text{кг}$  болғандағы оңтайлы мәндер есепке алынған.

Номограмма арқылы өнімдердің қасиеттерін болжау міндетін шешу келесі ретпен жүзеге асырылады.

1. Әк шығыны мен тығыздау жүктемесінің мәндері енгізіледі. Мысалы, сәйкесінше  $110 \text{ кг/м}^3$  және  $3,5 \text{ МПа}$ . Бұл мәндер номограммадағы а және b нүктелеріне сәйкес келеді.

2. a нүктесінен абсцисса осіне параллель тік сызық жүргізіледі (a, a').

3. b нүктесінен ордината осіне параллель тік сызық жүргізіледі.

4. Сызық (a, a') бойымен қиылысқан жерде c нүктесі алынады, оған сәйкес топырақтың беріктігі  $7,7 \text{ МПа}$  (интерполяция) болады.

5. Кейін b' нүктесінен ордината осіне параллель тік сызық жүргізіліп, (a, a') сызығымен қиылысу нүктесі d алынады, оған сәйкес топырақтың орташа тығыздығы  $1905 \text{ кг/м}^3$  (интерполяция) болады.

Вариацияланатын факторлардың берілген мәндеріне байланысты модификацияланған және тығыздалған топырақтың қасиеттерін бағалау бойынша болжау міндетін шешу ЭЕМ бағдарламасы арқылы жүзеге асырылуы мүмкін, алгоритмі 3-суретте көрсетілген.

Бағдарламаның жұмысы келесі есептеу операцияларын ретті түрде орындауға негізделген:

факторларды енгізу,

факторларды кодтау,

нәтижелерді есептеу және шығару.

Кодтау блогы, негізінде 1-кестеге сүйене отырып, факторлардың табиғи мәндерінен  $[-1, +1]$  интервалға өтуін қамтамасыз етеді.

Кодталған түрге өту және қайтадан табиғи мәндерге оралу келесі формулалар арқылы жүзеге асырылады:

Кодтау үшін есептеу формуласы:

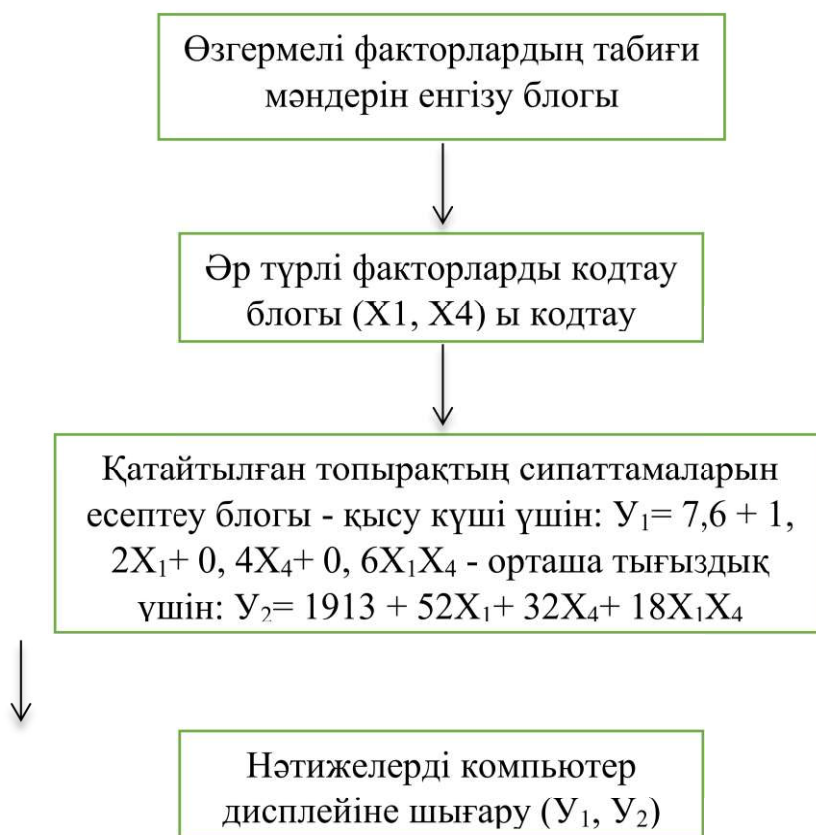
$$X_i = \frac{X_{cpi} - X_{ni}}{\Delta X_i}$$

Декодтау үшін есептеу формуласы:

$$X_{ni} = X_{cpi} + \Delta X_i$$

Мұндағы:

- $X_{ni}$  —  $i$  факторының табиғи мәні;
- $X_{cpi}$  —  $i$  факторының орташа мәні;
- $\Delta X_i$  —  $i$  факторының вариация интервалы;
- $X_i$  —  $i$  факторының кодталған мәні



4-сурет. Фибробетон қасиеттерін болжауға арналған компьютерлік бағдарламаның алгоритмі

Алгоритмнің есептеу блогы модификацияланған топырақтың беріктігі мен тығыздығын сәндірілмеген әк шығыны және тығыздау мөлшерімен байланыстыратын оңтайландырылған математикалық модельдерді (3 және 4) қамтиды.

Осы кезде ұнтақталған шлак шығышының  $363 \pm 18$  кг/м<sup>3</sup> және ұнтақталған шлактың меншікті бетінің  $383 \pm 10$  м<sup>2</sup>/кг оңтайлы мәндері өзгермейді.

«Деректерді шығару» блогы сығу беріктігі мен композициялық байланыстырғыштың орташа тығыздығы бойынша нәтижелерді табиғи бірліктерде экранға шығару немесе принтер арқылы басып шығару мүмкіндігін береді.

**Қорытынды.** Әлсіз топырақты тұрақтандыру және оны нығайту — жол құрылысы

мен ғимарат іргетастарын дайындау кезінде қажет болатын инженерлік шаралар.

Мұндай жұмыстарды жүзеге асыру арқылы:

- әлсіз топырақты қазудың көлемін азайту,
- жеткізілетін инертті материалдардың мөлшерін минимумға келтіру,
- іргетастың мұздату кезінде ісінуге бейімділігін төмендету мүмкін болады.

Бұл инженерлік шаралардың өндіріштігі жоғары. Модификацияланған және нығайтылған топырақтың беріктігіне жету үдерісі тұрақты және уақыт өте тоқтамайды.

Зерттеу көрсеткендей, сөндірілмеген әк пен ұнтақталған гранулданған домна шлағының композициялық қоспасын енгізу арқылы кешенді модификацияны қолдану, механикалық тығыздаумен бірге, топырақты оның қасиеттері бойынша жолдардың негіздеріне және ғимарат іргетастарына қойылатын талаптарға толық сәйкес келетін модификацияланған топырақ алу мүмкіндігін береді.

### ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Романенко И.И., Романенко М.И., Петровнина И.Н., Пинт Э.М. Влияние водорастворимого полимерного стабилизатора топырака на физико механические свойства песчаного грунта // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 5 <http://naukovedenie.ru/PDF/44TVN614.pdf>. DOI: 10.15862/44TVN514

2. Kashevarova G. G., Makovetskiy O. A.. Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations // Procedia Engineering, Volume 150, 2016, Pages 10.1016/j.proeng.2016.07.268.

3. Кнатько В.М. Укрепление дисперсных топыраков путем синтеза неорганических вяжущих веществ. Л.: изд-во ЛГУ, 1989. 272 с.

4. Абрамова Т.Т. Использование стабилизаторов для улучшения свойств связных топыраков / Т.Т. Абрамова, А.И. Босов, К.Э. Валиева // Геотехника.– 2012. – № 3. – С. 4-28.

5. Butchibabu B., Prosanta Kumar Khan, P. C. Jha. Foundation evaluation of underground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations// Engineering Geology, Volume 248, 8 January 2019, Pages 140-154. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.001.

6. Zhi-Feng Wang, Shui-Long Shen, Giuseppe Modoni. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application //Computers and Geotechnics, Volume 111, July 2019, Pages 222-228 DOI:[10.1016/j.compgeo.2019.03.012](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.012)

7. Xiushan Wang, Sunghyok Kim, Yuepeng Wu, Yu Liu, Tianyun Liu, Yiming Wang. Study on the optimization and performance of GFC soil stabilizer based on response surface methodology in soft soil stabilization // ScienceDirect. Soils and Foundations. Volume 63, Issue 2, April 2023, 101278. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101278>

8. Arioz O, Tokyay M, Arioz E (2006) Properties of fly ash-FGD gypsum-lime based products. AustralasCeram Soc 42(1):13–21

9. Романенко И.И., Романенко М.И., Петровнина И.Н., Пинт Э.М., Еличев К.А. Стабилизация топыраканеорганическими вяжущими// Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6<http://naukovedenie.ru/PDF/44TVN614.pdf>. DOI: 10.15862/44TVN614

10. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах: Избр.труды. - М.: Наука, 1978. 384 с.

11. Королёв В.А., Герасимова А.С., Кривошеева З.А. Инженер-геологи Московского университета: Преподаватели и сотрудники кафедры инженерной геологии и охраны геологической среды геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Биографо-библиографический справочник/ Под ред. В.Т. Трофимова. – М., Изд-во

Московского университета, 1998, - 190 с.

12. Алексеев В.А., Баженова О.Ю., Пудел Рави Сагар Проблема реализации технологии струйной цементации в сложных инженерно-геологических условиях // Техника и технология силикатов. 2022 Т. 29.

## REFERENCES

1. Romanenko I.I., Romanenko M.I., Petrovnina I.N., Pint E.M. Vliyanie vodorastvorimogo polimernogo stabilizatora grunta na fiziko-mekhanicheskie svoystva peschanogo grunta [Effect of water-soluble polymer soil stabilizer on physical and mechanical properties of sandy soil]. Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE», (2014). № 5. – (In Rus)
2. Kashevarova G. G., Makovetskiy O. A. Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations // Procedia Engineering, Volume 150, (2016), Pages 10.1016/j.proeng.2016.07.268.
3. Knat'ko V.M. Ukreplenie dispersnyh gruntov putem sinteza neorganicheskikh vyazhushchih veshchestv [Strengthening of dispersed soils by synthesis of inorganic binders]. L.: izd-vo LGU, (1989). S. 272. – (In Rus)
4. Abramova T.T., Bosov A.I., Valieva K.E. Ispol'zovanie stabilizatorov dlya uluchsheniya svoystv svyaznyh gruntov [Use of stabilizers to improve the properties of cohesive soils]. Geotekhnika, (2012). № 3. S. 4-28. – (In Rus)
5. Butchibabu B., Prosanta Kumar Khan, P. C. Jha. Foundation evaluation of underground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations // Engineering Geology, Volume 248, 8 January (2019), Pages 140-154. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.001.
6. Zhi-Feng Wang, Shui-Long Shen, Giuseppe Modoni. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application // Computers and Geotechnics, Volume 111, July (2019), Pages 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012
7. Xiushan Wang, Sunghyok Kim, Yuepeng Wu, Yu Liu, Tianyun Liu, Yiming Wang. Study on the optimization and performance of GFC soil stabilizer based on response surface methodology in soft soil stabilization // ScienceDirect. Soils and Foundations. Volume 63, Issue 2, April (2023), 101278. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101278>
8. Arioiz O., Tokyay M., Arioiz E. Properties of fly ash-FGD gypsum-lime based products. AustralasCeram Soc 42(1):13–21, (2006).
9. Romanenko I.I., Romanenko M.I., Petrovnina I.N., Pint E.M., Elichev K.A. Stabilizaciya grunta neorganicheskimi vyazhushchimi [Soil stabilization with inorganic binders]. Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE», (2014). № 6. – (In Rus)
10. Rebinder P.A. Poverhnostnye yavleniya v dispersnyh sistemah: Izbr.trudy [Surface phenomena in dispersed systems: Selected works]. M.: Nauka, (1978). S. 384. – (In Rus)
11. Korolyov V.A., Gerasimova A.S., Krivosheeva Z.A. Inzhener-geologi Moskovskogo universiteta: Prepodavateli i sotrudniki kafedry inzhenernoj geologii i ohrany geologicheskoy sredy geologicheskogo fakul'teta MGU im. M.V. Lomonosova [Engineering geologists of Moscow University: Teachers and staff of the Department of Engineering Geology and Protection of the Geological Environment, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University]. M., Izd-vo Moskovskogo universiteta, (1998). S. 190. – (In Rus)
12. Alekseev V.A., Bazhenova O.Yu., Poudel Ravi Sagar. Problema realizacii tekhnologii strujnoj cementacii v slozhnyh inzhenerno-geologicheskikh usloviyah [The problem of implementing jet grouting technology in complex engineering and geological conditions]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov, (2022). T. 29. – (In Rus)