








DOI 10.51885/1561-4212_2025_4_321
FTAXP 67.21.17

МАУСЫМДЫҚ МҰЗДАТЫЛҒАН ТОПЫРАҚТАРДАҒЫ ҚАДАЛАРДЫҢ ІРГЕТАСТАРЫНА ЖЫЛУ МАССАСЫН ТАСЫМАЛДАУДЫҢ ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА СВАЙНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ В СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ

THE EFFECT OF HEAT AND MASS TRANSFER ON PILE FOUNDATIONS IN SEASONALLY FROZEN SOILS

С.Т. Мусаханова ^{1,2*}, Р.Е. Лукпанов ¹, А.С. Сарсембаева ³,
А.К. Абишева ¹, Б.Ч. Кудрышова ²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

²Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

³Шәкәрім Университеті, Семей қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Мусаханова Салтанат Татарбековна, e-mail: musaxanova.saltanat@mail.ru

Түйінді сөздер:

жылу массасын
тасымалдау, қадалар,
маусымдық қататын
топырақтар, аяздың
деформациясы, еріту,
мұздату

ТҮЙІНДЕМЕ

Маусымдық мұздатылған топырақтардағы жылу массасын тасымалдау құбылысы қадалардың іргетастарының күйіне айтарлықтай әсер етеді. Мұндай топырақтарда салынған құрылыс конструкциялары өте жағымсыз салдарға ұшырайды: мұздату, аяздың көтерілуі, діріл динамикасы, еріту. Маусымдық қататын топырақтар Қазақстан аумағының көптеген өңірлерінде топырақтың қату тереңдігі 1,5 м-ден асады, оған қоса көрсеткіш 1,9 м-ге жететін және елдің солтүстігінде – 2,74 м. болатын елді мекендер бар. Іргетастардың негіздерін мұздату тереңдігінен төмен орналастыру құрылыстың қымбаттауына әкеледі, жылу оқшаулауға, желдетуге, басқа материалдар мен құрылымдарға қосымша шығындарды талап етеді, сонымен қатар ғимараттардың, құрылыстардың, теміржолдардың және автомобиль жолдарының қызмет ету мерзімі мен жағдайларына жылу массасын тасымалдаудың теріс әсерін әрдайым толық теңестіре бермейді. Сондықтан жылу физикасы саласындағы инженерлер мен мамандардың күш-жігері маусымдық мұздатылған топырақтардағы іргетастардың деформациясы мен бұзылуын шешудің тиімді жолдарын іздеуге бағытталған. Мақалада термомеханикалық модель негізінде маусымдық мұздатылған топырақтардағы қадалардың іргетастарына жылу массасын тасымалдаудың әсер ету сипатын анықтауға тырысады. Зертханалық зерттеулер жүргізу кезінде физикалық-механикалық сынақтар жүргізілді, сондай-ақ қаданың түбінен топырақ бетіне дейін топырақтағы жылу мен ылғалдың тасымалдануы есептелді.

Ключевые слова:

тепломассоперенос,
свайные фундаменты,
сезоннопромерзающие

АННОТАЦИЯ

Явление теплопереноса в сезоннопромерзающих грунтах оказывает существенное влияние на состояние свайных фундаментов. Строительные конструкции, устроенные в таких грунтах



грунты, деформации
морозного пучения,
оттаивание, промерзание

испытывают крайне негативные последствия: промерзание, морозное пучение, вибродинамика, оттаивание. Сезоннопромерзающие грунты занимают большую часть территории Казахстана, причем в большинстве регионов глубина промерзания грунтов превышает 1,5 м, имеются населенные пункты, где показатель достигает 1,9 м и на севере страны – 2,74 м. Устройство оснований фундаментов ниже глубины промерзания приводит к удорожанию строительства, требует дополнительных затрат на теплоизоляцию, вентиляцию, другие материалы и конструкции, и, кроме того, не всегда приводит к полному нивелированию негативного воздействия тепломассопереноса на срок и условия эксплуатации зданий, сооружений, железных и автомобильных дорог. Поэтому усилия инженеров и специалистов в области теплофизики направлены на поиски эффективных путей решения проблем деформации и разрушения фундаментов в сезоннопромерзающих грунтах. В статье предпринята попытка выявить характер влияния тепломассопереноса на свайные фундаменты в сезоннопромерзающих грунтах на основе термомеханической модели. Во время проведения лабораторных исследований проведены физико-механические испытания, а так же подсчитаны тепло и влагоперенос в грунте от глубины основания сваи до поверхности грунта.

Keywords:

heat and mass transfer, pile foundations, seasonally freezing soils, frost heaving deformations, thawing, freezing

ABSTRACT

The phenomenon of heat and mass transfer in seasonally frozen soils has a significant impact on the condition of pile foundations. Building structures built in such soils experience extremely negative consequences: freezing, frost heaving, vibration dynamics, thawing. Seasonally frozen soils occupy most of the territory of Kazakhstan, and in most regions the depth of soil freezing exceeds 1.5 m, there are settlements where the indicator reaches 1.9 m and in the north of the country – 2.74 m. The installation of foundations below the freezing depth leads to an increase in the cost of construction, requires additional costs for thermal insulation, ventilation, other materials and structures, and, moreover, does not always lead to a complete leveling of the negative effects of heat and mass transfer on the life and operating conditions of buildings, structures, railways and highways. Therefore, the efforts of engineers and specialists in the field of thermophysics are aimed at finding effective ways to solve the problems of deformation and destruction of foundations in seasonally freezing soils. The article attempts to identify the nature of the effect of heat and mass transfer on pile foundations in seasonally frozen soils based on a thermomechanical model. During laboratory tests, physico-mechanical tests were carried out, as well as heat and moisture transfer in the soil from the depth of the pile base to the surface of the soil were calculated.

КІРІСПЕ

Таңдалған зерттеу тақырыбының өзектілігі топырақтың маусымдық қатуы Қазақстанның барлық аумағының жартысынан астамын алып жатқан аумақта байқалатындығына байланысты. Мұндай топырақтардағы ірғетастар мұздату, еріту және діріл динамикасы деген процестерге ұшырайды. Бұл процестер әсіресе маусымдық еріту және мұздату кезеңінде қарқынды түрде көрінеді. Қазақстан аумағының батыстан шығысқа және солтүстіктен оңтүстікке қарай үлкен ұзындығы, географиялық, геологиялық, тектоникалық, гидрогеологиялық құрылымның күрделілігі, ландшафттық және климаттық жағдайлар еліміздің әртүрлі өңірлері бойынша топырақтың маусымдық қату



ерекшелігін едәуір дәрежеде айқындады. Соңдықтан белгілі бір учаскедегі маусымдық мұздатудың негізгі заңдылықтары топырақ бетіндегі жылу алмасу жағдайларымен, оның құрамы мен күйімен анықталады. Маусымдық мұздатылған топырақтарда қадалардың іргетастарын орнату ғимараттар мен құрылыстарды пайдалануда одан әрі проблемаларды болдырмау үшін олардың көтергіштігі мен тұрақтылығын анықтау мақсатында фазалық ауысулармен жылу массасын беру процестерін ескере отырып, температуралық режимді сандық зерттеуді талап етеді (Невзоров, 2022).

Мақаланың мақсаты – маусымдық мұздатылған топырақтардағы қадалардың іргетастарына жылу массасын тасымалдаудың әсері мен заңдылықтарын зерттеу.

Жылу массасын тасымалдау құбылысы жылу физикасы, мылтық механикасы және термогидродинамикада белсенді зерттелуде. Еріген және мұздатылған топырақтарда болатын көпші-қон процестерін зерттеуге арналған жұмыстар: Э.Д. Ершов, А.И. Короткий, С. Крауч, О. Кусси, С.А. Кудрявцев.

Маусымдық мұздатылған топырақтардағы жылу массасын беру мәселелерін шешудің сандық және аналитикалық әдістері В.И. Попов, Д.С. Скворцов, Э.М. Карташов, А.Ю. Крайновтың және т.б. еңбектерінде келтірілген.

Айта кету керек, математикалық модельдеу кезінде тек фазалық түрлендірумен жылу өткізгіштік процесі жеткілікті уақытты қажет ететін итерациялық процедураларды қажет етеді. Бірлескен жылу массасын беруде жағдай күрделене түседі және масса мен жылу беру теңдеулерін белгілі, әр уақыт қадамында, олардың өзгеру диапазонында бірлесіп шешу үшін 150-300-ден астам итерация қажет. Мұның себебі, тасымалдау теңдеулерін қанағаттандыратын күй параметрлерін (температура, ылғалдылық, тау жыныстарының кеуектілігі, тұзды ерітіндідегі тұз концентрациясы) байланыстыру арқылы фазалық тепе-теңдік теңдеуін анықтайтын мүмкіндіктерді толық пайдаланбау (Короткий, 2020).

В.И. Попов, О. В. Третьяков және т.б. топырақтарда жылу массасын тасымалдауды шамамен есептеу үшін сәтті сыналған сандық әдістер бар. Сонымен қатар, бүгінгі күні жылу массасын тасымалдау мәселесін сандық және аналитикалық әдістермен шешу арнайы компьютерлік бағдарламаларды қолдану арқылы айтарлықтай жеңілдетілген, олардың арасында Frost, Термо, Борей 3D, FrozenWall, Termoground атап өтуге болады. Бұл бағдарламалар жылу және гидродинамикалық есептеулерді жүргізуге мүмкіндік береді және топырақтың температуралық өрістерін визуалды модельдеуге және қажетті графиктер мен диаграммаларды құруға мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Маусымдық мұздатылған топырақтардағы қадалардың іргетастарына жылу массасын тасымалдаудың әсерін зерттеу үшін мұздату және еріту процестеріне ұшырайтын топырақтың термогидромеханикалық моделі қолданылды.

Бұл модельде топырақ бөлшектерден, сұйық судан және мұздан тұратын үш фазалы кеуекті орта деп болжанады.

Термогидромеханикалық модель масса, энергия және импульстің сақталу заңдары сияқты үздіксіз орта механикасының негізгі заңдарын білдіретін масса, жылу және тепе-теңдік теңдеулерінен тұратын сызықтық емес теңдеулер жүйесін қамтиды.

Модельдегі маңызды қатынастар топырақтың қату аймағындағы кеуек қысымын есептеу үшін Бишоптың формуласы және температураға байланысты криогендік сіңу қарқындылығын сипаттайтын Клаузиус-Клаиперон теңдеуі болып табылады (Вабищевич, 2014).

Қадалардың іргетастарының жағдайы сандық модельдеу әдістерін қолдану температуралық-ылғалдылық өрістерінің өзгеру процестерін және олармен



байланысты деформацияларды кезеңдер бойынша бақылауға мүмкіндік береді, демек, олардың маусымдық қату-еруі жағдайында іргетастар мен негіздердің топырақтарына әсер ететін жағымсыз құбылыстарды азайту немесе болдырмау үшін әртүрлі материалдар мен іс-шараларды пайдаланудың тиімділігін болжауға мүмкіндік береді (ҚР БК 5.01-103-2013).

Біз маусымдық мұздатылған топырақ қатты бөлшектерден (s индексі), сұйық судан (l индексі) және мұз кристалдарынан (i индексі) тұратын үш фазалы кеуекті орта деген болжамнан бастаймыз.

Термогидромеханикалық модельді құру үшін топырақтың қату процесі туралы қолданыстағы идеяларға сәйкес келесі гипотезалар қабылданады:

– уақыттың алғашқы сәтінде кеуекті орта толығымен сумен қаныққан;

– ұзақ жүктеме кезінде кеуекті ортаның реологиялық қасиеттері тұтқыр серпімді деформациямен сипатталады (Скворцов, 2014).

$$\frac{\partial(\rho_j S_j n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i S_i n)}{\partial t} + \text{div}(\rho_l v_l) = 0, \quad (1)$$

мұнда $\rho S n$ – судың массалық құрамы ($j = l$) және мұздың ($j = i$) уақыт сәтінде t ;

ρ – фазаның тығыздығы;

S – фазаның қанықтылығы;

n – кеуектілігі;

v_l – судың жылдамдығы қатты қаңқаға қатысты.

Мұздың қанықтылығы температурадан қуат функциясымен беріледі (2):

$$S_i = \begin{cases} 1 - [1 - (T - T_{ph})]^\alpha, & T \leq T_{ph} \\ 0, & T > T_{ph}, \end{cases} \quad (2)$$

мұнда T_{ph} – судың қату температурасы;

α – эксперименталды түрде анықталған параметр.

Ылғалдың қанықтылығы S_l (3) формула бойынша кеуекті ортаның толық қанығу жағдайынан анықталады:

$$S_l = 1 - S_i. \quad (3)$$

Топырақ бөлшектеріне қатысты ылғалдың жылдамдығы Дарси заңымен анықталады (4):

$$v_l = -k \cdot \text{grad} \psi, \quad (4)$$

мұнда k – ылғал өткізгіштік коэффициенті;

ψ – топырақ ылғалының потенциалы.

Ылғал өткізгіштік коэффициенті k температураға байланысты есептеледі (5):

$$k = \begin{cases} k_0 [1 - (T - T_{ph})]^\beta, & T \leq T_{ph} \\ k_0, & T > T_{ph}, \end{cases} \quad (5)$$

мұнда k_0 – мұздатылмаған топырақтың ылғал өткізгіштік коэффициенті;

β – эксперименталды түрде анықталған параметр [7].



Топырақ ылғалының потенциалы формула бойынша анықталады (6):

$$\psi = \frac{p_l}{\rho_l g} + z, \quad (6)$$

мұнда p_l – кеукті ылғал қысымы;

g – ауырлық күшінің үдеуі;

z – тік координат.

Кеук қысымын анықтау үшін епископтың қатынасы қолданылады (7):

$$p = \chi p_l + (1 - \chi) p_i, \quad (7)$$

мұнда p_i – мұздың кеукті қысымы;

χ – мұздың қанықтылығына байланысты коэффициент.

Коэффициент χ формула бойынша анықталады (8):

$$\chi = (1 - S_i)^{1,5}. \quad (8)$$

Мұздың қысымы p_i өрнекке сәйкес Клаузиус-Клапейрон теңдеуінен анықталады (9):

$$p_i = \frac{(\rho_l - \rho_i) p_0 + \rho_i \rho_l L \ln \left(\frac{T}{T_{ph}} \right) - \rho_i p_l}{\rho_l}, \quad (9)$$

мұнда L – судың кристалдануының ерекше жылуы;

p_0 – бастапқы кеук қысымы.

(7) және (9) қатынасынан судың қысымын кеук қысымы мен температураға байланысты (10) формула бойынша есептеуге болады:

$$p_l = \frac{(1 - \chi)(\rho_l - \rho_i) p_0 + (1 - \chi) \rho_i \rho_l L \ln \left(\frac{T}{T_{ph}} \right) + \rho_l p}{\chi \rho_l + (1 - \chi) \rho_i}, \quad (10)$$

Жылу алмасу теңдеуі. Жылу алмасу теңдеуі жылу өткізгіштік және конвекция механизмдері, сондай-ақ су кристалданған кезде жылу шығару арқылы жылу тасымалын ескере отырып, энергияны сақтау заңынан алынады [8]. Содан кейін жылу алмасу теңдеуін тәуелділік түрінде жазамыз (11):

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + C_l v_l \cdot \operatorname{grad} T = Q_{ph}, \quad (11)$$

мұнда C – көлемдік жылу сыйымдылығы;

λ – үш фазалы кеукті ортаның жылу өткізгіштік коэффициенті;

C_l – судың көлемдік жылу сыйымдылығы;

Q_{ph} – судың мұзға фазалық ауысуының жасырын жылуымен байланысты жылу көзі.

Жылу көзі (12) формула бойынша анықталады:

$$Q_{ph} = L \rho_i \frac{\partial (n S_i)}{\partial t}. \quad (12)$$

Көлемдік жылу сыйымдылығы өрнекке сәйкес қоспаның ережесі негізінде есептеледі (13):



$$C = (1 - n)\rho_s c_s + n(S_l \rho_l c_l + S_i \rho_i c_i), \quad (13)$$

мұнда c_j – тұрақты қысымдағы фазаның меншікті жылу сыйымдылығы.

Жылу өткізгіштік коэффициенті орташа қуат коэффициенті негізінде есептеледі (14):

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \lambda_l^{n S_l} \lambda_i^{n S_i}, \quad (14)$$

мұнда λ_j – фазаның жылу өткізгіштік коэффициенті $j(j = s, l, i)$.

Тепе-теңдік теңдеуі. Кеуек механикасы мен импульстің сақталу заңдарынан қаныққан кеуекті орта үшін тепе-теңдік теңдеуін толық кернеу тензорына қатысты (15) түрінде жазуға болады:

$$\operatorname{div} \sigma + \gamma = 0, \quad (15)$$

мұнда γ – кеуекті ортаның үлес салмағы.

Кеуекті ортаның үлес салмағы формула бойынша анықталады (16):

$$\gamma = [(1 - n)\rho_s + n(S_l \rho_l + S_i \rho_u)]g, \quad (16)$$

мұнда ρ_s – топырақ бөлшектерінің тығыздығы.

Өз кезегінде, толық кернеу тензоры (17) формуласы бойынша тиімді қатты қаңқа кернеу тензоры және кеуек қысымы арқылы болуы мүмкін:

$$\sigma = \sigma' - b p I, \quad (17)$$

мұнда I – бірлік тензор;

b – тиімді Био коэффициенті.

Тиімді кернеу тензоры қатынастан сызықты серпімді изотропты материал үшін Гук заңы негізінде анықталады (18):

$$\sigma' = \left(K - \frac{2}{3} G \right) \varepsilon_{vol}^{el} I + 2G \varepsilon^{el}, \quad (18)$$

мұнда K – тиімді көлемді модуль;

G – тиімді жылжу модулі,

ε^{el} – серпімді деформация тензоры;

ε_{vol}^{el} – көлемді серпімді деформацияның шамасы.

Толық деформация тензорының аддитивті ыдырау принципіне сәйкес серпімді деформация тензоры (19) формуласы бойынша анықталады:

$$\varepsilon^{el} = \varepsilon - \varepsilon^{th} - \varepsilon^{in}, \quad (19)$$

мұнда ε^{th} – температураның деформациясы тензоры.

Толық деформация тензоры (20) түріндегі шағын деформациялар үшін геометриялық қатынастан анықталады:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\operatorname{grad}(u) + \operatorname{grad}(u)^T), \quad (20)$$

мұнда u – қозғалыс векторы.

Температураның деформациясы тензоры (21) формуласы бойынша анықталады:

$$\varepsilon^{th} = \alpha_T (T - T_0) I, \quad (21)$$



мұнда α_T – температураның кеңею коэффициенті;

T_0 – мұздатылмаған топырақтың бастапқы температурасы.

Тиімді кеуек қысымын есептеу күй теңдеуінде жүзеге асырылады, О. Кусси (Coussy, 2004) [9] формуласы бойынша (22):

$$p = N(n - n_0 - b\varepsilon_{vol}^{el} + 3\alpha_T(b - n_0)(T - T_0)), \quad (22)$$

мұнда n_0 – топырақтың бастапқы кеуектілігі;

N – тиімді тангенс Био модулі.

Тиімді механикалық параметрлер (23) формула бойынша анықталады:

$$X = S_i X_{fr} + S_l X_{un}, \quad (23)$$

мұнда X – параметрдің тиімді мәні;

X_{fr} и X_{un} – топырақтың мұздатылған және мұздатылмаған аймақтарындағы параметрлердің мәндері сәйкесінше.

Теңдеулердің дивергентті формасын сақтай отырып, біз олардың жүйесін аламыз (24):

$$\begin{cases} \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_Q + L_\rho I_F \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_W - I_F \\ \frac{\partial(wC)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_C - k_{zax} C I_F - I_A, \end{cases} \quad (24)$$

мұнда I_A – топырақ кеуектерінің бетіндегі иондардың адсорбция көрсеткіші;

$I_F = -\partial m / \partial t$ – су-мұздың фазалық өзгеруіне байланысты ылғал ағыны;

k_{zax} – тұздардың (иондардың) түсу коэффициенті.

Ағындар формулаларға сәйкес анықталады (25-27):

$$J_W = -K \frac{\partial w}{\partial x} + K \delta_{CW} \frac{\partial C}{\partial x} - K \delta_{TW} \frac{\partial T}{\partial x} J_Q + V_f = J_W^m + V_f, \quad (25)$$

$$J_C = -W D_C \frac{\partial C}{\partial x} + C J_W = J_C^m + C V_f, \quad (26)$$

$$J_Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + c_w \rho_w T J_W = J_Q^m + c_w \rho_w T V_f, \quad (27)$$

мұнда λ , K , D_C , c , ρ – жылу өткізгіштік коэффициенттері, ылғал диффузиясы, тұз диффузиясы, жылу сыйымдылығы және тығыздығы сәйкесінше;

V_f – кеуекті материалдағы ылғалды сүзу жылдамдығы;

δ_{TW} , δ_{CW} – кросс-эффектілерді ескеретін коэффициенттер [10].

Жылу массасын тасымалдаудың бастапқы мәселесін шешуді ішкі есептерді дәйекті шешу түрінде ұсынуға болады:

– диффузиялар-теңдеулер жүйесі (28):

$$\begin{cases} \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_Q^m \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_w^m \\ \frac{\partial(wC)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_C^m; \end{cases} \quad (28)$$

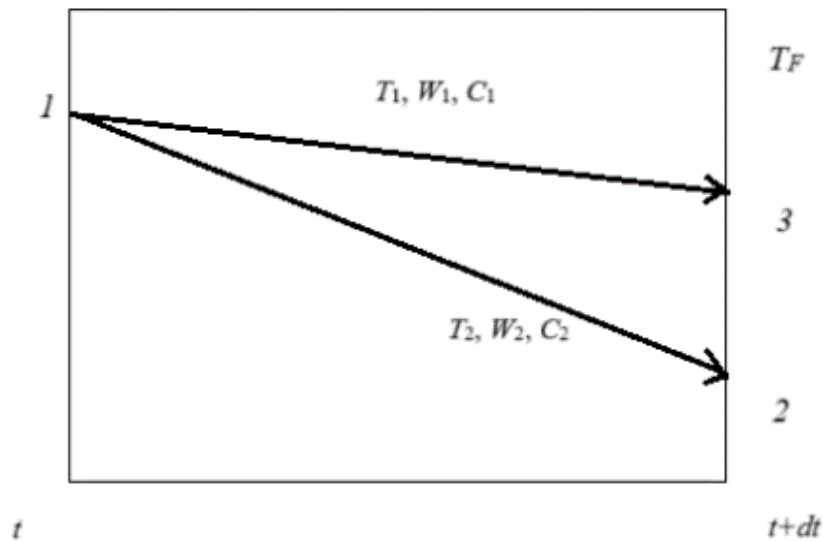
– фазалық ауысу-теңдеулер жүйесі (29):

$$\begin{cases} \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = L_\rho I_F \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -I_F \\ \frac{\partial(wC)}{\partial t} = -k_{\text{зах}} C I_F. \end{cases} \quad (29)$$

Жүйенің массалық тепе-теңдік теңдеулерін шешу (29) уақыттың әр қадамында (30):

$$w_2 = w_1 + \Delta m, \quad C_2 = C_1 + \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^{1-k_{\text{зах}}}. \quad (30)$$

Іс-әрекеттің одан әрі барысы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. Жылу-масса алмасудың бөлінген процестерін есептеу диаграммасы
Ескерту – авторлар Кудрявцев, С.А, 2015 деректері негізінде құрастырған

1-суретте өтулер (1-2), $T_1 \rightarrow T_2$ жүйенің шешімімен анықталады (28), ауысу (2-3), $T_2 \rightarrow T_F$ – жүйенің шешімі (29).

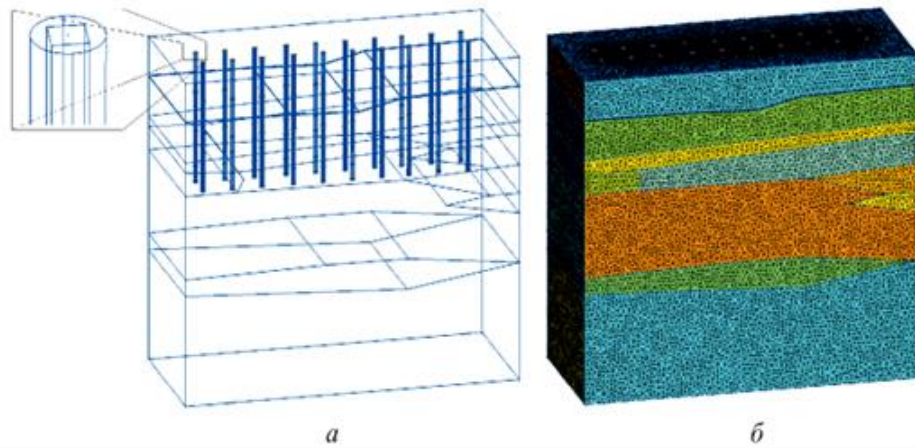
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Сипатталған термогидродинамикалық модель негізінде келесі шарттар үшін «қадалар – маусымдық мұздатылған топырақ» жүйесінде жылу массасын беру есебі жүргізілді:

– топырақ параметрлері: еру аймағы үшін $\rho_j = 2,722 \cdot 10^6$, $\lambda_j = 1,94$; фазалық ауысу үшін $\rho_L = 125,532 \cdot 10^6$, $\delta = 1,0$; мұздату аймағы үшін $\rho_i = 2,052 \cdot 10^6$, $\lambda_j = 2,14$ [12];



- геометриялық аймақта 20 қадалар бар (2-сурет); қадалардың өлшемдері қабылданды: $r = 0,2$ м, ұзындығы 14 м;
- қадалар жүйесінің есептік параметрлері ретінде параметрлер қолданылды: $\nu T = 1,0$, $\rho r c p = 1,763 \cdot 10^6$, $R = 0,05$;
- сандық модельдеу $LX = 15$ м, $Ly = 54$ м, $LZ = 50$ м көлемі бойынша жүргізілді;
- тұрақты температурасы 20 °С болатын Дирихлеттің шекаралық шарты берілген;
- есептеулер $t_{max} = 2$ жыл, $\tau = 1$ күн қадамымен жүргізілді;
- топырақтың бастапқы температурасы қабылданды – 4 °С;
- зерттелетін облыстың жоғарғы шекарасындағы температура Өскемендегі ауаның ауытқу амплитудасын ескере отырып ҚР БК 2.04-01-2017 сәйкес – 49 °С-тан (абсолютті минимум) $+43$ °С-қа дейін (абсолютті максимум) беріледі.



2-сурет. Есептелген геометрия (а) және тетраэдрлік тор (б) жылу беру мәселесі үшін топырақта 20 қаданы орнату

Ескерту – авторлар Васильев, В.И., 2021 деректері негізінде құрастырған

Қолданбалы модельдеу кезінде, тіпті айтарлықтай біркелкі емес есептеу торларын пайдаланған кезде де, жылу беру тапсырмасының өлшемі айтарлықтай үлкен болатынын ескеріңіз. Мысалы, біздің жылу массасын тасымалдау міндетіміз үшін есептік торда 260 мың түйін, шамамен 1,5 миллион тетраэдральды ұяшықтар бар. Параллель архитектураның есептеу жүйелерін қолданбай мұндай есептерді сандық шешу мүмкін емес.

Алайда, біз қолданатын алгоритм кеңістіктік тор ұяшықтарындағы көзді орташа-лауға байланысты емес және көп аймақтық пен көп өлшемді есептерге жалпылауға мүмкіндік береді. Тест тапсырмасын нақты шешуден есептеу нәтижелерінің ауытқуы 2-2,5 %-дан аспайды.

Гетерогенді мұздың жиналуын әртүрлі жолдармен түсіндіруге болады. В.И. Попов «алдыңғы қатудың тербеліс кезеңдерін оның белгілі бір орташа мәнге жақын тоқтауы ретінде түсіндіруге болады» деп санайды (Попов, 2021). Алайда, Э.Д. Ершовтың (Ершов, 1985), с. Краучтың (Крауч, 1992) және басқалардың еңбектерінен майданның тоқтауы осы зерттеуде алынған ылғалдың жиналуына әкеледі.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері бойынша бірнеше тұжырым жасаған жөн:

- жылу массасын тасымалдаудың қадаларға әсер ету сипатын зерттеу үшін үш сызықтық емес теңдеулер жүйесін (масса алмасу теңдеуі, жылу беру теңдеуі және тепе-теңдік теңдеуі) қамтитын термогидродинамикалық модель қолданылады;



– топырақты мұздату-еріту кезінде дисперсті құрамдағы жылу, ылғал және тұздарды тасымалдаудың математикалық моделі фазалық тепе-теңдікті, диффузиялық ағындардың өзара әсерін және конвективті тасымалдауды анықтайтын параметрлер арасындағы функционалдық қатынасты ескере отырып тұжырымдалған

– жылу массасын беру сипаты мұздың жиналуының жоғарылауын көрсетеді, бұл маусымдық мұздатылған топырақтың біркелкі емес ҚҚС-на әкеледі; осы ерекшеліктерді ескеру қадалардың іргетастарының тұрақтылығы мен сенімділігін болжау үшін практикалық маңызға ие.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар ұжымы эксперименттік жұмыстарды жүргізу үшін ұсынылған зертханалық база үшін А.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «ENU-Lab» ғылыми-өндірістік орталығына алғысын білдіреді. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің Ғылым комитеті бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру шеңберінде қаржыландырады (BR21882278 Қазақстан Республикасының құрылыс, жол-құрылыс секторының аккредитацияланған қызметтерінің толық циклін көрсету бойынша құрылыс-техникалық инжинирингтік орталық құру).

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- СП РК 2.04-01-2017. Строительная климатология. – Справ. прав. система «Параграф». – URL: <https://online.zakon.kz//> SP RK 2.04-01-2017. Stroitel'naya klimatologiya. – Sprav. prav. sistema «Paragraf». – URL: <https://online.zakon.kz> [Building climatology] (In Russ.)
- Невзоров, А.Л. (2022). Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах: учеб. пособие. – М.: АСВ, 152 с. // Nevzorov, A.L. (2022). Fundamenty na sezonnopromerzayushchikh gruntakh: ucheb. posobie. – Moscow: ASV, 152 p. [Foundations on seasonally frozen soils] (In Russ.)
- Короткий, А.И. (2020). Теория теплопереноса. Моделирование граничных задач: учебное пособие для вузов. – Москва. – ISBN 978-5-534-07571-7. – URL: <https://urait.ru/bcode/454665> // Korotky, A.I. (2020). Teoriya teplomassoperenosa. Modelirovanie granichnykh zadach: uchebnoe posobie dlya vuzov. – Moscow. ISBN 978-5-534-07571-7. – URL: <https://urait.ru/bcode/454665> [Theory of heat and mass transfer. Modeling boundary value problems] (In Russ.)
- Вабищевич, П.Н. (2014). Численное моделирование термостабилизации фильтрующих систем. Т. 26, № 9, 111–125// Vabishevich, P.N. (2014). Chislennoye modelirovanie termostabilizatsii filtruyushchikh sistem. Vol. 26, No. 9, 111–125 [Numerical modeling of thermal stabilization of filtration systems] (In Russ.)
- СП РК 5.01-103-2013. Свайные фундаменты (с доп. от 18.03.2021 г.). – URL: <https://online.zakon.kz//> SP RK 5.01-103-2013. Svaynye fundamenty (s dop. ot 18.03.2021 g.). – URL: <https://online.zakon.kz> [Pile foundations] (In Russ.)
- Скворцов, Д.С. (2019). Способы борьбы с морозным пучением сезоннопромерзающих грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений. – URL: <https://esj.today/PDF/85SAVN519//> Skvortsov, D.S. (2019). Sposoby borby s moroznym pucheniem sezonnopromerzayushchikh gruntov v osnovaniyakh fundamentov zdaniy i sooruzheniy. – URL: <https://esj.today/PDF/85SAVN519> [Methods of combating frost heaving of seasonally frozen soils in building foundations] (In Russ.)
- Карташов, Э.М. (2018). Теория теплопереноса: решение задач для многослойных конструкций: учеб. пособие для бакалавриата, специалитета и магистратуры. – М.: Юрайт, 435 с. // Kartashov, E.M. (2018). Teoriya teplomassoperenosa: reshenie zadach dlya mnogoslonykh konstruktsiy: ucheb. posobie dlya bakalavriata, spetsialiteta i magistratury.



- Moscow: Yurayt, 435 p. [Theory of heat and mass transfer: solving problems for multilayer structures] (In Russ.)
- Coussy, O. (2004). Poromechanics. – URL: <https://libcats.org/book/10002508>
- Крайнов, А.Ю. (2023). Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. пособие. – Томск: СТТ, 92 с. // Krainov, A.Yu. (2023). Chislennyye metody resheniya zadach teplo- i massopere-nosa: ucheb. posobie. – Tomsk: STT, 92 p. [Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer] (In Russ.)
- Васильев, В.И., Попов, В.И., Попов, В.В. (2021). Численное решение задачи промерзания грунта. Математическое моделирование, Т. 20, № 5, 121–130// Vasiliev, V.I., Popov, V.I., Popov, V.V. (2021). Chislennoye reshenie zadachi promerzaniya grunta. Matematicheskoye modelirovanie, Vol. 20, No. 5, 121–130 [Numerical solution of the soil freezing problem] (In Russ.)
- Кудрявцев, С.А. (2015). Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания морозоопасных грунтов. – СПб.: АСВ, 52 с. // Kudryavtsev, S.A. (2015). Geotekhnicheskoye modelirovanie protsesssa promerzaniya i ottayvaniya morozopasnykh gruntov. – St. Petersburg: ASV, 52 p. [Geotechnical modeling of freezing and thawing of frost-prone soils] (In Russ.)
- СП РК 2.03-101-2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. – Справ. прав. система «Параграф». – URL: <https://online.zakon.kz/> // SP RK 2.03-101-2012. Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvayemykh territoriyakh i prosadochnykh gruntakh. – Sprav. prav. sistema «Paragraf». – URL: <https://online.zakon.kz/> [Buildings and structures in workable areas and subsiding soils] (In Russ.)
- Попов, В.И. (2021). Решение задач тепломассопереноса при промерзании–оттаивании горных пород с учетом уравнения фазового состояния поровой влаги. ГИАБ, тематическое приложение «Физика горных пород», 236–242// Popov, V.I. (2021). Reshenie zadach teplomassopere-nosa pri promerzanii–ottayvanii gornykh porod s uchyotom uravneniya fazovogo sostoyaniya porovoy vlagi. GIAB, tematicheskoe prilozhenie “Fizika gornykh porod”, 236–242 [Solving problems of heat and mass transfer during freezing and thawing of rocks, considering the phase state of pore moisture] (In Russ.)
- Ершов, Э.Д. (1985). Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах. – М.: МГУ, 167 с. // Ershov, E.D. (1985). Deformatsii i napryazheniya v promerzayushchikh i ottayvayushchikh porodakh. – Moscow: MSU, 167 p. [Deformations and stresses in freezing and thawing rocks] (In Russ.)
- Крауч, С., Старфилд, А. (1992). Методы граничных элементов в механике твёрдого тела. – 328 с. // Crouch, S., Starfield, A. (1992). Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdotogo tela. – 328 p. [Boundary element methods in solid mechanics] (In Eng.)
- Васильев, В.И., Васильева, М.В., Сирдитов, И.К., Степанов, С.П., Цеева, Н. (2017). Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки, № 1, 142–159// Vasiliev, V.I., Vasilyeva, M.V., Sirditov, I.K., Stepanov, S.P., Tseeva, N. (2017). Matematicheskoye modelirovanie temperaturnogo rezhima gruntov osnovaniy fundamentov v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod. Vestnik MSTU im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennye nauki, No. 1, 142–159 [Mathematical modeling of the temperature regime of foundation soils in permafrost conditions] (In Russ.)



Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Мусаханова Салтанат Татарбековна – техника ғылымдарының магистрі, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ, Астана қ., Қазақстан, Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

Мусаханова Салтанат Татарбековна – магистр технических наук, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана Казахстан, Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан

Mussakhanova Saltanat Tatarbekovna – master’s degree, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan.

E-mail: musaxanova.saltanat@mail.ru,

ORCID:0009-0007-0680-6290, +7 7054405529



Лукпанов Рауан Ермагамбетович – PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ, Астана қ., Қазақстан

Лукпанов Рауан Ермагамбетович – PhD, профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана Казахстан

Lukpanov Rauan Ermagambetovich – PhD, professor, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan

E-mail rauan_82@mail.ru

ORCID:0000-0003-0085-9934,



Сарсембаева Асель Сериковна – т.ғ.к., PhD, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан

Сарсембаева Асель Сериковна – к.т.н., PhD, Университет Шакарима, г. Семей, Казахстан

Sarsembayeva Assel Serikovna – PhD (UK), professor, Shakarim University, Semey, Kazakhstan

E-mail: a.sarsembayeva@shakarim.kz, +77078503035

ORCID:0000-0001-7516-6775,



Абишева Асем Кайратовна – PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ, Астана қ., Қазақстан

Абишева Асем Кайратовна – PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана Казахстан

Abisheva Assem Kairatovna – PhD, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan

E-mail abish, +77782222092

ORCID:0000-0002-9797-1940



Кудрышова Баян Чакеновна – т.ғ.к., Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

Кудрышова Баян Чакеновна – к.т.н., Торайғыров университет, г. Павлодар, Казахстан,

Kudryshova Bayan Chakenovna – Candidate of Technical Sciences, Toraighyrov university, Pavlodar, Kazakhstan

E-mail: bkudryshova@mail.ru, +7 701 393 4776

ORCID: 0000-0001-5366-8512