BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-B/2009
ZESZYT 5
ROK 106
ISSUE 5
YEAR 106

IRENA ICKIEWICZ*

ANALIZA ZJAWISKA WYSADZINY ZMARZLINOWEJ DLA CELÓW INŻYNIERSKICH

ANALYSIS OF FROST HEAVE FENOMENON FOR ENGINEERING PURPOSES

Streszczenie

W artykule przedstawiono stan wiedzy na temat teorii powstawania wysadziny, najbardziej znane modele obliczeniowe oraz metody zapobiegania przed wysadziną.

Słowa kluczowe: *wysadzina*, *modele obliczeniowe*, *metody zapobiegania*

Abstract

This work presents state of the art regarding theory of frost heave formation, the most known computational models, the methods of prevention against frost heaves.

Keywords: *frost heave*, *computational models*, *prevention methods*

* Dr inż. Irena Ickiewicz, Katedra Podstaw Budownictwa i Ochrony Budowli, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka.

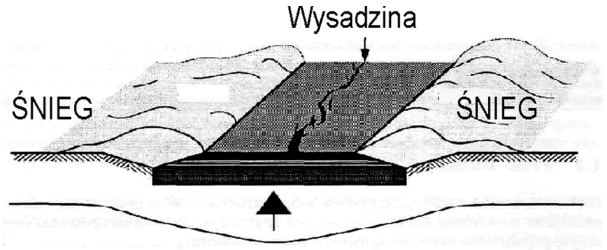
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Wysadzina – zjawisko polegające na podnoszeniu się ku górze powierzchni przemarzającej gruntu spoistego (gliny, iłu) wskutek kapilarnego podciągu wody gruntowej do strefy przemarzania.

W zurbanizowanych zimnych regionach świata oddziaływanie mrozu w gruncie spowodowało problemy głównie w budownictwie i budownictwie drogowym; zniszczone są nawierzchnie dróg, lotnisk, kolei, rurociągi, fundamenty budynków itp.

Wysadzina gruntowa (zmarzlinowa) powstaje na skutek kolejno tworzących się soczewek lodu w podłożu gruntu. Niejednolite przenikanie mrozu powoduje zróżnicowane „wielkości" wysadziny. Często zdarza się to, gdy pobocza drogi przykryte są śniegiem, więc mróz najgłębiej przenika w środku drogi i dlatego wysadzina w tym miejscu jest największa. Wynikiem zniszczenia są podłużne pęknięcia na środku drogi (rys. 1). Zróżnicowane wielkości wysadziny mogą również powodować zniszczenie (pęknięcie) fundamentów budynków.



Rys. 1. Podłużne pęknięcia spowodowane wysadziną zmarzlinową w podłożu
Fig. 1. Longitudinal cracks caused by frost heave of subgrande soils

Niszczycielskim aspektem oddziaływania mrozu w gruncie, poza wysadziną, jest osłabienie (rozmiękczenie) podłoża gruntowego spowodowane odwilżą w okresie wiosennym i jest związane z nadmiarem wody w porach gruntu na skutek topnieniem soczewek lodu.

Na stopień osiadania podłoża, występującego podczas odwilży, mają wpływ nie tylko temperatura odwilży, warunki odpływu i fizyczne właściwości gleby, ale również charakterystyka zamarzania gruntu, np. ilość lodu i głębokość zamarzania gruntu. Stąd wiedza o procesach zamarzania jest niezbędna do oceny stopnia osłabienia nawierzchni spowodowanej odwilżą.

Teoretyczne rozważania procesu oddziaływania mrozu na grunt, oparte na zasadach termodynamiki, pozwalają na zrozumienia tego zjawiska oraz przewidywania następstw spowodowanych przez nie. Odpowiednie narzędzia szacowania wysadziny są istotne przy projektowaniu skutecznej izolacji termicznej chroniącej przed uszkodzeniami konstrukcji fundamentów, nawierzchni dróg itp.

2. Aktualny stan wiedzy dotyczący powstawania wysadzin

Pierwsze ilościowe wyjaśnienia zjawiska wysadzin zmarzlinowych stworzono na podstawie teorii kapilarnej, która formalnie została opracowana przez Everetta [1]. Siłę zasy-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

sającą zdefiniowano jako różnicę w naporze fazowym i określono równaniem nacisku powierzchniowego

$$u_i - u_w = \frac{2\sigma_{iw}}{r_{iw}} \tag{1}$$

gdzie:

U_i – nacisk lodu,
U_w – napór wody w stanie ciekłym,
$2\sigma_{iw}$ – graniczne natężenie granicy lodu i wody,
r_{iw} – promień krzywizny granicy lodu i wody.

Według teorii kapilarnej, soczewki lodu spoczywające na warstwach przemieszczającej się wody przyjętej przez powierzchnie minerałowe mogą się powiększać jedynie na czole zmarzliny. Jeżeli promień krzywizny r_{iw} granicy lodu i wody jest większy niż promień rzeczywisty r_p porów gruntu, to czoło zmarzliny pozostaje nieruchome, a soczewki lodu powiększają się, zasysając i zamrażając wodę z niezamarzniętej części. Jeśli r_{iw} jest mniejsze niż r_p, soczewki lodu nie powiększają się, ale wypełniają pory gruntu. Na podstawie tej teorii można wyjaśnić, dlaczego zwykłe grunty, które mają duże pory nie są podatne na zamarzanie [2].

Jednak za pomocą teorii kapilarnej nie można wytłumaczyć, w jaki sposób tworzą się nowe soczewki lodu w odległości poniżej istniejących soczewek. Skoro ciśnienie w porach u_w poniżej istniejących soczewek jest ujemne, wówczas nacisk rzeczywisty tam istniejący byłby wyższy niż całkowity nacisk nakładu.

Z powodu braku możliwości zastosowania teorii kapilarnej w przewidywaniu powstawania kolejnych soczewek lodu, Miller [3] uznał, że lód w porach zamarzniętego częściowo gruntu jest silnie połączony z powiększającymi się soczewkami lodu i porusza się razem jako nienaruszalna całość z prędkością równą tempu wysadzinowości. Podobieństwo powierzchni mineralnych sprawia, że woda w stanie ciekłym, istniejąca jako warstwy wokół stałych cząstek ułatwia przemieszczanie się wilgoci, która z kolei po zamarznięciu zasila przemieszczający się lód. Zjawisko to określono jako *zmarznięte obrzeże*. Mechanizm powstawania soczewek lodu związany z istnieniem zmarzniętego obrzeża nazwano *wysadzinowością wtórną*, natomiast teoria kapilarna nosi nazwę *wysadzinowości pierwotnej* [2].

2.1. Modele obliczeniowe

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty tego zjawiska, trudno przedstawić przegląd wszystkich istniejących teorii i modeli dotyczących wysadziny zmarzlinowej. Poniżej omówiono reprezentacyjną linię rozwoju badań nad wysadziną zmarzlinową.

Najbardziej znane modele wysadziny zmarzlinowej to:

- **model hydrodynamiczny** (uznany za zbyt uproszczony, by mógł być użyty do określenia wysadziny),
- **model twardego lodu** (uznany za zbyt skomplikowany, by skutecznie go rozwiązać i zastosować w praktyce).

2.1.1. Model hydrodynamiczny – sprzężone ciepło i przenikanie masy

Model został opracowany przez Harlana [4] jako model sprzężonego procesu przenikania ciepła i masy w zamarzających gruntach. W modelu zastosowano dwa równania

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

różniczkowe cząstkowe w kategoriach temperatury, zawartości wody (lodu) czy nacisku wody, aby opisać przejściowy proces przepływu ciepła i wody w zamarzających gruntach. Te dwa równania połączone są albo przez wskaźnik zmiany fazy lód–woda, albo przez charakterystyczny związek pomiędzy zawartością niezamarzniętej wody i temperatury, albo przez specjalną formę równania Clapeyrona z naciskiem lodu równym zeru (opisywane równania można znaleźć w poz. [1] s. 14–18). Przyjmuje się, że siła kierująca przemieszczaniem się wilgotności jest gradientem nacisku wody lub zawartości wody, która znalazła się tam z powodu zamarzania. Jeśli wziąć pod uwagę wysadzinę zmarzlinową, przyjmuje się, że powstaje ona w każdym miejscu, w którym przepływ wody wytworzył zawartość lodu większą niż wartość krytyczna, która zwykle zawiera się między 85 a 90% porowatości gruntu. Modele z takimi cechami określane są ogólnie jako modele hydrodynamiczne. Mimo że model hydrodynamiczny jest zbyt prosty, aby opisać zjawisko wysadziny zmarzlinowej, może on jednak wyjaśnić niektóre z podstawowych pojęć ciepła sprzężonego i przenikania masy w zamarzających gruntach [4].

2.1.2. Model twardego lodu – tworzenie się soczewek lodu

Aby wyjaśnić zjawisko powstawania pojedynczych soczewek lodu przy tworzeniu się wysadziny wykorzystano teorię istnienia zamarzniętego obrzeża pomiędzy ostatnio powstałymi (rosnącymi) soczewkami lodu. Lód w porach obrzeża jest sztywno połączony z rosnącymi soczewkami i porusza się ku górze jako nienaruszalna całość z prędkością równą prędkości wysadziny. Zakończenie ruchu lodu dokonuje się dzięki procesowi znanemu jako *regelacja* (regelacja – łac. przymarzanie lodu). Zjawisko polega na stopieniu lodu pod wpływem zwiększonego ciśnienia i powtórnym zamarznięciu powstałej wody przy obniżeniu ciśnienia do pierwotnej wartości. Powodowane jest ono zmniejszaniem się temperatury topnienia lodu przy zwiększonym ciśnieniu. Zjawiskiem regelacji tłumaczy się m.in. powolne przesuwanie się lodowców.

Zjawisko regelacji odkryte przez Faradaya dotyczy nie tylko lodu, ale wszystkich substancji, których objętość zwiększa się podczas krzepnięcia.

Temperatura, nacisk wody i nacisk lodu powiązane są ze sobą równaniem Clapeyrona.

W praktyce inżynierskiej zastosowanie modelu **twardego lodu** jest praktycznie niemożliwe ze względu na dużą liczbę parametrów fizycznych, które nie zawsze są dostępne, a są to m.in.: zawartość niezamarzniętej wody W i przewodność hydrauliczna k (W) zmarzniętego obrzeża.

2.2. Metody numeryczne

Do rozwiązywania skomplikowanych modeli opisujących zjawisko wysadziny od kilkunastu lat stosuje się metody numeryczne. Najbardziej efektywna jest metoda elementów skończonych, która charakteryzuje się optymalną zbieżnością i stabilnością. Pozwala przestudiować zjawiska pod względem ilościowym, co ma istotne znaczenie dla celów inżynierskich [4]. Warunkiem niezbędnym do rozwiązania równania przepływu ciepła i masy z zastosowaniem metod numerycznych jest zdefiniowanie (podanie) odpowiednich warunków początkowych i granicznych, jak również parametrów fizycznych.

Równania opisujące zjawisko wysadziny, poza konwekcyjną i dyfuzyjną – cechą równań sprzężonych, charakteryzują się wysoką nieliniowością temperatury i nacisku wody, przemieszczającą się granicą wewnętrzną przy zmianie etapów i deformującą się siatką

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

związaną z symulacją wysadziny zmarzlinowej, co bardzo komplikuje prace dotyczące oprogramowania wyliczeń.

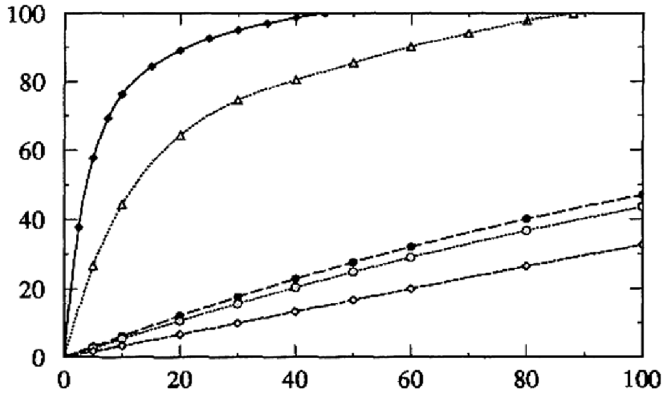
Biorąc powyższe pod uwagę, należy uważać, aby standardowe metody numeryczne nie spowodowały znaczącego spadku dokładności obliczeń, w szczególności gdy rozmiar siatki nie jest dobrze dobrany do analizowanego zadania. Stąd też skuteczne rozwiązania numeryczne są bardziej skomplikowane niż jak zakładało wielu twórców modelu wysadziny zmarzlinowej [1].

3. Efektywność materiałów izolacyjnych w redukcji wysadzin zmarzlinowych

Ze względu na niszczycielski charakter zjawiska wysadziny jedną z metod zapobiegania uszkodzeniom, np. konstrukcji drogi lub fundamentów budynku, jest ułożenie warstwy izolacyjnej (materiału nieprzepuszczającego mrozu). Aby zredukować głębokość przemarzania i ilość wysadziny, warstwę taką układa się w obrębie warstwy nośnej dolnej nawierzchni drogi lub fundamentu. W tym celu używa się różnorodnych materiałów izolacyjnych, np. ekstrudowanego polistyrenu, porowatych kul glinianych, wilgotnej kory, sprasowanego torfu.

3.1. Ocena efektywności materiałów najczęściej używanych w praktyce

Zamieszczony (rys. 2) przykład dotyczy redukcji wysadziny jaka powstała po 100 dniach od momentu zamarzania przy następujących warunkach brzegowych: temperatura powierzchni gruntu wynosi od –5 do –15°C, natomiast na głębokości 4 m temperatura pozostaje stała na poziomie 3°C [1]. Podano redukcję wysadziny dla różnej grubości izolacji.



Oś pionowa – redukcja wysadziny [%]; oś pozioma – grubość izolacji [cm]; od góry: izolacja syntetyczna, porowate kule gliniane, kora, torf, piasek; przyjęty wskaźnik mrozowy 1000 stopniodni

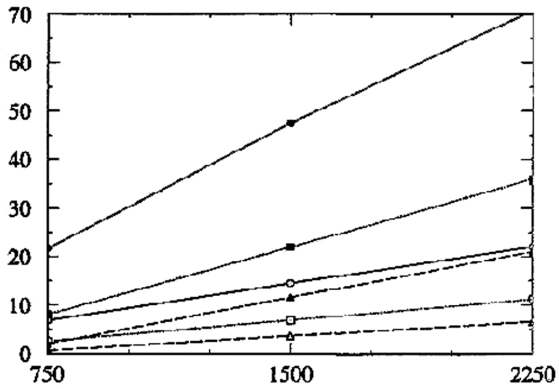
Rys. 2. Zredukowana wysadzinowość w zależności od grubości izolacji dla różnych zamierzonych wskaźników mrozu
Fig. 2. Heave reduced versus thickness of insulation for different design freezing indices

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Różnica pomiędzy ilością wysadziny z i bez izolacji została sporządzona dla wartości wskaźnika mrozowego wynoszącego 1000 stopniodni (ekstremalne warunki klimatyczne dla Polski). Najbardziej efektywnymi materiałami izolacyjnymi okazały się izolacje syntetyczne (porowaty polistyren) i porowate kule gliniane. Wilgotna kora oraz sprasowany torf powodują podobną redukcję powstawania wysadzin, jednak są zdecydowanie mniej efektywne w stosunku do izolacji syntetycznych.

Na rysunku 3 grubość warstwy izolacyjnej przedstawiono w formie wykresu w zależności od wskaźnika mrozowego (750, 1500 i 2250 stopniodni) dla różnych zamierzonych wartości wysadzin (5, 10 i 15 cm). Można zaobserwować, że grubość izolacji wzrasta prawie liniowo wraz ze wzrostem wskaźnika mrozowego. Pochylenie linii zależy od profilu gruntu i jego właściwości. Stąd zamieszczony przykład odnosi się tylko do konkretnej konstrukcji, w analizowanym przypadku jest to płyta nośna 30 cm, 10 cm warstwa żwiru, woda gruntowa na poziomie 1,5 m.

Wykres pokazany na rys. 3 stosuje się do oszacowania efektywności izolacji.



Oś pionowa – grubość izolacji [cm]; oś pozioma – wskaźnik mrozowy; od góry: izolacja syntetyczna, porowate kule gliniaste, kora, torf, piasek

○ – przyjęta wysadzina 5 cm (izolacja syntetyczna, $\lambda = 0{,}04$ W/mK),

● – przyjęta wysadzina 5 cm (porowate kule gliniane, $\lambda = 0{,}35$ W/mK),

□ – przyjęta wysadzina 10 cm (izolacja syntetyczna),

■ – przyjęta wysadzina 10 cm (porowate kule gliniane),

Δ – przyjęta wysadzina 15 cm (izolacja syntetyczna),

▲ – przyjęta wysadzina 15 cm (porowate kule gliniane).

Rys. 3. Grubość izolacji w zależności od wskaźnika mrozowego dla różnych zamierzonych wartości wysadziny
Fig. 3. Thickness of insulation versus frezing index for different design values of heave

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zalecaną izolację i jej grubość jako ochronę przed wysadziną głównie nawierzchni drogowych. Zestawione na rys. 2 wykresy redukcji wysadziny w zależności od rodzaju i grubości izolacji oraz na rys. 3 – zależność rodzaju i grubości izolacji od założonego rozmiaru wysadziny (5, 10, 15 cm) i wskaźnika mrozo-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wego (od 750 do 2250) zostały zaczerpnięte z [2, s. 116–117]. W przypadku rys. 2 podane wartości dotyczą tylko ekstremalnych warunków klimatycznych jakie mogą wystąpić w Polsce, tzn. wskaźnika mrozowego wynoszącego ~1000 stopniodni temperatur ujemnych (liczonych wg metody norweskiej).

Ponadto, autorka niniejszego artykułu w pracy [6], na podstawie wykonanych przez nią obliczeń numerycznych, przedstawiła efektywność różnych wariantów dociepleń (ochrony przez wysadziną) fundamentów budynków.

4. Podsumowanie i wnioski

1. Główne czynniki mające wpływ na powstawanie wysadziny to: temperatury na granicy zamarzania, przepuszczalność gruntu i zawartość nie zamarzniętej wody w temperaturach poniżej punktu zamarzania.
2. Najbardziej znane modele opisujące zjawisko wysadziny to: model hydrodynamiczny, który zajmuje się ciepłem sprzężonym i przepływami wody, według badaczy nie jest wystarczająco precyzyjny, by mógł być użyty w przewidywaniu wysadziny (nie symuluje tworzenia się soczewek lodu), i model sztywnego lodu stworzony na podstawie mikroskopijnych mechanizmów rządzących wysadziną zawierający skomplikowany system równań i parametrów trudnych do określenia.
3. Pomimo dość obszernej wiedzy dotyczącej zjawiska wysadziny ciągle brakuje skutecznego rozwiązania numerycznego dla modeli wysadzin zmarzlinowych z powodu wysokiego stopnia nieliniowości, połączonej konwekcji i przewodnictwa, przemieszczania się granic wewnętrznych oraz zniekształcenia siatki.
4. Aktualnie prowadzone są prace nad uproszczonym modelem obliczeniowym wykorzystującym model sztywnego lodu. Uproszczenie polegałoby na założeniu prawie niezmiennych przepływów ciepła i wody. Tak uproszczony model, stosunkowo łatwy do rozwiązania, zaprezentowany został przez Shenga [1]. W wyniku obliczeń można ustalić np. grubość wysadziny, głębokość zamarzania i grubość soczewek lodu oraz zmarzniętego obrzeża, zmieniających się w racjonalny sposób wraz ze zmianą parametrów wejściowych.
5. Aby można było stworzyć w miarę prosty model obliczeniowy dla celów inżynierskich, należy ustalić współzależność pomiędzy zawartością niezamarzniętej wody w zamarzniętym gruncie, natomiast współczynniki fizyczne analizowanego gruntu powinny być przebadane eksperymentalnie. Na temat zawartości niezamarzniętej wody w temperaturze poniżej punktu zamarzania, która jest bardzo delikatnym parametrem w modelu wysadziny zmarzlinowej, ale która nie jest łatwa do określenia w praktyce, były wykonywane w Polsce badania przez Kozłowskiego [5].
6. W warunkach rzeczywistych warunki graniczne i parametry fizyczne gruntu są często wybrane losowo, zarówno te dotyczące czasu, jak i przestrzeni. W związku z tym, opracowując model deterministyczny, powinien on być w taki sposób zmodyfikowany, aby uwzględniał losowe zachowanie się parametrów.

Wnioski dotyczące ochrony przed wysadziną:

1. Używanie materiałów izolacyjnych, takich jak styropian ekstrudowany, szkło spienione i porowata glina, przy konstrukcji dróg jest efektywną metodą redukcji przenikania mrozu. Poniżej warstwy izolacyjnej powinny się znaleźć materiały ziarniste. Grubość

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

izolacji powinna być uzależniona od lokalnych warunków temperaturowych i na tyle gruba, aby mróz nie przenikał do gruntu podatnego na jego działanie.

2. W przypadku dróg, poza zwykłymi metodami izolacyjnymi, przenikanie mrozu można również ograniczyć przez użycie materiałów o wysokim wskaźniku utajonego ciepła. Mokra kora drzewna i mokry torf mogą zawierać dużą ilość wody, stąd mają dużą ilość utajonego ciepła. Materiały te nie zamarzają „szybko" ze względu na ciepło utajone przemiany fazowej, które „łagodzi" oddziaływanie ujemnych temperatur. W konstrukcji dróg umiejscowione są one na podłożu gleby podatnej na działanie mrozu, działając jako bariery termalne.
3. Można zapobiegać przenikaniu mrozu do podłoża podatnego na mróz gruntu przez ogrzewanie elektryczne lub użycie podziemnego ciepła. W przypadku użycia kabli ogrzewania elektrycznego należy zwrócić szczególną uwagę na zmiany w sąsiedztwie gruntu tworzącego wysadzinę oraz na to, by strefa naprężeń ścinających utrzymana była poza terenem utwardzonym (wybrukowanym).
4. Jednak zastosowanie metod ogrzewania elektrycznego czy wkładek termalnych w terenie może nie być ekonomiczne czy też efektywne, zwłaszcza jeżeli w grę wchodzi duży teren podatnego na mróz gruntu.

Wykonano w ramach pracy własnej W/IIB/4/05.

Literatura

[1] Everett D.H., *The thermodynamics of frost damage to porous solids*, Trans Faraday Soc., Vol. 57, 1541-1551.
[2] Dachao S., *Thermodynamics of freezing soils*, Department of Civil Engineering, Lulea University Press, 1994.
[3] Miller R.D., *Freezing and heaving of saturated and unsaturated soil*, Highway Research Record, no. 393, 1972, 1-11.
[4] Harlan R.L., *Analysis of coupled heat–fluid transport in partially frozen soil*, Wat. Resour., Vol. 9, no. 5, 1973, 1314-1323.
[5] Kozłowski T., *Skład fazowy wody w gruntach spoistych poniżej 0°C*, monografia, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1997.
[6] Ickiewicz I., *Wpływ izolacji termicznej na rozkłady temperatur w otoczeniu fundamentów*, 54 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2008.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ