

Член-корреспондент АН СССР П. Ф. ШВЕЦОВ

К ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ ПРОМЕРЗАЮЩЕЙ ГРУНТОВОЙ МАССЫ

Полностью насыщенные водой пылевато-глинистые образования, широко распространенные на севере и востоке СССР, представляют собой физико-механическую систему, названную Н. М. Герсевановым грунтовой массой ⁽¹⁾. Именно такая грунтовая масса и характеризуется наибольшим пучением при осенне-зимнем и многолетнем промерзании; состоящий из нее почвенно-грунтовой комплекс отрицательно зарекомендовал себя в качестве основания и среды сооружений.

Недостаточно изученные до сих пор закономерности криогенного пучения пылевато-глинистой грунтовой массы существенно выясняются, если уподобить ее рабочему телу в тепловой машине Солнце — слой земной коры с годовыми теплооборотами — атмосфера. Атмосфера выступает в роли холодильника (в среднем за многие дни и целые летние и осенне-зимние сезоны).

Из такого, по-видимому, представления и составилось следующее суждение М. И. Сумгина, совершенно не развитое мерзлотооведами: «Исследуя вопрос глубже, мы увидим, что основной причиной, вызывающей напряжения в грунтах, является теплота, действующая на грунт уже как внешний источник энергии» ⁽²⁾, стр. 35 и 36).

Это плодотворное суждение о связи криогенных явлений в почвенно-грунтовой массе с внешним источником тепла мы пытались уже развить в докладе о закономерностях некоторых геоморфологических процессов ⁽³⁾, но там не хватило места для применения некоторых термодинамических соотношений. Попробуем сделать это сейчас.

Начнем с протаивания сезонномерзлого слоя в первый весенний месяц (апрель или май на Крайнем Севере), когда почвенно-грунтовой комплекс полностью промерз, покрыт еще снегом и подстилается беспрестанномерзлой породой. Температура его почти одинакова в вертикальном сечении и по простираению, т. е. слой изотермичен в данное время, что неоднократно наблюдалось в натуре.

Перед нами закрытая со всех сторон почти равновесная плита из мерзлой породы со смешанными коагуляционно-конденсационными (кристаллизационными) связями составляющих. Изменениями скорости всей плиты и положения ее во внешних силовых полях пренебрегаем.

Внешнее атмосферное давление можно для наших целей считать постоянным.

Четыре основных параметра состояния рассматриваемой плиты — давление P , объем V , температура T и концентрация C (воды и льда, а также растворенных в ней соединений) постоянны в любом выделенном из нее элементарном объеме. Они связаны уравнением состояния

$$(P, V, T, C) = 0.$$

Вид функциональной связи между этими параметрами в такой многокомпонентной системе, как толща из мерзлого пылевато-глинистого суглинка, может быть найден только сложным опытным путем. Вследствие этого будем полагать, что внутренняя энергия системы U в простейшем случае является только функцией температуры и объема, т. е.

$$U = f(T, V).$$

Этот случай и рассматривается большинством мерзлотоведов, анализирующих состояние мерзлых грунтов.

Внутренняя энергия всей системы и ее макроскопических элементов состоит, в свою очередь, также из двух видов — объемной и поверхностной — свободной энергии составляющих систему минеральных частиц и молекул (кристаллов) льда. Запасы поверхностной свободной энергии в совершенно мерзлом суглинке с коагуляционно-кристаллизационными связями составляющих минимальны, поскольку мала удельная поверхность такого образования, прошедшего если не стадию метаморфизма, то криогенного катагенеза (типа превращения алевролита в алевролит).

Теперь посмотрим, как и какие характеристические функции состояния плиты изменяются в процессе поступления в нее тепла и протаивания ее сверху, когда она становится, вообще говоря, уже открытой системой; в верхний протаивающий горизонт устремляется под влиянием градиента температуры и влажности талая вода.

В соответствии с первым принципом термодинамики, поступление тепла в систему δQ вызовет в ней изменения, описываемые уравнением

$$\delta Q = \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV + \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \delta A, \quad (1)$$

где первый член отражает изменение взаимного притяжения молекул и молекулярных частиц или, иначе говоря, внутреннего давления; второй представляет собой теплоемкость при постоянном объеме (эффективную, т. е. включающую тепло таяния льда), а третий — работу набухания минеральных прослоек после оттаивания. Сумма второго и третьего членов — энтальпия системы, т. е.

$$H = dU + P dV.$$

Для жидкостей и твердых тел член $(\partial U / \partial V)_T$ очень велик по сравнению с обычными значениями внешнего давления, а для газов он мал. Если при оттаивании пылеватого суглинка за счет солнечного тепла совершаются только работы набухания минеральных прослоек и образования новых поверхностей раздела между частицами системы, то сумма этих работ и равна δA в уравнении (1):

$$\delta A = P dV + \sigma ds,$$

где P — внутреннее давление; σ — поверхностное натяжение разделившихся частиц и s — поверхность макроэлементов, составляющих систему.

Сам факт постепенного разрушения (диспергации) и набухания при оттаивании сильно уплотненных и мало льдистых минеральных прослоек под влиянием подтока к ним тепла и воды экспериментально установили Ф. Г. Бакулин и В. Ф. Жуков⁽⁴⁾.

Сумму совершенных над системой работ за счет поступившей в нее солнечной энергии, поскольку система обладает тепло- и влагопроводностью, можно с полным основанием сопоставлять с основным запасом свободной энергии, т. е.

$$\delta A = \Delta F,$$

где F — свободная энергия Гельмгольца (изохорно-изотермический потенциал). Эта именно свободная энергия и расходуется, наряду со связанной, при промерзании сезонноталого слоя (с.т.с) или бесцегстанно талой в течение большого ряда годовых периодов толщи, не только на теплообмен с холодным воздухом, но и на работу уплотнения скелета грунта, образования в промерзающем горизонте полостей, подтягивания к ним влаги, образования ледяных шпиров, пучения по вертикали и разрывов в плоскости промерзания.

Увеличение свободной энергии в изотермическом процессе оттаивания льдистого пылеватого суглинка можно выразить с помощью известного

уравнения Гиббса, представляющего собой полный дифференциал свободной энергии F для открытой системы при изотермическом процессе в ней:

$$dF = -S dT - P dV - \sigma ds + \mu dn, \quad (2)$$

где S — энтропия, μ — химический потенциал моля воды, n — число молей воды, поступавшей в промерзший горизонт.

Чтобы яснее представить, как может совершаться работа системой, расходующей свою свободную энергию, следует учесть, что член $S dT$ положителен, поскольку энтропия в процессе промерзания с.т.с. уменьшается; положительны также второй и третий члены этого уравнения. Выражаемые ими виды работы совершаются самопроизвольно, поскольку система стремится к минимуму свободной энергии. Частицы скелета пылевато-глинистого образования при криогенном обезвоживании и уплотнении (которому способствуют и растущие в макропустотах ледяные кристаллы) как бы попадают в «молекулярную ловушку», обеспечивающую появление молекулярного сцепления, придающего системе прочность на разрыв⁽⁵⁾.

Условием для самопроизвольного течения процесса служит наличие холодильника (морозного приземного воздуха) и до конца идущий процесс примерзания слоя. Таким образом, получаем

$$-dF = S dT + P dV + \sigma ds - \mu dn. \quad (3)$$

Знак последнего члена служит выражением того, что кристаллизация воды сопровождается увеличением свободной энергии каждого ее моля.

Но выражение полного дифференциала для свободной энергии в рассматриваемом случае будет справедливым, если мы допустим, что наряду с пучением по вертикали идет усадка, растяжение и растрескивание в плане. Это допущение основывается на результатах лабораторных исследований А. В. Федосова^(6, 7) и В. О. Орлова⁽⁸⁾. В связи с этим приятно вспомнить, что писал М. И. Сумгин⁽¹⁾, подводя итоги исследованиям А. Е. Федосова: «В глинистом грунте перераспределяется не только жидкая, но и твердая фаза. Отдельные участки грунта уплотняются, происходит консолидация грунтового скелета или внутриобъемная усадка глин».

К правой части уравнения (3) необходимо добавить еще один член со знаком минус, после чего выражение для убыли свободной энергии в процессе промерзания пылевато-глинистого образования будет выглядеть так:

$$-dF = S dT + P dV + \sigma ds + \sigma_m \omega - \mu dn,$$

где σ_m — поверхностное натяжение вновь образовавшихся криогенных трещин; ω — площадь таких трещинных поверхностей.

Только что добавлена работа образования криогенных трещин в промерзающем слое за счет его внутренней энергии, пополнившейся в предшествующий весенне-летний сезон в процессе аккумуляции лучистой энергии Солнца. Такие трещины пересекают не только промерзший в данный осенне-зимний сезон слой, но и его беспрестанномерзлую подошву.

Усадка по площади и пучение по вертикали при промерзании пылевато-глинистого с.т.с. соответствуют не только анизотропии роста кристаллов в промерзающих горизонтах этого слоя⁽⁹⁾, но и анизотропии строения и свойств всей системы, в которой происходит и произошло избыточное льдовыделение.

Учитывая явно выраженную анизотропию физико-химических условий роста ледяных кристаллов и шпиров, а также пучения породы при избыточном льдовыделении вследствие одностороннего промерзания, можно получить⁽¹⁰⁾ простое соотношение между элементарной работой и убылью свободной энергии в промерзающей призмочке с единичным сечением:

$$P dl = -dF,$$

$$P = -dF / dl.$$

Таким образом, давление, вызывающее криогенное пучение, пропорционально отрицательному градиенту поверхностной энергии в горизонте промерзания пылевато-глинистой влажной породы. Общие удельные запасы свободной поверхностной энергии в такой породе до ее промерзания близки, по-видимому, к 10^4 дж/кг или 2400 кал/кг. Призма сечением в 1 м^2 и высотой 2 м из такого пылеватого суглинка заключает $32 \cdot 10^6$ дж или $7,68 \cdot 10^6$ калорий. Довольно внушительные цифры. Получены они из учета минимальных значений энергии, необходимой для образования новой поверхности в карбонатных и силикатных породах — около 25 дж/м^2 .

Полная работа пучения промерзающего горизонта пылеватого суглинка толщиной dl пропорциональна скорости уменьшения свободной энергии (градиенту температуры и влажности) в этом горизонте, поделенной на скорость приближения ее к состоянию равновесия и умноженной на время течения этого процесса:

$$P dl = - \frac{\partial F}{\partial \tau} d\tau,$$

где τ — время; здесь, как и в ряде других необратимых процессов, одинаково важную роль играют напряженность и скорость релаксации напряжений. Скорость уменьшения свободной энергии в данном процессе ограничивается скоростью физико-химического процесса криогенной усадки суглинков.

Данный вывод, вытекающий из термодинамики необратимых процессов, учитывает сравнительно небольшие скорости миграции пленочной, в частности незамерзшей, влаги, испытывающей при своем движении сопротивление поверхностей частиц, адсорбировавших ее значительную часть. Сопротивление движению пленочной влаги возрастает с увеличением скорости и длины пути миграции; особенно быстро растет оно с приближением к поверхностям частиц, т. е. с уменьшением толщины водных пленок при возрастании вязкости H_2O . Ритмичность пучения с учетом сказанного представляется неизбежной. Полная работа пучения всего промерзшего слоя равна сумме работ ряда ритмов пучения ступенчато промерзавших грунтов.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
гидрогеологии и инженерной геологии
Москва

Поступило
18 I 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. М. Герсеванов, Основы динамики грунтовой массы, М., 1934. ² М. И. Сумгин и др., Общее мерзлотоведение, Изд. АН СССР, 1940. ³ П. Ф. Швецов, Н. Г. Бобов и др., В сборн. Современные экзогенные процессы рельефообразования, «Наука», 1970. ⁴ Ф. Г. Бакулин, В. Ф. Жуков, Изв. АН СССР, отд. техн. наук, № 7 (1955). ⁵ С. В. Нерпин, Б. В. Дерягин, В сборн. докл. на конфер. по поверхн. силам, Изд. АН СССР, 1961. ⁶ А. Е. Федосов, Физико-механические процессы в грунтах при их замерзании и оттаивании, М., 1935. ⁷ А. Е. Федосов, Тр. Инст. геол. наук, сер. инж.-геол., в. 35, № 4 (1940). ⁸ В. О. Орлов, Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов, Изд. АН СССР, 1962. ⁹ А. М. Пчелинцев, Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов, «Наука», 1964. ¹⁰ П. Ф. Швецов, Матер. VIII совещ. по геокриол., в. 4, Якутск, 1966.