

634.0.3

с 16

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БССР

Белорусский технологический институт имени С. М. Кирова

На правах рукописи

САЛИХОВ МУХАММЕТ ГАБДУЛХАЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА  
ПРОМЕРЗАНИЕ ГРУНТОВ В ЗОНЕ ПРОИЗВОДСТВА  
ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЛЕСОВОЗНЫХ  
ДОРОГ

Специальность 05.06.02 Машины, механизмы и  
технология лесоразработок, лесозаготовок и  
лесного хозяйства (05.420)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 1975

634,0.3  
С 16

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Б С С Р

Белорусский технологический институт им.С.М.Кирова

На правах рукописи

к.т.

САЛИХОВ МУХАММЕТ ГАБДУЛХАЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА  
ПРОМЕРЗАНИЕ ГРУНТОВ В ЗОНЕ ПРОИЗВОДСТВА  
ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЛЕСОВОЗНЫХ  
ДОРОГ

383699  
Специальность 05.06.02 Машины, механизмы и  
технология лесоразработок, лесозаготовок и  
лесного хозяйства (05.420)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 1975

БИБЛИОТЕКА БТИ  
имени С. М. КИРОВА

Работа выполнена на кафедре сухопутного транспорта леса  
и дорожных машин Белорусского технологического института  
им.С.М.Кирова

Научный руководитель доктор технических  
наук, профессор И.И.ЛЕОНОВИЧ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Ю.А.СОБОЛЕВСКИЙ,  
кандидат технических наук, доцент Г.Ф.ГРЕХОВ

Будущее предприятие - объединение "ТЮМЕНЬЛЕСПРОМ"

Автореферат разослан "30" апреля 1975 г.

Защита диссертации состоится "11" июня 1975 г.  
на заседании совета Белорусского технологического института  
им.С.М.Кирова по адресу:

220630, г.Минск, ул.Свердлова, 13а, ауд.220, корп.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Учечный секретарь совета  
кандидат технических наук



Е.А.ГРУШЕВСКАЯ

Решениями XXIV съезда КПСС и народнохозяйственными планами развития страны на 1971-75 гг. были намечены грандиозные задачи освоения обширных территорий Сибири и Крайнего Севера. Как показывает опыт, выполнение этих планов во многом связано с производством земляных работ в течение всего года.

Производство земляных работ зимой существующими методами требует значительного расхода тепловой и электрической энергии, взрывчатых веществ, а также специальных дорогостоящих машин, т.е. огромных первоначальных капиталовложений и трудозатрат. Химический метод подготовки грунтов помогает устранить часть этих недостатков, позволяет использовать обычные дорожно-строительные машины, технику зимой и одновременно позволяет ликвидировать отрицательные морозные явления при промерзании грунтов. Отдельные примеры успешного применения химического метода подготовки промерзающих грунтов к разработке зимой, а также противупучинного засоления (например, при строительстве плотины Братской ГЭС и Вилуйской гидроэлектростанции) во многом подтвердили первоначальные теоретические исследования и перспективность этого метода.

Идея использования химических противоморозных добавок для борьбы с отрицательными морозными явлениями в грунтах возникла еще в 30-е годы, но до 50-х годов она не нашла своей практической проверки. В 1954 году академик П.А.Ребиндер предложил начать более глубокие исследования этого метода с целью разработки рекомендаций для производства. С тех пор исследования предприняты в институте "Гипропроект" им.С.Я.Жука; рядом исследователей под руководством Н.А.Цытовича (С.Б.Ухов, 1958-1960 г.г., Я.А.Кроник 1967-70 г.г.), под руководством

кандидата технических наук, доцента В.И.Буй (1967-1972 г.г.). Однако к настоящему времени химический метод крайне медленно входит в практику строительства. Одной из причин этого является неразработанность целого ряда вопросов, связанных с этим методом.

В данной работе предложены исследования химического метода, преимущественно применительно для районов с особо суровыми климатическими условиями.

Настоящие исследования позволили рекомендовать для этих районов в качестве противоморозной добавки технический хлористый кальций. Исследованы некоторые возможные агрессивные и физико-механические свойства искусственно-засоленных хлористым кальцием грунтов. Изучены процессы распределения соли при изменении температуры и влажности грунта, времени распределения. Предложены методики расчета оптимальных сроков внесения и норм соли в промерзающие грунты и проведена экономическая оценка химического метода на примере предприятий треста "Тюменьлеострой".

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и рекомендаций и приложений. Она изложена на 202 страницах машинописного текста, включая 44 таблицы, 58 рисунков, списка цитированной литературы из 193 наименований и 4-х приложений.

## I. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННО- ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ

Работа выполнялась применительно к условиям таящей зоны Тюменской области, где наиболее часто встречаются пылеватые грунты ледникового происхождения. Поэтому для лабораторных опытов был взят суглинок пылеватый, легкий. С практической точки зрения наиболее важным является установление эффективной противоморозной добавки в промерзающие грунты в суровых климатических условиях и установление возможных изменений свойств грунтов при внесении этих добавок.

Как известно, глинистые грунты в естественных условиях представляют собой сочетание твердых частиц, воды (льда) и воздуха, и прочность их определяется прочностью структурных связей. Структурные связи обусловлены ионными и молекулярными силами, действующими непосредственно в местах контакта частиц с окружающей их средой. Они возникают в результате того, что заряды поверхностных частей кристаллической решетки минералов грунта остаются некомпенсированными и поэтому взаимодействуют с дипольными молекулами воды, ориентируя последние. Свободные заряды могут возникать и в силу других причин, которые определяют физико-химическую активность кристаллов глинистых минералов. Следствием этого является образование глинистой частицей двойного электрического поля, их поверхностная растворимость, коагуляция и другие явления, которые приводят к изменениям физико-химических показателей грунтов.

После внесения в грунт хлористый кальций в порошковом растворе распадается на ионы  $Ca^{++}$  и ионы  $Cl^-$ . Ионы кальция

ориентирует рыхлосвязанные слои воды вокруг частиц, образуя более прочные связи, т.е. происходит подавление рыхлосвязанной (диффузной) воды. При увеличении концентрации ионов  $Ca^{++}$  начинается коагуляция мелких частиц грунта в более крупные микроагрегаты. Одновременно происходит поглощение поверхностью частиц двухвалентных ионов  $Ca^{++}$  в обмен на одновалентные заряды. Следствием этого является увеличение толщины пленки прочносвязанной воды, так как установлено, что чем больше валентность элемента кристалла, тем больше, его ориентирующая способность. Это приводит к увеличению способности к скольжению частиц относительно друг друга при приложении нагрузки.

Укрупнение мелких частиц в более крупные агрегаты, вследствие коагуляции их, приводит к формированию микропор в макропоры, в результате чего объемный вес грунта под нагрузкой при одинаковой влажности уменьшается. Лабораторные исследования подтверждают эти предположения. Опыты проводились при помощи прибора для стандартного уплотнения СоюзДорНИИ. Результаты опытов показали, что с увеличением концентрации порового раствора наблюдается некоторое уменьшение оптимальной плотности и оптимальной влажности.

Опытами по изучению уплотняемости засоленных грунтов при отрицательных температурах и фазового состава поровой воды показано, что хлористый кальций обеспечивает пластическое состояние грунтов при температурах от  $0^{\circ}C$  до  $-25^{\circ}C$ . Уплотняемость грунтов при отрицательных температурах изучалась в приборе стандартного уплотнения СоюзДорНИИ. Для этого пробы грунтов с различными концентрациями грунтового раствора замораживались в течение 3-10 сут. в климатическом шкафу КР-2 и уплотнялись.

Для изучения фазового состава сконструирована калориметрическая установка с массивным блоком, конструктивной особенностью которой по сравнению с существующими приборами является отсутствие в них калориметрической жидкости. Кроме того, наличие охлаждающего устройства на жидком азоте - криостата, смонтированного как одно целое с прибором, обеспечивает минимальные погрешности за счет потерь тепла при переносе бокса с пробой из криостата в калориметр.

На основании данных калориметрического опыта для незасоленных грунтов рассчитывается содержание льда в поровом растворе по предложенной формуле:

$$g_{л} = \frac{W \cdot \Delta t - (t_{обр} - t'_n) (C_{лат} g_{лат} + C_{ск} g_{ск} + C_{в} g_{в})}{79,71 + t_{обр} (C_{лвд} - C_{в})} \quad (I)$$

где  $g_{л}$  - количество льда в пробе грунта, г;

$W$  - тепловое значение калориметра,  $\frac{\text{ккал}}{\text{град}}$ ;

$\Delta t$  - истинный подъем температуры с учетом поправки на теплообмен, град;

$t_{обр}$  - температура образца грунта в боксе в начале калориметрического опыта, град;

$t'_n$  - равновесная температура блока калориметра с учетом поправки на теплообмен, град;

$C_{лат}$  - удельная теплоемкость латуни,  $\frac{\text{ккал}}{\text{гград}}$ ;

$g_{лат}$  - вес латунного бокса, г;

$C_{ск}$  - удельная теплоемкость скелета грунта,  $\frac{\text{ккал}}{\text{гград}}$ ;

$g_{ск}$  - вес скелета грунта в пробе, г;

$C_{в}$  - средняя удельная теплоемкость воды в интервале температур  $t'_n - t_{обр}$ ,  $\frac{\text{ккал}}{\text{гград}}$ ;

$g_{в}$  - вес поровой воды в грунте, г;

$C_{лвд}$  - средняя удельная теплоемкость льда в интервале температур  $0^{\circ} - t_{обр}$ ,  $\frac{\text{ккал}}{\text{гград}}$ ;

79,71 - скрытая теплота плавления льда,  $\frac{\text{ккал}}{\text{г}}$ .

Количество льда для искусственно-засоленных грунтов при  $t_{\text{ср}} > t_3$  определяется по формуле, выведенной из уравнения теплового баланса:

$$g_{\text{л}} = \frac{W \cdot \Delta t \cdot (t_{\text{ср}} - t_3) (C_{\text{лед}} g_{\text{м}} + C_p \cdot C_p + C_s g_s) + n \Delta(\Delta H_m) - C_p g_p (t_3 - t_n) - C_{\text{л}} g_{\text{л}} (t_{\text{ср}} - t_3)}{79,71 - C_s \cdot (t_{\text{ср}} - t_n) - (C_p - C_{\text{лед}}) \cdot (t_{\text{ср}} - t_3)} \quad (2)$$

где  $n$  - количество растворенного вещества в поровом растворе, моль;

$t_3$  - температура замерзания раствора, град;

$\Delta(\Delta H_m)$  - интегральная теплота разбавления раствора за счет таяния отта от  $t$  обр до  $t_3$   $\frac{\text{кал}}{\text{моль}}$ ;

$g_p$  - общее количество порового раствора, г;

$C_p$  - средняя удельная теплоемкость порового раствора в интервале температур от  $t_n$  до  $t_3$ ,  $\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$ ;

$C_{\text{л}}$  - средняя удельная теплоемкость раствора концентрации  $C_1$  в интервале температур от  $t_3$  до  $t$  обр.,  $\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$ ;

$C_1$  - концентрация порового раствора при температуре образца, равной  $t$  обр., когда часть поровой воды находится в твердом состоянии.

Ошибка результатов опытов не более  $\pm 1,5\%$ .

Изменение обменной емкости частиц грунта при введении солей приводит к изменению их фильтрационных показателей. Подавление диффузного слоя воды увеличивает эффективный диаметр пор, поэтому происходит резкое увеличение коэффициента фильтрации. С увеличением концентрации увеличивается вязкость порового раствора, что приводит к постепенному уменьшению коэффициента фильтрации. Лабораторные опыты подтверждают правильность этих предположений. Фильтрация изучалась в трубке СпецГео под градиентом напора  $J = 1$ . В полностью водонасыщенных пробах грунта изменение фильтрационных показателей грунта при искусственном засолении указывает на то, что в таких грунтах водный режим отличается от водного режима в незасоленных грунтах. Поэтому это следу-

ет учесть при проектировании водорегулирующих элементов сооружений из засоленных грунтов.

Особое значение приобретает исследование возможных агрессивных свойств искусственно-засоленных грунтов. Проведенные лабораторные исследования показали, что с увеличением концентрации порового раствора увеличивается их адсорбционная способность, которую нужно рассматривать как агрессивное свойство, поскольку она способствует переувлажнению грунтов. Из опытов видно, что при постоянной упругости паров над образцами адсорбции влаги грунтами из воздуха происходит до равновесного состояния, причем засоленные хлористым кальцием грунты насыщаются медленнее, чем засоленные хлористым натрием грунты. Для исследованного грунта насыщение искусственно-засоленных хлористым кальцием проб до концентраций порового раствора 24% происходило в течение 120 суток, а влажность полного насыщения в положении равновесия была примерно в 4 раза больше первоначальной влажности ( $W_0 = 12,95\%$ ). Однако полевые исследования показали, что нет оснований для пессимистических выводов, так как в естественных условиях искусственное засоление приводило к незначительному увеличению влажности грунтов. Это, видимо, происходит из-за того, что в естественных условиях наблюдается постоянный дефицит влаги в воздухе. Кроме того, грунты подвергаются постоянному подсушиванию под действием ветра и солнечных лучей.

Часть работы посвящена исследованию в лабораторных и полевых условиях коррозионной активности искусственно-засоленных грунтов по отношению к углеродистым сталям, поскольку этот вопрос не изучен. При экспериментальных опытах была использована методика Г.В.Акимова с некоторыми видоизменениями, поскольку она наиболее простым образом обеспечивает достаточно точные

результаты.

В таблицах I и 2 приводятся результаты лабораторных опытов.

Таблица I

Скорость коррозии стали В в искусственно-засоленных *CaCl<sub>2</sub>* грунтах с течением времени

(  $\frac{\text{мг}}{\text{см}^2 \text{ сутки}}$  )

Концентрация порового р-ра, %							
	0	4,5	8,6	12,7	15,6	18,3	
Время, сутки							
	1	2	3	4	5	6	7
15	0,432	0,430	0,454	0,374	0,274	0,258	
30	0,256	0,270	0,260	0,247	0,224	0,218	
60	0,170	0,184	0,138	0,229	0,120	0,186	
91	0,128	0,162	0,108	0,303	0,100	0,092	
120	0,096	0,298	0,118	0,321	0,214	0,330	

Таблица 2

Скорость коррозии стали В в искусственно-засоленных *NaCl* грунтах с течением времени

(  $\frac{\text{мг}}{\text{см}^2 \text{ сутки}}$  )

Концентрация порового р-ра, %		
	15,9	17,4
Время, сутки		
	15	0,574
30	0,298	0,304
60	0,264	0,190
91	0,276	0,208
120	0,216	0,174

Как видно из таблиц I1 и I2, скорость коррозии стали 3 в искусственно-засоленных грунтах при всех рассмотренных концентрациях порового раствора с течением времени имеет вид логарифмической кривой. При анализе опытных данных выясняется, что для всех фиксированных отрезков времени изменение скорости коррозии образцов в зависимости от концентрации порового раствора также имеет вид кривой с максимумами и минимумами. При натурном обследовании стержней после опытов было видно, что с увеличением концентрации порового раствора в развитии коррозии стали 3 увеличивается доля питтинговой коррозии. Однако, анализ численных значений скоростей коррозии показывает, что возрастание его в искусственно-засоленных грунтах не превышает существующие нормы.

Достоверность данных, полученных в лабораторных условиях, подтверждаются полевыми опытами, результаты которых приводятся в таблице. Опыт проводился с 22 ноября по 13 апреля, т.е. в течение 142 суток.

Таблица 3

Результаты определения коррозионной активности грунтов на опытных участках

№ опытных участков	Название и количество соли на 1 м <sup>2</sup> , кг	Вес стержня до опыта, г	Вес стержня после опыта, г	Потеря в % к общему весу	Скорость коррозии, мг/см <sup>2</sup> сутки
I	без соли	35,445	35,167	0,78	0,192
2	NaCl ; 1,8	35,276	34,912	1,03	0,251
3	CaCl <sub>2</sub> ; 0,5	35,421	35,148	0,77	0,188
4	CaCl <sub>2</sub> ; 0,9	35,267	35,061	0,58	0,142
5	CaCl <sub>2</sub> ; 2,5	35,369	35,066	0,86	0,209

Полученные результаты согласуются с выводами теории коррозии металлов в агрессивных средах.

П. Теоретические и экспериментальные исследования процессов перераспределения солей в суглинистых грунтах и их следствия

Перенос ионов растворенных солей в фильтрующей воде осуществляется конвективно и диффузионно. Конвективный перенос складывается из фильтрационного переноса раствора под влиянием задаваемого градиента напора и осмотического потока воды, тормозящего фильтрацию. Диффузионный перенос можно рассматривать как следствие самопроизвольного теплового движения ионов и по направлению движения совпадает с конвективным переносом солей. В соответствии с установившимися представлениями, в суглинистых грунтах в естественных условиях диффузионный перенос является главным фактором перераспределения солей.

Наиболее общим уравнением, выражающим диффузионный процесс является формула:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

Для практических целей рекомендуется пользоваться формулой (4), являющейся частным решением (3):

$$C = A \cdot t^{-\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (4)$$

где  $C$  - концентрация порового раствора в данный момент в лю<sup>м</sup> сечении, отстоящем на расстоянии от места внесения соли;

$D$  - коэффициент диффузии;

$A$  - произвольная постоянная.

Формула (4) получена из уравнения (3) без всяких упрощающих предположений.

Коэффициент диффузии из уравнения (4) находится следующим образом. Найдем логарифмы:

$$\lg C = (\lg A - \frac{1}{2} \lg t) - \frac{x^2}{4Dt} \cdot \lg e$$

При заданном значении  $t$  выражение  $(\lg A - \frac{1}{2} \lg t) = \lg b$

есть постоянное число, тогда:

$$\lg C = \lg B - x^2 \cdot \frac{0,434}{4 \cdot D \cdot t}, \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что зависимость между переменными  $\lg C$  и  $x^2$  есть линейная. Причем, тангенс угла наклона этой прямой будет равен:

$$\lg d = \frac{0,434}{4 \cdot D \cdot t} \quad \text{или отсюда: } D = \frac{0,1086}{\lg d \cdot t} \quad (6)$$

Следует сказать, что рассмотренное уравнение (4) не учитывает явлений, связанных с обменными процессами диффундирующих ионов с поглощенными катионами частиц грунта. Поэтому она справедлива лишь при изучении диффузии нейтральных солей.

Изменение температуры, как показали эксперименты, приводит к изменению коэффициента диффузии. Для газов и твердых тел эта зависимость выражается в виде:

$$D = B \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (7)$$

где  $Q$  - энергия активации для ионов вещества;

$R$  - универсальная газовая постоянная;

$T$  - абсолютная температура среды;

$B$  - постоянная величина, не зависящая от температуры.

По исследованиям Я.И.Френкеля, энергия активации современными методами непосредственно не может быть измерена, причем она, в свою очередь, меняется при изменении температуры и давления:

$$Q = Q_0 - \gamma \cdot T + \beta \cdot \Delta P \quad (8)$$

где  $Q_0$  - энергия активации при абсолютном нуле температуры;

$\Delta P$  - изменение давления;

$\gamma, \beta$  - коэффициенты, соответствующие возрастанию энтропии и объема тела при изменении температуры и давления. Обычно принимается  $\gamma = const.$   $\beta = const.$

Для наших условий  $\Delta P = 0$ , тогда

$$Q = Q_0 - \gamma \cdot T \quad (9)$$

Подставив значение  $Q$  в уравнение (7), после некоторых преобразований получаем:

$$Q = B_1 \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T}}, \quad (10)$$

где  $B_1$  - постоянный коэффициент, не зависящий от температуры.

Вычисленные по формулам (6) и (10) коэффициенты диффузии оказываются заниженными, поскольку они не учитывают пористость грунтов и наличие прочносвязанной воды, через которую диффузия не происходит. Тогда с учетом этих факторов можно записать:

$$D_{cp}' = \frac{D_{cp}}{n - W_{пр} \cdot \delta_{ск.гр}}, \quad (11)$$

где  $n$  - пористость грунта;

$W_{пр}$  - влажность грунта, содержащего только прочно-связанную воду;

$\delta_{ск.гр}$  - объемный вес скелета грунта.

Уравнения диффузии предусматривают процесс во всем объеме водонаполненного сосуда. Обычно в грунтах в естественных условиях часть пор водой не заполнена; причем, степень водонасыщения меняется со временем. Изменение влажности должно привести к изменению коэффициента диффузии. Поэтому были проведены экспериментальные исследования, которые позволили получить зависимость коэффициента диффузии соли от влажности грунта.

Важно было изучить также движение растворов в грунтах при наличии градиентов напора. При этом движение раствора в суглинистом грунте подчиняется закону Дарси (при ламинарном движении):

$$W = K \cdot J, \quad (12)$$

- где  $W$  - скорость фильтрации раствора;  
 $J$  - гидравлический уклон или градиент напора;  
 $K$  - коэффициент фильтрации.

Гидравлический уклон - безразмерная величина, равная:

$$J = \frac{H}{L}, \quad (13)$$

- где  $L$  - путь, который преодолевает раствор под заданным градиентом напора;

$$H = \frac{P}{\gamma} + Z, \quad (14)$$

- где  $P$  - перепад давления на толщине пласта грунта в направлении фильтрации;  
 $\gamma$  - удельный вес раствора;  
 $Z$  - высота превышения точки, в которой измеряется напор, под плоскостью сравнения.

Подставив (13) и (14) в уравнение (12) получаем:

$$W = K \cdot \frac{P + \gamma \cdot Z}{\gamma \cdot L}, \quad (15)$$

Коэффициент фильтрации определяется экспериментально.

Экспериментальные работы в лабораторных и полевых условиях проводились с целью проверки выводов теоретических исследований и расчетных формул. Методики лабораторных опытов при изучении диффузии соли в грунте состояли в следующем: легкий пылеватый суглинок с расчетной влажностью укладывался с определенной плотностью в деревянный ящик размером 15x15x15 см. Для предотвращения потери влаги он был покрашен в 2 слоя нитрокраской. На грунт укладывалось определенное количество соли хлористого кальция, на которую укладывалась пропитанная парафином картонная бумага, которая сверху заливалась жидким парафином. Для контроля за температурой грунта в ящик помещался ртутный термометр. С течением времени ящики вскрывались и послойно

брались пробы грунта для определения влажности и засоленности. По результатам опытов подсчитывались коэффициенты диффузии. В опытах по изучению коэффициента диффузии в зависимости от температуры модель усложнялась. При этом образцы с боковых сторон и дна теплоизолировались, и тепловое воздействие происходило только сверху. Для измерения температуры использовались медьконстантовые термомпары, э.д.с. которых снималась при помощи потенциометра ПП-63. Опыты проводились в пределах температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  в климатическом шкафу КР-2.

Движение раствора в грунте под градиентом напора изучалось в стальных разборных колонках, состоящих из трех цилиндров, завинчиваемых друг на друга, высотой по 15 см. Диаметр колонки 90 мм. В приборе предусмотрено увлажнение сверху и снизу. Для предотвращения испарения влаги колонки закрывались стеклянной крышкой. Опыты проводились при градиентах напора 0; 0,33; 0,167 и 0,333. С течением времени колонки разбирались и брались пробы грунта для определения влажности и засоленности по глубине. Проведенные исследования позволили установить следующие зависимости:

$$A_{cp} = 0.011 \cdot t, \quad (16)$$

где  $A_{cp}$  - среднее значение коэффициента, входящего в формулу (4).

$$A_{cp} = 15910 + 9425 \cdot t, \quad (17)$$

$$A_{cp} = 429 \cdot W^2 - 16938 \cdot W + 223243 \quad (18)$$

$$D_p = 10^{-8} (410 + 51 \cdot W), \quad (19)$$

где  $D_p$  - расчетный коэффициент диффузии,  $\frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ ;

$$A_{cp} = -73689 + 318 \cdot T \quad (20)$$

$$D_p = 9.40 \cdot e^{-\frac{3837.83}{T}} \quad (21)$$

$$W = 10^{-7} (73 \cdot \lg J + 106) \quad (22)$$

Как показали результаты опытов, коэффициент А изменяется в широких пределах при изменении времени диффузии, влажности и температуры грунта. Это, видимо, происходит за счет того, что основное уравнение диффузии выводится из расчета постоянства коэффициента диффузии во времени, независимости от изменения температуры и влажности грунта. Фактические значения коэффициента диффузии не постоянны. Для расчета коэффициента  $A_{cp}$  предлагается формула в зависимости от времени диффузии, влажности температуры грунта:

$$A_{cp} = t \cdot 10^{-4} [(-1.68 \cdot W^2 - 29.6 \cdot W + 592) + T \cdot 10^{-2} (0.569 \cdot W^2 + W - 32)] \quad (23)$$

Зная  $A_{cp}$  и  $D_{cp}$ , при помощи формулы (4) можно определить распределение концентраций по глубине за любое время, что позволяет вести систематический контроль за засоленным участком.

Удовлетворительное сходство расчетных данных с фактическими показывает, что теоретические предпосылки о перераспределении соли в грунтах правильны.

Полезные опыты проводились следующим образом. Осенью в действующем карьере выбирались участки размером 1х2 м с относительно ровной поверхностью и в них вносились соль. За распределением соли и влаги наблюдали периодическим отбором проб по глубине до 1 м. В базовом незасоленном участке за распределением влажности по глубине наблюдения вели при помощи капровых датчиков влажности, показания которых снимались

мегометром. Температуру определяли при помощи датчиков сопротивления ТД-4 и специального моста сопротивлений. За глубиной промерзания наблюдали при помощи мерзлотомеров Данилина. Целью опытов было установление оптимальных способов внесения соли и проверка расчетных формул для назначения срока внесения нормы соли в грунты. Опыты проводились до весны, т.е. до начала оттаивания грунтов. Предложенная формула для расчета оптимального срока внесения соли в грунты имеет вид:

$$t_s = \frac{a \cdot Q \cdot a \cdot |T_s|^b - k \cdot D \cdot S \cdot \frac{dC}{dh}}{a \cdot |T_s|^b \cdot D \cdot S \cdot \frac{dC}{dh}}, \quad (24)$$

где  $dQ$  - количество внесенной соли, г;

$S$  - намечаемая к засолению площадь карьера, см<sup>2</sup>;

$\frac{dC}{dh}$  - градиент концентрации по глубине от  $C$  до

$$\frac{r}{h};$$

$|T_s|$  - абсолютное значение среднесуточной температуры воздуха, °C;

$a, b$  - постоянные коэффициенты, которые определяются экспериментально. Опираясь на результаты исследования скорости промерзания грунта в зависимости от температуры, проведенные М.Р.Каиповым, находим, что  $a \approx 0,87$ ;  $b = 0,506$ .

Формула (24) позволяет получить надежные результаты.

Формула для расчета нормы соли получена следующим образом.

Средняя весовая концентрация порового раствора ( $C_{cp}$ ) выражается в виде:

$$C_{cp} = \frac{P_c \cdot 100}{P_c + P_d}, \quad (25)$$

где  $P_c$  - количество соли в грунтовом растворе, г;

$P_d$  - количество воды в грунтовом растворе, г.

Решая уравнение (25) относительно  $P_c$  и произведя некоторые преобразования, получаем:

$$P_c = \frac{C_{cp} \cdot W \cdot \delta_{жл} \cdot 10000 \cdot h_3}{(1000 + W) \cdot (100 - C_{cp})} \quad (26)$$

где  $W$  - влажность грунта, %;

$\delta_{жл}$  - объемный вес влажного грунта, г/см<sup>3</sup>;

$h_3$  - необходимая глубина засоления, принимаемая обычно равной глубине промерзания ( $h_{пр}$ ).

Для обеспечения пластического состояния грунта необходимо соблюдалось условие:

$$C > C^p \quad (27)$$

где  $C$  - концентрация порового раствора в любой точке, %;

$C^p$  - равновесная концентрация порового раствора, %.

Аналогично запишем:

$$C_{cp} > C^p \quad (28)$$

Равновесные концентрации раствора хлористого кальция приведены в справочниках. Методами численного анализа можно подобрать функцию:

$$C^p = -275 + \frac{7590}{T} \quad (29)$$

Построим эту зависимость на графике и найдем площадь фигуры, ограниченной этой кривой и осью  $O-T$  в пределах от  $T_{мин} = T_i$  до  $T_{макс} = 273^\circ K$ :

$$S = \int_{T_i}^{273} \left( -275 + \frac{7590}{T} \right) dT = 350306 + 275 \cdot T_i - 174628 \cdot \lg T_i$$

Тогда средняя равновесная концентрация, равная средней фактической концентрации, будет:

$$C'_{cp} = \frac{(350306 + 275 \cdot T_i - 174628 \cdot \lg T_i)}{(273 - T_i)} \quad (30)$$

Подставив (30) в уравнение (26), и с учетом примесей соли, получаем формулу для расчета необходимого количества соли:

$$P_c = \frac{\mathcal{L} \cdot (350306 + 275 T_i - 174628 \cdot \lg T_i) \cdot W \cdot S_{\text{дл}} \cdot 10000 \cdot K_3}{(100 \cdot W) \cdot (174628 \cdot \lg T_i - 175 T_i - 323306)}, \quad (31)$$

где  $\mathcal{L}$  - коэффициент загрязненности, равный отношению веса соли с примесями к весу чистой соли.

Для практического опробования нами было произведено искусственное засоление карьера дороги Минск-Брест вблизи пос. Негорелое количеством соли, рассчитанным по формуле (31). Вне-сенное количество соли обеспечило пластическое состояние грунтов в течение всей зимы. Проведенная сравнительная оценка формулы (31) с формулами других авторов для других солей показала их близость.

На основе анализа грунтово-климатических условий по материалам изысканий, проведенных сотрудниками Тюменского НИИПлесдрев, а также данных Омского управления Гидрометцентра СССР и Тюменской гидрометобсерватории, по формуле (31) рассчитаны технической соли ( $\mathcal{L} = 1,1$ ), которые для ряда районов приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Нормы соли для некоторых районов таежной зоны Тюменской области

Метеостанции	Нормы соли с учетом примеси ( $\mathcal{L} = 1,1$ )	
	1	2
1. Березово	6083,5	
2. Октябрьское	6084,1	
3. Няксимволь	6036,1	
4. Сургут	5800,4	

продолжение  
таблицы 4

I	2
5. Ханты-Мансийск	5461,4
6. Тобольск	3046,4
7. Кондинское	4923,8
8. Тюмень	2111,1
9. Ялуторовск	2033,3
Среднее	4620,0

Согласно таблице 4, наибольшие нормы соли при химической противоморозной мелиорации грунтов соответствуют районам с наиболее суровыми климатическими условиями.

### III. Техничко-экономическая оценка химического метода подготовки промерзающих грунтов в условиях Тюменской области

В зависимости от характера грунтово-гидрологических условий местности и климатических условий района строительства, могут быть рекомендованы следующие основные способы внесения соли в грунты:

1. Укладка соли на поверхность карьера без снятия растительного слоя.
2. Укладка соли на поверхность грунта после снятия растительного слоя.
3. Укладка соли на поверхность грунта со следующим переделыванием с верхним слоем грунта на глубину 20 см.
4. Внесение соли в грунт через шурфы.
5. Внесение соли путем розлива концентрированного раствора.

Анализ технологических приемов производства работ и проведен-

ные эксперименты показали, что первый способ внесения соли является наиболее простым и достаточно эффективным способом. В работе приведена калькуляция себестоимости подготовки  $1 \text{ м}^3$  промерзающего грунта к разработке зимой при всех основных способах внесения соли. Средняя себестоимость подготовки принята как среднеарифметическая из всех, т.е. предполагается, что объемы подготовки различными способами внесения соли равны. В качестве противоморозной добавки принять хлористый кальций обезвоженный (по ГОСТ 450-58). Проведенные расчеты показывают, что в условиях таежной зоны Тюменской области химический метод дает экономический эффект по сравнению с взрывным методом до 180 рублей на каждые  $1000 \text{ м}^3$  разрабатываемого грунта, а по сравнению с рыхлением клин-бабой на экскаваторе до 430 рублей. При внедрении химического метода условный годовой экономический эффект за 1972 год по предприятиям треста "Тюменьлеострой" составляет по сравнению с взрывным методом 47160 рублей, а по сравнению с рыхлением клин-бабой на экскаваторе 112660 рублей. Следует сказать, что в основу расчетов положена только себестоимость работ, не учтена экономия средств за счет ликвидации простоев дорожно-строительной техники зимой, а также за счет ускорения сдачи дороги в эксплуатацию. Подсчет трудозатрат показывает, что химический метод в 2-2,5 раза менее трудоемок, чем вышеназванные методы. Экономические показатели подготовки грунтов зимой к разработке различными методами приводятся в таблице 5.

Таблица 5

Себестоимость подготовки  $1 \text{ м}^3$  грунта к  
разработке зимой различными методами

Ведущий механизм при рыхлении мерзлого слоя или способ защиты грунта от промер- зания	Себестоимость коп./ $\text{м}^3$
1	2
1. Экскаватор, оборудованный клин-бабой	70-75

Продолжение таблицы 5

I	1	2
2. Роторный траншейный экскаватор ЭР 7-А		35
3. Экскаватор с ковшом активного действия		20
4. Машины ударного действия		
МНС-2		26
конструкция ЦНИИОМТП		36
конструкция Главмостстроя		59
5. Машины послойного рыхления Д-652А		
рыхление площадей		12
рыхление траншей		40
6. Виброударный рыхлитель ВР-25		50
7. Баровые установки		40
8. Взрывной метод, БТС-60		50
9. Оттаивание мерзлого грунта:		
при использовании угля		70-93
при использовании электроэнергии		200
коаксиальными электронагревателями		20
10. Укрытие теплоизоляционными материалами	1,2	40
11. Введение технической водорастворимой соли <i>NaCl</i> (в условиях БССР)		4-34
12. Введение технической соли <i>CaCl<sub>2</sub></i> (в условиях Тюменской области)		32

Как видно из таблицы 5, использование химического метода подготовки грунтов в условиях Тюменской области дешевле по сравнению с используемыми методами - рыхлением экскаватором, оборудованным клин-сабой и взрывным.

Общие выводы

1. Для условий таежной зоны Тюменской области разработан наиболее простой и эффективный по сравнению с существующими методами подготовки грунтов к разработке зимой - химический.
2. Экспериментально установлено, что введение в грунты хлористого кальция обеспечивает их пластическое состояние в пределах исследованных температур от  $0^{\circ}$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ .
3. Исследовано влияние хлористого кальция на некоторые физико-механические и физико-химические свойства грунтов. Искусственное противоморозное засоление грунтов, при отсутствии постоянных напряжений по отношению к углеродистым сталям, не представляет дополнительной коррозионной опасности. Насыщение грунтов ионами кальция незначительно уменьшает их оптимальную плотность и оптимальную влажность и резко увеличивает коэффициент фильтрации и их адсорбционную способность.
4. Установлена физическая картина перераспределения хлористого кальция при различных возможных водно-тепловых режимах суглинков в осенне-зимний периоды.
5. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлены зависимости коэффициента диффузии соли в суглинках от температуры и влажности грунта соответствующих видов:

$$D = B e^{\frac{A}{RT}}, \quad D = a + b + W,$$

и предложена методика назначения расчетного коэффициента диффузии.

6. Найдена экспериментальная зависимость между скоростью движения раствора хлористого кальция в суглинках и градиентом напора, которая соответствует виду:  $N = a \lg T + b$

7. Предложена формула для расчета оптимального времени внесения соли при химическом методе подготовки грунтов к разработке зимой в зависимости от температуры воздуха и коэффициента диффузии соли в грунте.
8. Предложена достаточно точная для практических целей формула для расчета нормы хлористого кальция в зависимости от температуры, влажности, объемного веса грунтов в момент разработки.
9. Показана экономическая эффективность внедрения химического метода на предприятиях треста "Тюменьлесстрой". Использование хлористого кальция обезвоженного (по ГОСТ 450-58) даст прямой экономический эффект по сравнению с взрывным методом мелкошпуровыми зарядами в размере 180 рублей на каждые 1000 м<sup>3</sup> разрабатываемого грунта, а по сравнению с методом послонного рыхления клин-бабой на экскаваторе - до 430 рублей.
10. Химический метод подготовки грунтов к разработке зимой с использованием хлористого кальция опробован в дорожно-строительном районе № 5 Гумосдора БССР в 1971-1972 годах и внедряется на предприятиях Тюменской области.

Основное содержание диссертации опубликовано

в следующих работах:

1. М.Г.Салихов, Л.Ф.Доронин. Исследование некоторых физико-механических свойств искусственно-засоленных грунтов в особо суровых климатических условиях. Материалы Всесоюзной конференции по проектированию, строительству и эксплуатации лесовозных дорог. Минск, 1972.

2. М.Г.Салихов, Н.Е.Максименко. Некоторые рекомендации при подготовке промерзающих грунтов к разработке химическим методом. Информационный листок БелНИИТИ, Минск, 1974, №070.
3. М.Г.Салихов, Н.Е.Максименко. О мерах по обеспечению эффективности химической противоморозной мелиорации грунтов. Информационный листок БелНИИТИ, Минск, 1974, № 071.
4. М.Г.Салихов. Подготовка промерзающих грунтов к разработке. Реферативная информация ВНИПИВЛеспрома "Лесосексплуатация и лесосплав", М., 1974, № 8.
5. М.Г.Салихов. О коррозионной активности искусственно-засоленных грунтов. Механизация лесоразработок и транспорт леса. Республиканские межведомственные сборники, выпуск 4, изд-во "Высшая школа", г.Минск, 1974.

Содержание основных разделов диссертации докладывалось и обсуждалось на

1. Всесоюзной конференции по проектированию, строительству и эксплуатации лесовозных дорог. Минск, сентябрь 1972 г.
2. Отчетных научно-технических конференциях Белорусского технологического института им.С.М.Кирова в апреле 1972 и 1973 гг.
3. XI юбилейной научно-технической конференции Белорусского института инженеров железнодорожного транспорта и ДорНТО Белорусской железной дороги. Гомель, ноябрь-декабрь 1973 г.
4. В областном семинаре по дорожному строительству, пос.Советский, Тюменской обл., 4-12 июля 1974 г.

АТ 10141. Зак. 205. Тир. 120 экз. Объём I п. л. Формат 60x84 1/16

Подписано к печати 23/2-75г. Отпечатано на роталпринте

БТИ им. С. М. Кирова,

---

Минск, Свердлова, 13.