

Петрович В.В., канд. техн. наук, Скрипник В.Ю.

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ РЕГУЛЮВАННЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ

**Анотація.** У статті узагальненні питання регулювання водно-теплого режиму дорожніх конструкцій різними методами. Проведено їх аналіз за результатами досліджень, що приводяться на сьогодні в цих напрямках та за нормативною базою України. Визначено можливі напрямки подальшої роботи.

**Ключові слова:** водно-тепловий режим, земляне полотно, дорожня конструкція, геосинтетичні матеріали.

**Аннотация.** В статье обобщены вопросы регулирования водно-теплого режима дорожных конструкций различными методами. Проведен их анализ по результатам исследований, проводимых на сегодня в этих направлениях и нормативной базой Украины. Определены возможные направления дальнейшей работы.

**Ключевые слова:** водно-тепловой режим, земляное полотно, дорожная конструкция, геосинтетические материалы.

**Annotation.** Various ways of water-heat regime regulation in road constructions have been summarized in article. The analysis of results of studies which took place in such areas and standard base of Ukraine, has been done. The main ways for further work were set.

**Keywords:** water-heat regime, subgrade, road construction, geosynthetic materials.

### Постановка проблеми

**Фізика процесу міграції вологи в ґрунтах активної зони земляного полотна.** Протягом року у водно-тепловому режимі земляного полотна автомобільних доріг у районах з сезонним промерзанням ґрунтів можна виділити чотири взаємопов'язаних періоди зміни вологості.

**У перший період** відбувається охолодження дорожнього одягу та земляного полотна, збільшення вологості та зниження щільності ґрунту. Основними джерелами зволоження в початковий період осіннього накопичення вологи є атмосферні опади та водяні пари. Залежно від потужності джерел зволоження та умов руху транспортних засобів на дорожньому одязі можуть виникати просідання. За кінець першого періоду можна прийняти початок сталого промерзання ґрунтів, що приблизно відповідає температурі повітря нижче  $-5^{\circ}\text{C}$ .

**У другій період** при промерзанні земляного полотна відбувається інтенсивне накопичення вологи в ґрунті, яка надходить в холодні місця з теплих місць. У верхніх горизонтах земляного полотна вміст вологи та температура менше, ніж у нижніх, що й обумовлює міграцію води з нижніх шарів у верхні. Вологість ґрунту земляного полотна поступово зростає, досягаючи максимуму в кінці холодного періоду.

Одночасно з накопиченням вологи, відбувається морозний обдимання ґрунтів, що супроводжується їх розуцільненням. Крім швидкості промерзання ґрунтів, на інтенсивність накопичення вологи та обдимання впливає швидкість міграції води, яка залежить від виду ґрунту, ступеню його ущільнення, умов підтікання води, зокрема ґрунтової.

**Третій період** відтавання земляного полотна і максимального водонасичення починається з встановлення у верхніх шарах стійких позитивних температур і триває до повного відтавання ґрунту. Вологість досягає максимуму; вода, що звільняється при відтаванні крижаних лінз, насичує розуцільнені в результаті здимання ґрунту, внаслідок чого різко знижується їх стійкість. Через перезволоження ґрунту розуцільнюється верхня частина земляного полотна.

Ґрунт відтає швидше під дорожнім одягом, ніж на узбіччях і укосах, тому в середній частині земляного полотна накопичується вільна вода, у якій відсутній вихід. У цей період збільшується небезпека руйнування дорожнього одягу.

Процес випаровування продовжується до тих пір, поки випаровування не перевершує припливу власне-капілярної або капілярно-підвішеної води до поверхні земляного полотна. В іншому випадку ґрунт просихає до вологості, що відповідає кількості зв'язаної води. Якщо в шарі відсутня вільна вода, яка визначається не тільки метеорологічними факторами, але й вологістю ґрунту в шарі, вологість зменшується, а з нею і інтенсивність випаровування.

Коли вологість ґрунту менше максимальної гігроскопічності і інтенсивність випаровування визначається метеорологічними факторами, важлива товщина шару сухого ґрунту, через який дифундують пари. Товщина цього шару з вологістю менше максимальної гігроскопічності, збільшується до моменту, коли інтенсивність випаровування не стане рівною притоку власне-капілярної або капілярно-підвішеної води до границі шару.

Пружність водяної пари безпосередньо над поверхнею зволоженого ґрунту дорівнює максимальній і визначається температурою поверхні. Перехід від максимальної пружності до пружності водяної пари в повітрі відбувається в межах приграничного шару.

актори, що регулюють випаровування, можна розділити на дві групи: 1) фактори, вплив яких можна виразити через постійні коефіцієнти; 2) фактори, що вимагають безпосереднього вимірювання.

**У першу групу входять фактори** (питома теплоємність повітря, прихована теплота випаровування тощо), які змінюються в дуже вузьких межах або несуттєво впливають на хід випаровування. Встановлено, що випаровування прямо пропорційно щільності повітря і зворотнопропорційно атмосферному тиску. Причому вони самі пов'язані між собою, тому в звичайних умовах зміна тиску повітря практично не впливає на швидкість випаровування.

**До другої групи факторів**, від яких залежить інтенсивність випаровування, відносять: температуру і вологість повітря, швидкість вітру, щільність і вологість ґрунту, товщину сухого шару ґрунту, через який дифундують водяні пари в атмосферу.

### **Теоретична частина питання**

Систематичне вивчення процесу зимового накопичення вологи в ґрунтах, проводиться з кінця минулого століття. Мабуть, перша гіпотеза про причини збільшення обсягу замерзаючих ґрунтів була висловлена в 1885 р. російським проектувальником залізниць В. А. Штукенбергом. У літературі існує досить велика кількість оглядів з розглянутої проблеми. Вони дані в роботах Н. А. Цитовича, Е. Д. Єршова та ін [1]. У цих оглядах наголошується, що в результаті надзвичайної складності міграції вологи при промерзанні ґрунтів і впливу на цей процес ряду факторів, фізика процесу міграції вологи в ґрунтах ще недостатньо вивчена. У зв'язку з цим, не розроблена розрахункова теорія, яка в загальному випадку давала б кількісно вірні результати.

Запропоновано більше десяти теорій міграції вологи при промерзанні ґрунту (капілярна теорія пір замерзання, теорії осмотичних тисків, порового вакууму і сил кристалізації, адсорбційно-плівкова теорія та ін.). Кожна з цих теорій має певну область застосування. Зокрема, у практиці фізико-хімічних методів боротьби з міграцією вологи і морозним обдиманням ґрунтів використовується теорія хімічного потенціалу, згідно з якою міграція води в промерзаючих ґрунтах є функцією вільної енергії поверхні мінеральних частинок або їх ізобарного потенціалу.

При будівництві автомобільних доріг в степових районах застосовують теорію В. М. Сіденка [2,3], а в північних районах в області багаторічномерзлих ґрунтів - теорію І. А. Золотаря [4], які базуються на диференціальному рівнянні тепло- та масообміну А. В. Ликова. При цьому в якості сил міграції розглядається потенціал масопереносу плівковою вологою.

В основу проектування доріг в районах з сезонним промерзанням ґрунтів покладено теорію Н. А. Пузакова - М. Б. Корсунського, в якій «сили всмоктування» приймаються як певний розрахунковий еквівалент сумарного дії сил міграції [5].

Є пропозиція Ю. М. Васильєва прогнозувати здимання в залежності від активної пористості ґрунту та вмісту в ньому зв'язаної води, а реальні умови, що визначають водно-тепловий режим земляного полотна, враховувати комплексним коефіцієнтом.

Групою вчених (д-р техн. наук В. І. Рувінський, д-р техн. наук, проф. В. Д. Казарновський, канд. техн. наук В. М. Смирновим, д-р техн. наук, проф. М. Б. Корсунським, канд. техн. наук Ю. М. Васильєвим; канд. техн. наук О. А. Сяпічем; канд. техн. наук В. Д. Браславським; д-р техн. наук, проф. А. Я. Тулаєвим, канд. техн. наук Н. В. Бистровим, канд. геол.-мінерал. наук С. М. Семеновим) розглянуті методи регулювання водно-теплого режиму (шляхом влаштування морозозахисних шарів, що влаштовуються з нездиманих ґрунтів і матеріалів, дренажних шарів з кондиційних зернистих матеріалів з водовідвідними пристроями та питання проектування: морозозахисних шарів з некондиційних пісків (слабоздимистих піщаних ґрунтів); теплоізолюючих шарів на ділянках доріг, де піднесення поверхні покриття над рівнем поверхневих і ґрунтових вод, верховодки і над поверхнею землі менше нормативних величин; дренажних шарів із зернистих матеріалів із коефіцієнтом фільтрації менше 1 м/добу, що працюють за принципом поглинання; гідроізолюючих, дренажних та капіляронериваючих прошарків;

спеціальних поперечників земляного полотна з метою захисту його від поверхневої води (зположування укосів, улаштування берми) і конструкції земляного полотна з підвищеною щільністю ґрунтів [6 - 8].

Зазначені заходи призначені для застосування в районах з сезонним промерзанням ґрунтів в II і III дорожньо-кліматичних зонах, а конструкції земляного полотна з підвищеною щільністю ґрунтів також у IV зоні. Причому проектування слід проводити на основі прогнозу основних водно-теплових процесів в земляному полотні, які впливають на цілорічні зміни щільності і вологості багат шарових ґрунтів робочого шару і основи насипу або виїмки при експлуатації дороги.

**Методи регулювання водно-теплого режиму земляного полотна** можна розділити на чотири основні групи.

**Перша група** включає заходи із заміни та поліпшення ґрунтів: зведення верхньої частини насипу з нездимистих або слабоздимистих ґрунтів, улаштування морозозахисних шарів, поліпшення зернового складу ґрунтів і обробку їх в'язучими.

Ущільнення як метод підвищення міцності і морозостійкості ґрунтів застосовується давно. У 30-і роки почалися систематичні дослідження Дорна в цій області, в результаті яких був запропонований (Н. Н. Іванов, М. Я. Телегін) метод стандартного ущільнення і складені перші вимоги зі щільності.

Як зазначалося, у процесі експлуатації дороги ґрунт земляного полотна може втрачати щільність. Але й за цих умов ущільнення ґрунту є ефективним методом поліпшення водно-теплого режиму земляного полотна.

Підвищення щільності, по-перше, покращує однорідність ґрунту, що призводить до зниження нерівномірності морозного здимання, по-друге, забезпечує більш високу мінімальну щільність, нижче якої не відбувається подальша втрата ґрунтом щільності, і по-третє, зменшує швидкість міграції капілярної води. Уповільнення цього процесу, очевидно, дозволяє краще сформуватися вторинної структурі ґрунту, в результаті чого він може мати більш високі міцнісні показники в порівнянні з ґрунтом непорушеної структури при однаковій щільності. Прикладом цього є відсутність у ряді випадків текучості ґрунту з непорушеною структурою при вологості вище межі текучості.

У Англії, Німеччині та ряді інших країн зміцнюють верхню частину земляного полотна, якщо модуль пружності ґрунтів нижче 44 МПа, різними

в'яжучими, в тому числі вапном, цементом, відходами целюлозної промисловості. Завдяки такому зміцненню забезпечуються порівняно високі значення характеристик міцності і деформаційних характеристик ґрунтів під дорожнім одягом, зменшується здимання покриття і обмежується надходження атмосферних опадів в ґрунт земляного полотна.

**Друга група** об'єднує заходи щодо відведення води з дорожнього одягу, включаючи улаштування дренажних шарів і прошарків, дренажі мілкового закладання.

Методи розрахунку дренажних шарів і принципи конструювання дренажних пристроїв, для осушення дорожнього одягу і верхньої частини земляного полотна, вперше розроблені А. Я. Тулаєвим та його учнями. Значний розвиток ці методи отримали в роботах М. Б. Корсунського, П. Д. Россовського та інших [9 - 11].

Розрахунок ведеться за принципом осушення, тобто виходячи з умови, що добовий сумарний приплив води, що надходить в дренажний шар, повністю відводиться за той же період часу. При цьому враховують, що через різні строки відтавання дренажної системи виникає необхідність обліку тимчасового розміщення води у вільних порах дренажного шару за період (3-6 діб) запізнювання початку роботи водовідвідних пристроїв. Вітчизняний і зарубіжний досвід показує, що улаштування дренажної системи для осушення дорожнього одягу та ґрунтової основи є одним з найбільш ефективних заходів з підвищення довговічності покриття. Однак для того, щоб отримати такий ефект, необхідно виконати ряд умов.

За даними Г. Р. Седергрена, дренажний шар необхідно влаштовувати з високо проникної скелетної суміші (щебеню або гравію) відкритого типу (з незаповненими порожнечами) і укласти цей шар під дорожнім одягом по всій її ширині з дренажними трубами для збору і швидкого відводу води за межі земляного полотна. В більшості випадків значення коефіцієнтів фільтрації повинні перебувати в діапазоні від 1,7 до 35 см/с.

**У третю групу** входять заходи, які регулюють тепловий режим земляного полотна шляхом улаштування теплоізоляційних шарів.

Спостереження на полігоні та зарубіжний досвід показують, що теплоізоляційні матеріали повинні володіти мінімальною міцністю. Теплоізоляційні шари маломіцних матеріалів можуть бути причиною зниження міцності дорожнього одягу. Це обумовлено стисливістю самого теплоізоляційного шару і неможливістю досягти необхідного ступеня

ущільнення верхніх шарів. При стисненні теплоізолятора відзначається погіршення його теплофізичних властивостей. За даними ряду дослідників Німеччини, межа міцності пінопласту при 10%-му стисненні не повинна бути менше 0,29 МПа, а міцність при вигині - 0,59 МПа.

На полігоні СоюзДорНІІ протягом 5 років проводилися спостереження за роботою конструкції з теплоізоляційним шаром з пінопласту марки ПС-4 об'ємною масою 60 кг/м<sup>3</sup>. Цей пінопласт з полістиролу має замкнутопористу структуру, межа його міцності на стиск при 10%-ної лінійної деформації 0,29 МПа, межа міцності при вигині 1,18 МПа, модуль пружності 32,85 МПа, коефіцієнт морозостійкості пінопласту після 25 циклів промерзання-відтавання при температурі заморожування -20 °С дорівнює 0,95. Випробування зразків пінопласту, відібраних з дорожнього одягу, показали, що його теплофізичні показники практично не змінилися; те саме стосується і товщини шару пінопласту.

Одним з ефективних теплоізоляційних матеріалів є стиропорбетон на щебені з відходів жорстких пінопластів. До складу цього матеріалу об'ємною масою 960 кг/м<sup>3</sup> входять компоненти (на г/м<sup>3</sup>): 1000 л частинок пінопласту, 370 кг цементу (М500), 360 кг піску і 160 л води. Коефіцієнт морозостійкості, що визначається у віці 28 діб при 25 циклах заморожування - відтавання, дорівнює 0,96, розрахунковий модуль пружності - 590 МПа, межа міцності при вигині - 340 кПа, коефіцієнт теплопровідності - 0,21 Вт / (м.К). В якості теплоізоляційних шарів можна також використовувати аглопоритовий щебінь і пісок, керамзитовий гравій, укріплені неорганічними в'язучими.

Другим напрямком досліджень є вивчення впливу теплоізоляційних шарів на процеси вологонакопичення та здимання в ґрунтах. У рамках цього напряму отримані дані про вологість та щільності ґрунтів під час обдимання земляного полотна, які показали, що розмір обдимання покриття та ступінь його нерівномірності багато в чому визначаються глибиною промерзання земляного полотна. Спостереження за температурним режимом, які проводилися за допомогою термодатчиків, показали, що на ділянках з легкими бетонами глибина промерзання не більше 1,1 м, на ділянці з пінопластом - 0,35 м, а без теплоізоляційного шару - 1,8 м.

**До четвертої групи** слід віднести заходи з обмеження зволоження земляного полотна поверхневими і ґрунтовими водами: захист його в процесі будівництва, відведення води з узбіччя та їх зміцнення, осушення розділової смуги та смуги відведення, забезпечення мінімального піднесення низу

дорожнього одягу над рівнем поверхневих і ґрунтових вод шляхом улаштування насипів або зниження рівня ґрунтових вод, будівництва паро- та гідроізолюючих шарів, капіляронериваючих прошарків, електро- і хімічні методи, а також ущільнення ґрунтів.

Найбільш поширені заходи з водовідведення, які включають улаштування нагірних і водовідвідних каналів, планування резервів, виїмок, полотна дороги і т. д. У цьому плані цікавить практика відводу води, прийнята у Франції, де протягом всього періоду будівництва земляне полотно планують з уклоном близько 100 проміле.

У США, Канаді, Німеччині, Франції та в ряді інших країн широко застосовують зміцнення узбіччя та улаштування лотків для збору і відводу води з проїжджої частини, щоб зменшити приплив атмосферних опадів в земляне полотно в процесі експлуатації дороги. Поперечний похил узбіччя роблять від 20 до 80 проміле виходячи з типу укріплення (за межами крайової смуги) узбіччя, наявності стоку води з проїжджої частини на узбіччя та умов безпеки руху. Поперечний похил ґрунтової частини узбіччя у бровки земляного полотна досягає 120 проміле.

У фахівців існують різні думки з питання про те, потрібні чи ні бічні канали (кювети). В.Фукс (Німеччина) пропонує кювети влаштовувати тільки на водонепроникних ґрунтах.

За англійським даними, надходження води в основу дорожнього одягу часто спостерігається при наявності дрібних кюветів у підшви земляного полотна. Ряд англійських дослідників вважає, що для відводу поверхневих вод при водонепроникних ґрунтах кювети доцільні, але ефективність їх в умовах добре фільтруючих ґрунтів сумнівна. Існує виражена тенденція влаштовувати широкі й неглибокі кювети з виположеними укосами. Завдяки цьому збільшується безпека руху, віддаляються від проїжджої частини поверхневі води, що зменшує можливість їх просочування в земляне полотно, а також не порушується гармонійний зв'язок дороги з ландшафтом.

Іншим рішенням поверхневого водовідводу, зокрема в Канаді, є улаштування кюветів на деякій відстані від підшви насипу. У 1965 р. В. М. Сіденко вперше запропонував для степових районів метод розрахунку мінімального видалення каналів від проїжджої частини, при якому стоїть в них вода не підвищує вологість під укріпленою смугою узбіччя і під дорожнім одягом вище певних значень [9]. Цей метод заснований на передумовах, що волога в ґрунті переміщається тільки під час стояння води в каналі, а перед кожним



новим періодом застою води в канаві відновлюється первісна вологість ґрунту в межах берм і земляного полотна. Вплив випаровування води на процес міграцій вологи не розглядається.

У 1966 р. опублікований метод розрахунку ширини берм або крутизни укосу для забезпечення «безпечного» положення поверхневих вод, у тому числі для тих, що застоюються в кюветах, в районах значного та надмірного зволоження ґрунтів. Розрахункова схема передбачає, що на ділянках з незабезпеченим поверхневим стоком міграція вологи в ґрунті відбувається: восени і навесні (під час застою води в канавах) у вигляді власне-капілярної води; взимку, коли вода на поверхні замерзає, і влітку, коли вона випаровується, - у вигляді капілярно-підвішеної води. Влітку можливі два випадки: випаровування капілярно-підвішеної води з відновленням початкової вологості; її рух у напрямку до земляного полотна протягом усього літа.

Щоб захистити земляне полотно від перезволоження, в процесі будівництва організують відвід поверхневої води і укладають захисні шари: плівки полімерні, бітумні та ін.

У ряді країн (ФРН, Японія, Португалія та ін) укладають захисні шари: полімерні плівки, ґрунт, укріплений вапном або цементом, бітумні плівки і т. д.

Для поліпшення водно-теплового режиму земляного полотна можна використовувати геосинтетичні матеріали для облаштування дренажних, капілярноперериваючих прошарків. Перші результати застосування нетканих синтетичних матеріалів як протиздіймального заходу були озвучені на першій Міжнародній конференції з використання промислових волокон в геотехніці (Париж, 1977 р.). Була дана загальна характеристика конструкцій з гідроізолюючими прошарками, які повинні: витримувати без пошкодження навантаження, що виникають при укладанні та ущільненні верхніх шарів ґрунту та дорожнього одягу, рух автомобілів на дорозі; протистояти впливу нерівномірного морозного обдимання та опадам ґрунтів без розривів та проколів; протистояти впливу вологи і температури, не змінюючи ізоляційних властивостей; чинити опір руйнівній дії мікроорганізмів і агресивних вод; бути технологічними.

Потрібно зазначити, що раніше широке впровадження геосинтетичних матеріалів стримувалося відсутністю нормативних документів, які б регламентували правила застосування та методи випробувань геосинтетичних матеріалів, що спричиняло труднощі при проектуванні, будівництві та контролі якості матеріалів і обмежувало використання

геосинтетики. На відмінно, від Європи, в якій прийнято норми DIN, ISO, та США, у яких прийнято ASTM та AASHTO, які регламентують використання геосинтетиків. Проте, за останні декілька років ця ситуація змінилась. Було розроблено і впроваджено нормативні документи ВБН В.2.3-218-544: 2008 «Споруди транспорту. Матеріали геосинтетичні в дорожньому будівництві», СОУ 45.2-00018112-025:2007 «Матеріали геосинтетичні. Методи випробувань», «Посібник з проектування земляного полотна і дорожніх одягів із застосуванням геосинтетичних матеріалів (доповнення до ВБН В.2.3-218-...-2006)» та ін.

В ДБН В.2.3-4:2007 «Споруди транспорту. Автомобільні дороги» визначені заходи щодо забезпечення міцності і стійкості земляного полотна та робочого шару в першу чергу шляхом: регулювання водно-теплового режиму земляного полотна за допомогою гідроізолюючих, дренаючих або капілярперериваючих прошарків та використання армуючих прошарків на основі техніко-економічних розрахунків.

В ВБН В.2.3-218-186-2004 «Дорожній одяг нежорсткого типу» наведені основні способи регулювання водно-теплового режиму дорожніх конструкцій шляхом:

- віддалення одягу від рівня ґрунтових вод;
- улаштування морозостійких, теплоізолюючих шарів;
- відведення надлишкової води шляхом улаштування дренажного шару (площин-ний дренаж);
- улаштування гідроізоляційних шарів;
- регулювання водно-теплового режиму за рахунок улаштування паронепроникних шарів.

### **Висновок**

Перспективним напрямом регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції в цілому слід вважати улаштування прошарків з геотекстильних матеріалів.

### **Перспективи**

Досвід застосування армоконструкцій у світовому будівництві показує, що вони більш ефективні та економічні, ніж традиційні. Однак треба врахувати, що ефективність регулювання водно-теплового режиму буде залежити від механічних і реологічних властивостей геоматеріалу і шарів дорожньої конструкції, а також умов закладення, глибини і характеру розташування прошарків у шаруватій дорожній конструкції.

## Література

1. Цитович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М: Высшая школа, 1973.
2. Сиденко В.М. Основные проблемы исследований теплообмена в дорожном строительстве. -М.: Труды Союздорнии, вып. 76. – 1975. – С. 83-93.
3. Сиденко В.М. Расчёт и регулирование водно-теплового режима дорожных одежд и земляного полотна. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 116 с.
4. Золотарь И.А. Обеспечение надёжности автомобильных дорог по прочности при их проектировании, строительстве и эксплуатации. Санкт-Петербург: ВАТТ, 1996. - 84 с.
5. Пузаков Н.А. Теоретические основы накопления влаги в дорожном полотне и их практическое применение. В кн. "Проектирование и сооружение земляного полотна железных и автомобильных дорог". – М.: Изд-во АН СССР, 1950. - С. 58-88.
6. Корсунский М.Б., Гайваронский В.Н., Россовский П.Д. Прогнозирование расчётной влажности грунтов земляного полотна. –М.: Труды Союздорнии, вып. 76, 1975. – С. 5-29.
7. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна (на основе регулирования водно-теплового режима). – М.: Транспорт, 1982. - 166 с.
8. Рувинский В.И. и др. Гидроизолирующие прослойки для улучшения водно-теплового режима земляного полотна // Автомобильные дороги, 1985 г., №12. – С. 23-24.
9. Корсунский М.Б., Гайваронский В.Н., Россовский П.Д. Прогнозирование расчётной влажности грунтов земляного полотна. – М.: Труды Союздорнии, вып. 76, 1975. – С. 5-29.
10. Тулаев А.Я. Регулирование водного режима земляного полотна на автомобильных дорогах. В кн.: "Проектирование и возведение земляного полотна железных и автомобильных дорог. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 89-163.
11. Тулаев А.Я., Пузаков Н.А., Богатырёва Е.И. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна в городских условиях. – М.: Высшая школа, 1972. – 121 с.
12. Сиденко В.М., Батраков О.Т. и др. Автомобильные дороги (совершенствование методов проектирования и строительства). – Киев: Будивельник, 1973. - 278 с.