

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-06>

УДК: 625.7:624.131.3

МРНТИ: 73.31.11

Определение расчётной влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог в засушливых регионах Казахстана

^{*1} Еспаева Г.А., ¹ Турсумбекова Х.С.

^{*1} ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: g.yespayeva@alt.edu.kz

Поступила: Март 20, 2026 Рецензирование: Апрель 05, 2026 Принята в печать: Сентябрь 15, 2026	Аннотация В статье рассмотрены особенности определения расчётной влажности грунта рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог в условиях засушливого климата Казахстана. Исследование основано на результатах полевых и лабораторных работ, выполненных на автомобильных дорогах Жамбылской, Южно-Казахстанской и Кызылординской областей. Выполнены расчёты влажности лёгкого пылеватого суглинка при различных типах увлажнения рабочего слоя, а также при отсутствии и наличии промерзания земляного полотна. Установлено, что при отсутствии промерзания расчётная влажность составляет 0,185 для первого типа увлажнения и 0,208 для второго и третьего типов. При промерзании верхнего слоя толщиной 0,20 м средняя расчётная влажность рабочего слоя возрастает до 0,192; 0,213 и 0,216 соответственно для первого, второго и третьего типов увлажнения. Дополнительно выполнена оценка требуемого возвышения поверхности покрытия относительно уровня поверхностных и подземных вод. Установлено, что при длительном стоянии поверхностных вод определяющим является требование к высоте насыпи не менее 0,95 м. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании земляного полотна и обосновании технологии уплотнения грунтов в засушливых и орошаемых регионах Казахстана. Ключевые слова: земляное полотно, автомобильная дорога, влажность грунта, расчётная влажность, засушливый климат, коэффициент уплотнения, промерзание грунта
<i>Гулсум Еспаева</i>	Информация об авторах: Кандидат технических наук, ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7228-4813 E-mail: g.yespayeva@alt.edu.kz
<i>Хорлан Турсумбекова</i>	Кандидат технических наук, ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8821-7428 E-mail: khorlan_57@mail.ru

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-06>

ӘОЖ: 625.7:624.131.3

FTAMP: 73.31.11

**Қазақстанның құрғақ аймақтарындағы автомобиль жолдарының жер төсемі
топырағының есептік ылғалдылығын анықтау**

***¹ Еспаева Г.А., ¹ Турсумбекова Х.С.**

¹ Мұхамеджан Тынышпаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан

*Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): g.yespayeva@alt.edu.kz

Мақала келді: Наурыз 20, 2026 Сараптамадан өтті: Сәуір 05, 2026 Қабылданды: Қыркүйек 15, 2026	Түйіндеме Мақалада Қазақстанның құрғақ климаттық жағдайларында автомобиль жолдарының жер төсемінің жұмыс қабатындағы топырақтың есептік ылғалдылығын анықтау ерекшеліктері қарастырылған. Зерттеу Жамбыл, Оңтүстік Қазақстан және Қызылорда облыстарының автомобиль жолдарында жүргізілген далалық және зертханалық жұмыстар нәтижелеріне негізделген. Жеңіл шаңды саздақ топырақтың жер төсемі жұмыс қабатының әртүрлі ылғалдану түрлеріндегі, сондай-ақ жер төсемі қатпаған және қатқан жағдайлардағы есептік ылғалдылығы анықталды. Жер төсемі қатпаған жағдайда есептік ылғалдылық бірінші ылғалдану түрі үшін 0,185, ал екінші және үшінші түрлер үшін 0,208 құрады. Қалыңдығы 0,20 м жоғарғы қабат қатқан кезде жұмыс қабаты топырағының орташа есептік ылғалдылығы сәйкесінше 0,192; 0,213 және 0,216 мәндеріне дейін артатыны анықталды. Сонымен қатар жол жамылғысы бетінің жерүсті және жерасты сулары деңгейінен қажетті биіктігі бағаланды. Жерүсті сулары ұзақ уақыт сақталған жағдайда үйіндінің биіктігі кемінде 0,95 м болуы қажет екендігі анықталды. Алынған нәтижелер Қазақстанның құрғақ және суармалы аймақтарында жер төсемін жобалау және топырақты тығыздау технологиясын негіздеу кезінде пайдаланылуы мүмкін. Түйін сөздер: жер төсемі, автомобиль жолы, топырақ ылғалдылығы, есептік ылғалдылық, құрғақ климат, тығыздау коэффициенті, топырақтың қатуы
Гулсум Еспаева	Авторлар туралы ақпарат: Техникалық ғылымдар кандидаты, Мұхамеджан Тынышпаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7228-4813 E-mail: g.yespayeva@alt.edu.kz
Хорлан Турсумбекова	Техникалық ғылымдар кандидаты, Мұхамеджан Тынышпаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8821-7428 E-mail: khorlan_57@mail.ru

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-06>

UDC: 625.7:624.131.3

IRSTI: 73.31.11

Determination of the design moisture content of road subgrade soils in arid regions of Kazakhstan^{*1} *Yesspayeva G.*, ² *Tursumbekova K.*¹ D Mukhamedzhan Tynyshpayev ALT University, Almaty, Kazakhstan*Corresponding author e-mail: g.yesspayeva@alt.edu.kz

Received: March 20, 2026 Under review: April 05, 2026 Accepted for publication: September 15, 2026	Abstract The article considers the determination of the design moisture content of the subgrade working layer under arid climatic conditions in Kazakhstan. The study is based on field and laboratory investigations conducted on roads in the Zhambyl, South Kazakhstan and Kyzylorda regions. The design moisture content of light silty loam was evaluated for different moisture conditions of the subgrade working layer, both with and without freezing. Under non-freezing conditions, the calculated moisture content was 0.185 for the first moisture condition and 0.208 for the second and third moisture conditions. When the upper 0.20 m layer was frozen, the average calculated moisture content of the working layer increased to 0.192, 0.213 and 0.216 for the first, second and third moisture conditions, respectively. The required elevation of the pavement surface above groundwater and surface water levels was also assessed. It was established that prolonged surface water accumulation is the governing condition, requiring an embankment height of at least 0.95 m. The obtained results can be used in subgrade design and in selecting appropriate soil compaction technologies for arid and irrigated regions of Kazakhstan. Keywords: subgrade, highway, soil moisture, design moisture content, arid climate, compaction coefficient, soil freezing
<i>Gulsum Yesspayeva</i>	Information about authors: Candidate of Technical Sciences, D Mukhamedzhan Tynyshpayev ALT University, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7228-4813 E-mail: g.yesspayeva@alt.edu.kz
<i>Khorlan Tursumbekova</i>	Candidate of Technical Sciences, D Mukhamedzhan Tynyshpayev ALT University, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8821-7428 E-mail: khorlan_57@mail.ru

1. Введение

Надёжность автомобильной дороги в значительной степени определяется состоянием земляного полотна, свойства которого зависят не только от физико-механических характеристик грунта и степени его уплотнения, но и от водно-теплового режима [1,2]. Для территорий с выраженным дефицитом атмосферной и грунтовой влаги проблема приобретает особое значение, поскольку недостаток воды в период производства земляных работ затрудняет достижение требуемой плотности грунта, тогда как сезонное переувлажнение способно существенно снизить его прочность и деформационную устойчивость [3].

Значительная часть территории Казахстана характеризуется засушливыми и полувасушливыми климатическими условиями. При строительстве автомобильных дорог на таких территориях технология возведения земляного полотна имеет ряд особенностей. В верхнем деятельном слое грунта сезонные изменения могут проявляться в широком диапазоне — от практически полного иссушения до избыточного увлажнения [4,5].

Дополнительным фактором является распространение специфических грунтов: лёссов, лёссовидных суглинков, засоленных грунтов, солонцов и солончаков. Их прочностные и технологические свойства существенно изменяются в зависимости от влажности и степени уплотнения. В районах орошаемого земледелия ситуация осложняется возможным близким залеганием грунтовых вод, а также длительным стоянием поверхностных вод [6].

Изменение влажности грунта влияет на величину модуля упругости, деформативность, морозное пучение и несущую способность рабочего слоя земляного полотна. Поэтому при проектировании дорожной конструкции использование только оптимальной влажности, определённой стандартным методом уплотнения, не всегда позволяет адекватно характеризовать фактическое состояние грунта в расчётный период эксплуатации [7,8].

Особенно важно определять расчётную влажность для наиболее неблагоприятного периода, поскольку именно при повышенном увлажнении или сезонном промерзании создаются условия для снижения прочности грунтов основания дорожной одежды.

Исходя из этого, актуальной задачей является разработка и практическая апробация расчётного подхода, позволяющего учитывать тип увлажнения рабочего слоя, глубину промерзания, физические свойства грунта, параметры дорожной одежды и положение поверхностных и подземных вод.

Цель исследования — определить расчётную влажность грунта рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог в условиях засушливого климата Казахстана при различных типах увлажнения и температурно-влажностных условиях и на этой основе установить требования к высоте насыпи и технологии производства земляных работ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. определить расчётную влажность грунта при отсутствии промерзания земляного полотна;
2. установить изменение расчётной влажности при промерзании части рабочего слоя;
3. оценить влияние типа увлажнения на величину расчётной влажности;
4. определить необходимое возвышение поверхности покрытия относительно уровня поверхностных и грунтовых вод;
5. сформулировать технологические рекомендации по устройству и уплотнению земляного полотна в засушливых условиях.

2. Материалы и методы

2.1. Объекты и исходные данные исследования

В основу исследования положены данные лабораторных и полевых работ, выполненных лабораторией КазАДИ на автомобильных дорогах Жамбылской, Южно-Казахстанской и Кызылординской областей местного значения.

В качестве расчётных объектов рассмотрены участки автомобильных дорог «Куюк–Аса–Жанатас–Саудакент» в Жамбылской области и «Таукент–рудник Мойынкум» в Туркестанской области [9].

Для автомобильной дороги «Куюк–Аса–Жанатас–Саудакент» конструкция дорожной одежды включает холодный асфальтобетон толщиной 7 см, слой природного гравия фракции 0–30 мм толщиной 14 см и слой крупнозернистого песка толщиной 11 см. Общая толщина конструкции составляет 32 см, фактический модуль упругости — 168 Мпа [10].

Для дороги «Таукент–рудник Мойынкум» конструкция включает 6 см холодного асфальтобетона, 22 см мелкого природного гравия и 19 см среднезернистого песка. Общая толщина дорожной одежды составляет 47 см при фактическом модуле упругости 181 Мпа (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики рабочего слоя земляного полотна представленного лёгким пылеватым суглинком

Показатель	Значение
Влажность на границе раскатывания W_p	17 %
Влажность на границе текучести W_L	29 %
Оптимальная влажность W_{opt}	16 %
Максимальная плотность скелета грунта	1,70 т/м ³
Коэффициент уплотнения	0,98

2.2. Методика определения расчётной влажности

Расчёт выполнялся отдельно для условий отсутствия промерзания земляного полотна, промерзания части рабочего слоя, а также для первого, второго и третьего типов увлажнения [11,12].

При отсутствии промерзания расчётная влажность первого типа увлажнения определялась с использованием оптимальной влажности и расчётной влажности, соответствующей второму и третьему типам:

$$W_{расч}(1) = (W_{опт} + W_{расч}(2,3)) / 2 \quad (1)$$

Для определения влажности при других условиях использовались соотношения, учитывающие плотность частиц грунта, нормативный коэффициент уплотнения, максимальную плотность скелета грунта, плотность воды и объём воздуха в грунте.

При промерзании рабочего слоя дополнительно учитывались относительная величина морозного пучения, нагрузка на зону пучения от собственного веса дорожной одежды, коэффициент влияния нагрузки на морозное пучение и количество незамерзшей воды в грунте.

Количество незамерзшей воды рассчитывалось по выражению:

$$W_{из} = K_{из} \times W_p \quad (2)$$

В расчётном примере толщина промёрзшего слоя под дорожной одеждой принималась равной 0,20 м.

Давление на грунт от собственного веса дорожной одежды:

$$P = (2400 \times 0,05 + 2300 \times 0,08 + 1800 \times 0,20 + 1950 \times 0,20) \times 0,0098 = 10,3 \text{ кПа.}$$

Количество незамерзшей воды:

$$W_{из} = 0,40 \times 0,17 = 0,068$$

2.3. Определение необходимой высоты насыпи

Отдельный расчёт выполнен для автомобильной дороги III технической категории, проходящей по орошаемой территории.

Приняты следующие гидрогеологические условия: уровень грунтовых вод летом — 0,30 м от поверхности земли; уровень грунтовых вод в осенне-весенний период — 1,50 м; длительность стояния поверхностных вод — более 30 суток.

Для расчёта использованы характеристики слоёв дорожной одежды: горячий плотный асфальтобетон — $E = 3200$ МПа, $h = 0,05$ м; пористый асфальтобетон — $E = 2000$ МПа, $h = 0,08$ м; гранитный щебень — $E = 400$ МПа, $h = 0,20$ м; среднезернистый песок — $E = 100$ МПа, $h = 0,20$ м.

Расчётное среднее удельное давление колеса принято равным 0,6 МПа, диаметр следа колеса — 0,37 м. Модуль упругости лёгкого пылеватого суглинка при относительной влажности 0,72 принят равным 43 МПа.

3. Результаты

3.1. Расчётная влажность при отсутствии промерзания

Для второго и третьего типов увлажнения расчётная влажность рабочего слоя составила $W_{расч(2,3)} = 0,208$.

При влажности на границе текучести $WL = 0,29$ относительная величина влажности составила $0,208 / 0,29 = 0,72$.

Для первого типа увлажнения $W_{расч(1)} = (0,16 + 0,21) / 2 = 0,185$.

Относительная влажность составила $0,185 / 0,29 = 0,64$.

Таким образом, при отсутствии промерзания переход от первого типа увлажнения ко второму и третьему сопровождается повышением расчётной влажности грунта с 0,185 до 0,208.

3.2. Расчётная влажность при промерзании рабочего слоя

При толщине промёрзшего грунта 0,20 м для первого типа увлажнения расчётная влажность в пределах зоны промерзания составила $W_{расч(м)} = 0,224$. Относительно границы текучести это соответствует 0,77. С учётом влажности грунта ниже глубины промерзания, равной 0,185, среднее по глубине значение составило $W_{расч(1)} = 0,192$, или 0,66 от влажности на границе текучести.

Для второго типа увлажнения влажность мерзлого слоя составила $W_{расч(м)} = 0,236$, а относительная влажность — 0,81. После осреднения по глубине рабочего слоя $W_{расч(2)} = 0,213$, или 0,73 от влажности на границе текучести.

Для третьего типа увлажнения расчётная влажность промёрзшего слоя составила $W_{расч(м)} = 0,257$, что соответствует 0,89 от влажности на границе текучести. После учёта непромёрзшей части рабочего слоя средняя расчётная влажность составила $W_{расч(3)} = 0,216$, или 0,75 от влажности на границе текучести (табл 2.).

Таблица 2. Расчётная влажность грунта рабочего слоя земляного полотна при различных условиях увлажнения и промерзания

Условия	Расчётная влажность	W/WL
Без промерзания, 1-й тип	0,185	0,64
Без промерзания, 2–3-й тип	0,208	0,72
С промерзанием, 1-й тип	0,192	0,66
С промерзанием, 2-й тип	0,213	0,73
С промерзанием, 3-й тип	0,216	0,75

Наиболее неблагоприятные условия формируются при третьем типе увлажнения в сочетании с промерзанием грунта.

3.3. Определение требуемой высоты насыпи

Средний модуль упругости дорожной одежды по исходным значениям модулей упругости и толщин её конструктивных слоёв составил $E_{до} = 792$ МПа.

В результате расчёта требуемое возвышение поверхности покрытия относительно уровня грунтовых вод в летний период составило 0,73 м.

Поскольку летом грунтовые воды располагаются на глубине 0,30 м от поверхности земли, минимальная высота насыпи определяется как $H = 0,73 - 0,30 = 0,43$ м.

Для осенне-весеннего периода при глубине уровня грунтовых вод 1,50 м расчётное требование составляет $H = 1,60 - 1,50 = 0,10$ м.

При длительном стоянии поверхностных вод необходимая высота насыпи возрастает до 0,95 м. Следовательно, из трёх рассматриваемых условий определяющим является воздействие поверхностных вод, и проектная высота насыпи должна быть принята не менее 0,95 м.

Исходя из вышеизложенным, нами были разработаны методика определения расчётной влажности грунта рабочего слоя земляного полотна в условиях засушливого климата. При этом расчетные параметры грунта были определены лабораторией КазАДИ при выполнении полевых работ на автомобильных дорогах Жамбылской, Южно-Казахстанской и Кызылординской областей местного значения. Ниже приводится алгоритм и результаты расчета. Приходная часть уравнения водного баланса определяется расчётом по площади водосбора ливневого стока, расходная – по метеорологическим ежемесячникам Гидрометслужбы, испарение, впитывание – на основе определения фильтрационных показателей поверхностного слоя подстилающих грунтов.

Пример 1. Определения расчётной влажности грунта рабочего слоя земляного полотна. Рассматриваемые дороги проходят по орошаемой территории. Рабочий слой земляного полотна утраивается из суглинка легкого пылеватого (влажность на границе раскатывания 17 %, влажность на границе текучести 29 %, оптимальная влажность 16 %), максимальная плотность скелета грунта $1,7 \text{ т/м}^3$, коэффициент уплотнения, определенные в лаборатории КазАДИ 0,98.

Конструкция дорожной одежды: а) автомобильная дорога «Куюк–Аса–Жанатас–Саудакент» (Жамбылская область) (рис. 1): 1 – холодный асфальтобетон, $h=7$ см, фактическая плотность $2,4 \text{ т/м}^3$; 2 – природный гравий с крупностью 0-30 мм, $h=14$ см, плотность $1,80 \text{ т/м}^3$; 3 – крупнозернистый песок, $h=11$ см. 4 – грунт земляного полотна. Общая толщина дорожной одежды – 32 см; фактическая модуль упругости $E_{фак}=168$ МПа; б) автомобильной дороги «Таукент–рудник Мойынкум» (Туркестанская область) (рис. 2): 1 – холодный асфальтобетон, $h=6$ см; 2 – мелкий природный гравий, $h=22$ см; 3 – песок среднозернистый, $h=19$ см; 4 – грунт земляного полотна. Общая толщина конструкции дорожной одежды – 47 см, $E_{фак}=181$ МПа

а)



б)



Рисунок 1. Общий вид автомобильной дороги «Куюк–Аса–Жанатас–Саудакент» (Жамбылская область) [материал автора]

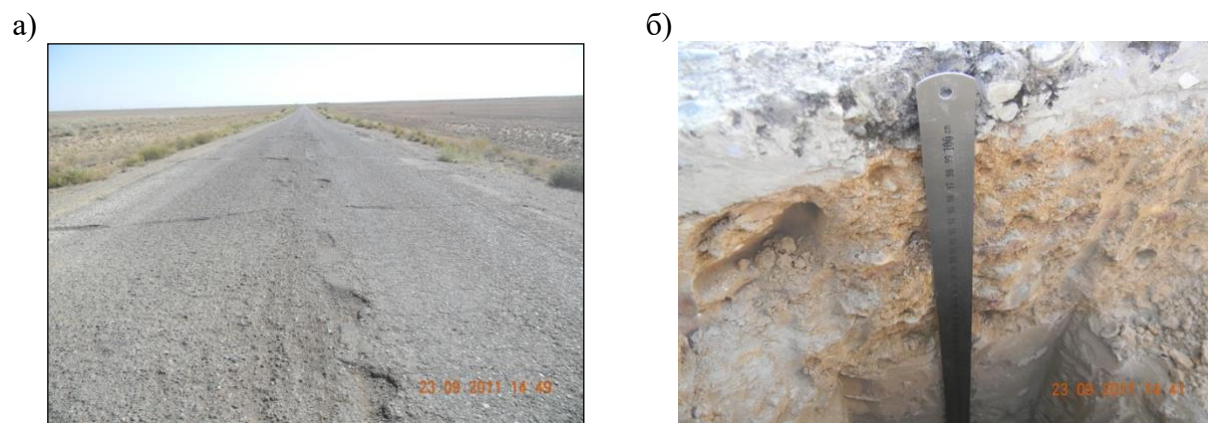


Рисунок 2. Общий вид автомобильной дороги «Таукент–рудник Мойынкүм» (Туркестанская область) [материал автора]

1. Определение расчётной влажности грунта при отсутствии промерзания земляного полотна под дорожной одеждой.

Алгоритм расчета. Величину расчётной влажности грунта в пределах зоны промерзания земляного полотна можно определять по формуле [3]:

$$W_{PACЧ(M)} = \frac{\rho_B}{1.09} \left\{ \frac{1 + l_{пуч} \left[1 - a_{пг} \left(1 + \frac{P}{P_0} \right) \right]}{K_y \rho_{СК(MAX)}} - \frac{1}{\rho_{ГР}} \right\} + 0.083 W_{ИЗ} \quad (3)$$

где $W_{PACЧ(M)}$ – влажность в расчётный период в пределах зоны промерзания земляного полотна под дорожной одеждой, доли единицы; $l_{пуч}$ – относительная величина морозного пучения грунта, доли единицы; $a_{пг}$ – коэффициент, учитывающий влияние нагрузки на пучение грунта, безразмерная величина; P – нагрузка на зону пучения грунта, равная давлению веса дорожной одежды, МПа; P_0 – нагрузка на грунт, при которой устанавливается значение коэффициента $a_{пг}$, Па, $P_0=9,8$ КПа; $W_{ИЗ}$ – величина незамерзшей воды в грунте по формуле (3), доли единицы.

$$W_{ИЗ} = K_{ИЗ} W_u \quad (4)$$

где $K_{ИЗ}$ – коэффициент, зависящий от вида грунта, числа пластичности и температуры мерзлого грунта; W_u – влажность грунта на границе раскатывания, доли единицы.

Величину расчётной влажности грунта при отсутствии промерзания земляного полотна под одеждой следует определять по формулам (4) и (5) [3]:

$$W_{PACЧ(1)} = (W_{ОПТ} + W_{PACЧ(2,3)})/2, \quad (5)$$

$$W_{PACЧ(1)} = (p_{гг} - K_y \cdot p_{СК(MAX)} \cdot p_B) / K_y \cdot p_{СК(MAX)} \cdot p_B - V_{ВОЗД}, \quad (6)$$

где $W_{PACЧ(1)}$ – влажность грунта в расчётный период при 1-ом типе увлажнения рабочего слоя земляного полотна, доли единицы; $W_{ОПТ}$ – оптимальная влажность грунта, доли единицы; $W_{PACЧ(2,3)}$ – влажность грунта в расчётный период при 2-ом и 3-ем типах увлажнения рабочего слоя земляного полотна, доли единицы. $\rho_{ГР}$ – плотность частиц грунта, т/м³; K_y – нормативное значение коэффициента уплотнения грунта; $\rho_{СК(MAX)}$ – максимальная плотность скелета грунта по методу стандартного уплотнения, т/м³; ρ_B – плотность воды, т/м³ ($\rho_B=1,0$ т/м³); $V_{ВОЗД}$ – объём воздуха в грунте, доли единицы.

Порядок расчета.

$$W_{\text{ДА}\tilde{N} \times (3)} = \frac{(2,69 - 0,98 \cdot 1,70) \cdot 1,0}{0,98 \cdot 2,69 \cdot 1,70} - 0,02 = 0,208$$

Относительная величина влажности составляет: $\frac{W_{\text{РАСЧ}(3)}}{W_L} = \frac{0,208}{0,29} = 0,72$

2-й тип увлажнения рабочего слоя: $W_{\text{РАСЧ}(2)} = W_{\text{РАСЧ}(3)} = 0,208$

$$\frac{W_{\text{РАСЧ}(2)}}{W_L} = \frac{0,208}{0,29} = 0,72.$$

1-й тип увлажнения рабочего слоя.

Расчёт проводим по формуле: $W_{\text{ДА}\tilde{N} \times (1)} = \frac{0,16 + 0,21}{2} = 0,185$

Относительная величина влажности составляет: $\frac{W_{\text{ДА}\tilde{N} \times (1)}}{W_L} = \frac{0,185}{0,29} = 0,64$

2 Определение расчётной влажности грунта при промерзании земляного полотна под дорожной одеждой.

Исходные данные. Толщина слоя мерзлого грунта под дорожной одеждой составляет 0,2 м. Остальные исходные данные те же (см. выше).

Предварительно установим величину давления на грунт от веса дорожной одежды

$$P = (2400 \cdot 0,05 + 2300 \cdot 0,08 + 1800 \cdot 0,20 + 1950 \cdot 0,20) \cdot 0,0098 = 10,3 \text{ КПа.}$$

Затем вычисляют по формуле (4) количество незамерзшей воды

$$W_{\text{ИЗ}} = 0,40 \cdot 0,17 = 0,068.$$

Для 1-го типа увлажнения устанавливаем по формуле (2) величину расчётной влажности грунта в пределах зоны промерзания земляного полотна.

$$W_{\text{ДА}\tilde{N} \times (i)} = \frac{1,00}{1,09} \left\{ \frac{1 + 0,02 \left[1 - 0,5 l_g \left(1 + \frac{10,3}{9,8} \right) \right]}{0,98 \cdot 1,70} - \frac{1}{2,69} \right\} + 0,083 \cdot 0,068 = 0,224$$

В этом слое $\frac{W_{\text{ДА}\tilde{N} \times (i)}}{W_L} = \frac{0,224}{0,29} = 0,77.$

Ниже глубины промерзания влажность грунта равна величине 0,185 (см. выше). Тогда среднее по глубине значение расчётной влажности грунта рабочего слоя составит:

$$W_{\text{ДА}\tilde{N} \times (1)} = \frac{0,224 \cdot 0,2 + 0,185 \cdot (1,2 - 0,2)}{1,2} = 0,192.$$

По отношению к влажности на границе текучести расчётная влажность составляет:

$$\frac{0,192}{0,29} = 0,66$$

Для 2-го типа увлажнения устанавливаем по формуле (3) величину расчётной влажности грунта в пределах зоны промерзания земляного полотна

$$W_{\text{ДАН}(i)} = \frac{1,00}{1,09} \left\{ \frac{1 + 0,05 \left[1 - 0,5 \cdot l_g \left(1 + \frac{10,3}{9,8} \right) \right]}{0,8 \cdot 1,70} - \frac{1}{2,69} \right\} + 0,083 \cdot 0,068 = 0,236$$

В этом слое
$$\frac{W_{\text{РАСЧ}(M)}}{W_L} = \frac{0,236}{0,29} = 0,81.$$

Ниже глубины промерзания влажность грунта равна величине 0,208 (см. выше). Тогда среднее по глубине значение расчётной влажности грунта рабочего слоя составит:

$$W_{\text{РАСЧ}(2)} = \frac{0,236 \cdot 0,2 + 0,208 \cdot (1,2 - 0,2)}{1,2} = 0,213.$$

По отношению к влажности на границе текучести расчётная влажность составляет:

$$\frac{0,213}{0,29} = 0,73.$$

3-й тип увлажнения рабочего слоя.

Для 3-го типа увлажнения устанавливаем по формуле (3) величину расчётной влажности грунта в пределах зоны промерзания земляного полотна.

$$W_{\text{РАСЧ}(M)} = \frac{1,00}{1,09} \left\{ \frac{1 + 0,0 \left[1 - 0,5 \cdot l_g \left(1 + \frac{10,3}{9,8} \right) \right]}{0,98 \cdot 1,70} - \frac{1}{2,69} \right\} + 0,083 \cdot 0,068 = 0,257.$$

В этом слое
$$\frac{W_{\text{РАСЧ}(M)}}{W_L} = \frac{0,257}{0,29} = 0,89.$$

Ниже глубины промерзания влажность грунта равна величине 0,208 (см. выше).

Тогда среднее по глубине значение расчётной влажности грунта рабочего слоя составит:
$$W_{\text{РАСЧ}(3)} = \frac{0,257 \cdot 0,2 + 0,208 \cdot (1,2 - 0,2)}{1,2} = 0,216.$$

По отношению к влажности на границе текучести расчётная влажность составляет:

$$\frac{0,216}{0,29} = 0,75.$$

Пример 2. Определение возвышения поверхности покрытия над уровнем поверхностных и подземных вод. Например, дорога III технической категории проходит по орошаемой территории. Расчётный уровень подземных вод залегает от поверхности земли на глубине 0,3 м в летний период и на глубине 1,5 м в осенне-весенний период. В летний период имеет место длительное (более 30 дней) стояние поверхностных вод на полосе отвода, толщина слоя воды 0,05 м. Грунты под дорожной одеждой не промерзают. Остальные исходные данные те же, что в и примере 1.

Алгоритм расчета. Расчёт величины возвышения поверхности покрытия над уровнем грунтовых вод в летний период можно определить таким образом [3]:

$$W_{расч(1)} = W_{опт} + W_{расч(2,3)} / 2. \quad (7)$$

где $W_{расч(1)}$ – влажность грунта в расчётный период при 1-ом типе увлажнения рабочего слоя земляного полотна, доли единицы; $W_{опт}$ – оптимальная влажность грунта, доли единицы; $W_{расч(2,3)}$ – влажность грунта в расчётный период при 2-ом типе и 3-ем типе увлажнения рабочего слоя земляного полотна, доли единицы.

Модуль упругости асфальтобетона горячего плотного – 3200 МПа, толщина слоя 0,05 м. То же асфальтобетона пористого 2000 МПа, толщина слоя 0,08 м. То же щебня из гранита 400 МПа, толщина слоя 0,2 м. То же песка средней крупности 100 МПа, толщина слоя 0,2 м.

$$E_{д.о} = \frac{3200 \cdot 5 + 2000 \cdot 8 + 400 \cdot 20 + 100 \cdot 20}{53} = 792 \text{ МПа.}$$

Модуль упругости суглинка легкого пылеватого при относительной влажности 0,72 (см. выше) согласно [4] составляет $E_{ГР}=43$ МПа. По той же Инструкции среднее расчётное удельное давление колеса на покрытие $P=0,6$ МПа, а расчётный диаметр следа колеса движущегося автомобиля $D=0,37$ м. Подставляя эти величины в формуле (6) имеем:

$$\Delta H_{п.в} = \frac{37 \cdot \sqrt{\frac{0,6 - 0,012}{1,5 - 0,012}}}{1,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{792}{43}}} = 0,73 \text{ м.}$$

Принимая во внимание, что уровень подземных вод в летний период залегает на глубине 0,3 м от поверхности земли высота насыпи должна быть не менее $0,73 - 0,3 = 0,43$ м.

Принимая во внимание, что уровень подземных вод в осенне-весенний период залегает на глубине 1,5 м от поверхности земли высота насыпи должна быть не менее $1,6 - 1,5 = 0,1$ м.

Принимая во внимание, что в летний период имеет место длительное (более 30 дней) стояние поверхностных вод слоем 0,5 м высота насыпи должна быть не менее 0,95 м.

Приведенные требования о возвышении поверхности покрытия над уровнем поверхностных и подземных вод показывают, что высота насыпи должна быть не менее 0,95 м.

Выводы и рекомендации.

1. Для достижения требуемой плотности грунты необходимо уплотнять грунтового слоя при влажности не ниже 0,8 и не выше 1,2 от оптимальной при стандартном уплотнении. При влажности, превышающей верхний предел оптимальной влажности, грунт после разравнивания перед укаткой должен подвергаться воздушному подсушиванию. При близких грунтовых водах рекомендуется возводить земляное полотно в сезон наибольшего понижения их уровня, обычно во второй половине лета и осенью до начала дождей.

При недостатке влаги в грунте необходимо:

а) проводить земляные работы в зимне-весенний период, что особенно эффективно в районах, где выпадает мало осадков и промерзание незначительно;

б) при невозможности или нецелесообразности проведения в холодное время года всех земляных работ проводить в это время работы на водоразделах, где грунт наиболее быстро теряет влагу;

в) для сохранения влаги в грунте разрыхлить его в осенний период на полосах местности, отведенных для заложения резервов, на глубину 0,15-0,20 м, а весной по достижении влажностью значения 70-75 % от границы текучести проводить боронование и прокатку поверхности резервов легким катком;

г) уплотнять грунт немедленно после отсыпки, не растягивая фронта земляных работ и не допуская пересыхания отсыпанного грунта.

2. Во избежание возможного переувлажнения или пересыхания грунта, а вследствие этого и его частичного разуплотнения, в том числе от набухания, дорожную одежду на участках с повышенной плотностью рабочего слоя следует устраивать вслед за его возведением, не допуская длительных технологических перерывов.

3. При возведении земляного полотна на просадочных лессовых грунтах работы необходимо производить в такой последовательности:

а) разбивка земляного полотна согласно рис. 2б с подготовкой полосы (зоны) предварительного увлажнения в основаниях насыпи для осенне-весеннего накопления влаги;

б) снятие слоя грунта в основании насыпи и складирование его для накопления влаги в более глубоких слоях основания;

в) обратная укладка ранее вынутого грунта (весной после окончания дождей) и его уплотнение с захватом боковых берм;

г) доведение земляного полотна до проектных размеров;

д) тщательная планировка боковых берм и кювет резервов с обеспечением поперечных уклонов и продольного стока воды к водопропускным сооружениям.

4. Обсуждение

Полученные результаты показывают, что расчётная влажность рабочего слоя не является постоянной характеристикой грунта. Она определяется совокупностью климатических, гидрогеологических и конструктивных факторов [13,14].

При отсутствии промерзания грунта расчётная влажность изменяется от 0,185 при первом типе увлажнения до 0,208 при втором и третьем типах. При промерзании верхних 0,20 м рабочего слоя она увеличивается соответственно до 0,192, 0,213 и 0,216.

Особенно показательны результаты, выраженные относительно влажности на границе текучести. Для первого типа увлажнения этот показатель составляет 0,66, для второго — 0,73, а для третьего — 0,75. Следовательно, при неблагоприятном водно-тепловом режиме состояние грунта приближается к диапазону влажностей, при котором его деформационные свойства становятся менее благоприятными.

Расчёт также показывает влияние влажности на модуль упругости рабочего слоя. Для лёгкого пылеватого суглинка при относительной влажности 0,72 модуль упругости составляет 43 МПа, тогда как эквивалентный показатель слоёв дорожной одежды существенно выше. Это подчёркивает роль земляного полотна как потенциально наиболее чувствительного к изменению влажности элемента дорожной конструкции.

С практической точки зрения важным результатом является установление определяющего гидрологического условия. Несмотря на то что близкое залегание грунтовых вод требует повышения насыпи, наиболее жёсткое ограничение в рассмотренном случае связано с длительным стоянием поверхностных вод. Именно это условие определяет минимальную высоту насыпи 0,95 м.

Полученные результаты согласуются с технологической необходимостью регулирования влажности грунта на этапе строительства. Рекомендуется выполнять уплотнение при влажности не ниже 0,8 и не выше 1,2 от оптимальной. При превышении верхней границы грунт необходимо подвергать воздушному подсушиванию, а при недостатке влаги — принимать организационно-технологические меры по её сохранению [15,16].

В условиях засушливого климата особое значение имеет минимизация времени между отсыпкой и уплотнением грунта. При длительном нахождении отсыпанного слоя на открытом воздухе возможно быстрое испарение влаги, что ухудшает условия его уплотнения. Поэтому грунт рекомендуется уплотнять непосредственно после отсыпки, не допуская чрезмерного увеличения фронта земляных работ.

Одновременно при повышенной плотности рабочего слоя нецелесообразны длительные технологические перерывы между устройством земляного полотна и дорожной одежды, поскольку повторное переувлажнение либо пересыхание может привести к частичному разуплотнению грунта.

Таким образом, расчётная влажность должна рассматриваться не изолированно, а в системе «климатические условия — водный режим — состояние грунта — технология строительства — конструкция дорожной одежды».

5. Заключение

1. Влажностный режим является одним из определяющих факторов устойчивости рабочего слоя земляного полотна в засушливых регионах Казахстана. Для таких территорий характерно сочетание дефицита влаги в период производства работ и возможного сезонного переувлажнения в процессе эксплуатации.
2. При отсутствии промерзания расчётная влажность лёгкого пылеватого суглинка составила 0,185 для первого типа увлажнения и 0,208 для второго и третьего типов, что соответствует 0,64 и 0,72 влажности на границе текучести.
3. Промерзание верхнего слоя толщиной 0,20 м приводит к увеличению средней расчётной влажности рабочего слоя до 0,192; 0,213 и 0,216 соответственно для первого, второго и третьего типов увлажнения.
4. Наиболее неблагоприятное состояние установлено для третьего типа увлажнения, при котором расчётная влажность промёрзшего слоя достигает 0,257, а средняя влажность рабочего слоя — 0,216, или 0,75 от влажности на границе текучести.
5. Для рассмотренных гидрогеологических условий минимальная высота насыпи по летнему уровню грунтовых вод составляет 0,43 м, по осенне-весеннему уровню — 0,10 м. Однако с учётом длительного стояния поверхностных вод определяющим является требование не менее 0,95 м.
6. Для достижения требуемой плотности грунта его рекомендуется уплотнять при влажности 0,8–1,2 от оптимальной. При избыточной влажности необходимо предусматривать воздушное подсушивание, а при её недостатке — организационные мероприятия, направленные на сохранение естественной влаги грунта.
7. При близком залегании грунтовых вод строительство земляного полотна целесообразно выполнять в период их максимального сезонного понижения. На просадочных лёссовых грунтах технология должна дополнительно предусматривать регулирование влажности основания, последовательное уплотнение и обеспечение организованного отвода поверхностных вод.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании и строительстве земляного полотна автомобильных дорог в засушливых и орошаемых районах Казахстана для выбора расчётных характеристик грунта, назначения высоты насыпи и обоснования технологии производства земляных работ.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Еспаева Г.А., Турсумбекова Х.С. Определение расчётной влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог в засушливых регионах Казахстана // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2026; 3(15): 68-82. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-06>

Cite this article as: Yesspayeva G., Tursumbekova K. Opredelenie raschetnoy vlazhnosti gruntov zemlyanogo polotna avtomobilnykh dorog v zasushlivykh regionakh Kazakhstana [Determination of the design moisture content of road subgrade soils in arid regions of Kazakhstan]. Vestnik Kazakhskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2026; 3(15): 68-82. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-06>

Литература

1. Petrovych, V., & Kasai, K. (2024). Study of precipitation characteristics for calculations of surface water drainage and moisture infiltration into the soil of road subgrade. *Automobile Roads and Road Construction*. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-137-146>

2. Guo, F., & Gu, W. (2025). Study on dynamic resilient modulus prediction model of subgrade fine-grained soil based on physical property parameters. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02070-3>
3. Yuan, K.-Z., Ni, W.-K., Della Vecchia, G., Lu, X.-F., Wang, H.-M., & Nie, Y. (2024). Influence of dry density and wetting–drying cycles on the soil–water retention curve of compacted loess: experimental data and modeling. *Acta Geotechnica*, 19, 8111 – 8128. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02354-4>
4. Teltayev, B., Massanov, A. V., Aitbayev, Y., & Zhaisanbayev, A. (2024). Performance of a Semi-Rigid Pavement: A North Kazakhstan Case Study. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es1089>
5. Sarsembayeva, A., & Collins, P. (2026). Thermal regime of highway subgrades in seasonal freezing conditions of northern Kazakhstan. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*. <https://doi.org/10.51488/1680-080x/2026.1-19>
6. Tan, Y., Dai, F.-C., Zhao, Z.-Q., Zhou, J., & Cheng, W. (2024). Analysis of Soil–Water Characteristic Curve and Microstructure of Undisturbed Loess. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app14083329>
7. Rahman, M. M., Gassman, S., & Islam, K. M. (2023). Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
8. Liu, W., Huang, X., Feng, X., & Xie, Z. (2023). Compaction and bearing characteristics of untreated and treated lateritic soils with varying moisture content. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131893>
9. JSC “NC “QazAvtoJol”. (n.d.). *Maps*. <https://ru.qaj.kz/maps/>
10. Committee for Construction, Housing and Utilities, and Land Management of the Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan. (2014). *SN RK 3.03-04-2014: Design of flexible-type road pavements* (Order No. 156-NQ, December 29, 2014) [in Russian]. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/W14156072AD>
11. Yesbolat, A., Kiyalbayev, A., & Yessentay, D. (2025). Examples of calculations for determining the design moisture content of earthwork soil in arid climate conditions. *BULLETIN of D. Serikbayev EKTU*. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_3_303
12. Rasoulpour, M., & Kouhikamali, R. (2026). Numerical Simulation and Parametric Study of Effective Parameters in a Thermoelectric Dehumidifier with Cooled Plate Using the Peltier Effect. *International Journal of Thermofluids*. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2026.101589>
13. Xiao, K., Bai, W., & Wang, S. (2021). Multifactor Analysis of Calibration and Service Quality of the Soil Moisture Sensor Applied in Subgrade Engineering. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/7548996>
14. Chen, L.-L., Wang, C., Dai, Y.-H., Guo, R., & Huang, Q. (2021). Modeling of Moisture Content of Subgrade Materials in High-Speed Railway Using a Deep Learning Method. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/6166489>
15. Tophel, A., Nguyen, T. M., Walker, J. P., & Kodikara, J. (2025). Soil Moisture Prediction in Pavement Layers Using LSTM Neural Networks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03293-x>
16. Hassan, A. (2021). Evaluation of Soil Compaction Characteristics at a Construction Site in Al-Khalis City, Northeast of Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*, 2049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2049/1/012005>

References

1. Petrovych, V., & Kasai, K. (2024). Study of precipitation characteristics for calculations of surface water drainage and moisture infiltration into the soil of road subgrade. *Automobile Roads and Road Construction*. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-137-146>

2. Guo, F., & Gu, W. (2025). Study on dynamic resilient modulus prediction model of subgrade fine-grained soil based on physical property parameters. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02070-3>
3. Yuan, K.-Z., Ni, W.-K., Della Vecchia, G., Lu, X.-F., Wang, H.-M., & Nie, Y. (2024). Influence of dry density and wetting–drying cycles on the soil–water retention curve of compacted loess: experimental data and modeling. *Acta Geotechnica*, 19, 8111 – 8128. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02354-4>
4. Teltayev, B., Massanov, A. V., Aitbayev, Y., & Zhaisanbayev, A. (2024). Performance of a Semi-Rigid Pavement: A North Kazakhstan Case Study. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es1089>
5. Sarsembayeva, A., & Collins, P. (2026). Thermal regime of highway subgrades in seasonal freezing conditions of northern Kazakhstan. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*. <https://doi.org/10.51488/1680-080x/2026.1-19>
6. Tan, Y., Dai, F.-C., Zhao, Z.-Q., Zhou, J., & Cheng, W. (2024). Analysis of Soil–Water Characteristic Curve and Microstructure of Undisturbed Loess. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app14083329>
7. Rahman, M. M., Gassman, S., & Islam, K. M. (2023). Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
8. Liu, W., Huang, X., Feng, X., & Xie, Z. (2023). Compaction and bearing characteristics of untreated and treated lateritic soils with varying moisture content. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131893>
9. JSC “NC “QazAvtoJol”. (n.d.). *Maps*. <https://ru.qaj.kz/maps/>
10. Committee for Construction, Housing and Utilities, and Land Management of the Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan. (2014). *SN RK 3.03-04-2014: Design of flexible-type road pavements* (Order No. 156-NQ, December 29, 2014) [in Russian]. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/W14156072AD>
11. Yesbolat, A., Kiyalbayev, A., & Yessentay, D. (2025). Examples of calculations for determining the design moisture content of earthwork soil in arid climate conditions. *BULLETIN of D. Serikbayev EKTU*. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_3_303
12. Rasoulpour, M., & Kouhikamali, R. (2026). Numerical Simulation and Parametric Study of Effective Parameters in a Thermoelectric Dehumidifier with Cooled Plate Using the Peltier Effect. *International Journal of Thermofluids*. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2026.101589>
13. Xiao, K., Bai, W., & Wang, S. (2021). Multifactor Analysis of Calibration and Service Quality of the Soil Moisture Sensor Applied in Subgrade Engineering. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/7548996>
14. Chen, L.-L., Wang, C., Dai, Y.-H., Guo, R., & Huang, Q. (2021). Modeling of Moisture Content of Subgrade Materials in High-Speed Railway Using a Deep Learning Method. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/6166489>
15. Tophel, A., Nguyen, T. M., Walker, J. P., & Kodikara, J. (2025). Soil Moisture Prediction in Pavement Layers Using LSTM Neural Networks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03293-x>
16. Hassan, A. (2021). Evaluation of Soil Compaction Characteristics at a Construction Site in Al-Khalis City, Northeast of Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*, 2049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2049/1/012005>