

Б.С. Юшков, А.М. Бургонутдинов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

МОРОЗОБОЙНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ В НУЛЕВЫХ ТОЧКАХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Дана общая характеристика причин образования морозобойного растрескивания асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог. Получены дифференциальные уравнения, позволяющие математически объяснить причину образования морозобойной трещины в нулевых отметках автомобильной дороги.

Ключевые слова: морозобойное растрескивание, криопрцессы, корпускулярное излучение, радиационно-тепловой баланс, насыпь, выемка.

Имеющиеся данные об исследованиях влияния природных факторов показывают, что в России с её суровыми климатическими условиями трещины в асфальтобетонных покрытиях являются основным из наиболее значимых факторов, вызывающих преждевременное разрушение дорожных конструкций. В зависимости от дорожно-климатической зоны расположения автомобильной дороги доля этого дефекта колеблется от 40 до 80 % от общего количества деформаций покрытия. Благодаря своему граничному положению между атмосферой и нижележащими слоями сезонного промерзания и оттаивания грунтов земляного полотна верхний слой покрытия из асфальтобетона являются наиболее термодинамически активным слоем. В нём происходят интенсивные процессы тепломассообмена, вызванные резкими изменениями температур в переходный период и солнечным зимним днём, фазовыми превращениями воды, существенными изменениями влажности в теле дорожной конструкции в годовом цикле и при многолетней эксплуатации автомобильной дороги.

Сезонное промерзание и оттаивание дорожной конструкции автомобильных дорог являются основными криопрцессами и связаны с превращениями энергии и вещества в объёме породы. В настоящее время рассмотрение этих превращений проводится на базе основных положений термодинамики и теплофизики, исследуются параметры внутреннего и внешнего энергообмена (теплообмена) в промерзающих и оттаивающих

системах. При этом известно, что основными источниками внешнего энергетического воздействия на земную поверхность являются: лучистая энергия Солнца и звёзд; корпускулярное излучение горячих космических тел; гравитационные воздействия космических тел, сезонные и суточные колебания температуры, атмосферные осадки и др.

Энергия, приобретаемая поверхностью Земли за счет внешних источников, может быть рассчитана по разности между коротковолновой радиацией, поглощаемой поверхностью, и длинноволновым эффективным излучением земной поверхности, именуемой радиационным балансом подстилающей поверхности (R).

Приобретаемая подстилающей поверхностью Земли энергия трансформируется в тепловую и расходуется на турбулентный теплообмен с атмосферой (P), на испарение влаги с подстилающей поверхности в атмосферу, производство скрытой теплоты испарения (L) на количество испарившейся влаги (E) и на теплообмен с подстилающими породами (B). За определенный промежуток времени (например, за полугодие) уравнение теплового или, точнее, радиационно-теплового баланса подстилающей поверхности может быть представлено в виде

$$R = P + LE + B. \quad (1)$$

Процесс передачи тепла (B) от подстилающей поверхности в нижележащие грунты и наоборот осуществляется главным образом с помощью кондуктивного (молекулярный перенос тепла в однородных сплошных средах, реализующийся за счет теплопроводности грунтов) и конвективного механизмов (передача тепла осуществляется веществом, перемещающимся по порам, пустотам, трещинам путем конвекции воды, газов, водяного пара и др.). Теплоперенос за счет конвекции в естественных условиях оказывается весьма ощутимым при фильтрации свободной воды по порам и трещинам.

Основным законом, описывающим кондуктивный перенос тепла в скальных и дисперсных породах, служит закон Фурье, который для установившегося теплового потока Q записывается в виде

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad}(t), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\lambda = a \cdot C_{\text{уд}} \cdot \gamma_{\text{ск}}$; a – коэффициент температуропроводности; $C_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкости; $\gamma_{\text{ск}}$ – плотность скелета грунта.

В сезоннопромерзающих грунтах делового слоя дорожной конструкции при переходе из талого состояния в мёрзлое коэффициент температуропроводности материала каждого слоя существенно возрастает, поскольку

$$\lambda_{\text{льда}} \approx 4,0\lambda_{\text{воды}}. \quad (3)$$

Теплопроводность же грунта земляного полотна при переходе ее из талого состояния в мерзлое, наоборот, уменьшается, поскольку

$$C_{\text{уд(льда)}} = 0,5C_{\text{уд(воды)}}. \quad (4)$$

При отсутствии внутренних источников тепла в однородной системе одномерное температурное поле по глубине x и во времени τ описывается уравнением теплопроводности (уравнение Фурье):

$$\partial t(x, \tau) / \partial \tau = \alpha \cdot \partial^2 t / \partial x^2. \quad (5)$$

В случае промерзания и оттаивания материала слоев дорожной конструкции (грунта), когда в нем возникают внутренние источники тепла, уравнение теплопроводности существенно усложняется.

При замерзании воды в грунтах не только резко скачкообразно изменяются свойства самих грунтов, но и увеличивается объём мёрзлого грунта, причем, как правило, неравномерно.

Из результатов экспериментальных исследований следует, что рост трещин и разуплотнение сезоннопромерзающего грунта имеют место большей частью при его переходе в твердомерзлое состояние, при этом замерзший деловой слой грунта земляного полотна способен работать как плита, распределяя давления на некоторую площадь. Полученные данные свидетельствуют о том, что деформации разуплотнения делового слоя дорожной конструкции начинают развиваться при формировании в толще грунта земляного полотна трещин преимущественно наклонной и горизонтальной ориентациями.

В связи с тем что автомобильные дороги проложены по пересечённой местности, т.е. имеются выемки с грунтом, находящими в естественном состоянии и насыпи с грунтом нарушенной структуры. Участок автомобильной дороги, проходящий через выемку, в период таяния снега заполняется талыми и дождевыми водами и под воздействием солнечной радиации и положительной температуры только на поверхности асфальтобетонного покрытия изменяет водно-тепловой баланс в теле всей дорожной конструкции. В результате этого снабжается влагой глинистый

грунт, находящийся в естественном состоянии, что обеспечивает интенсивное его промерзание в течение переходного периода (зима – весна, осень – зима) и оттаивание-промерзание в течении суток в весенний период (днём – оттаивание, ночью – промерзание). Глубина сезонного промерзания грунта выемки значительно превышает глубину промерзания грунта с нарушенной структурой, которая используется в насыпи дорожной конструкции и составляет около 20 см. Чем неоднороднее уплотнен грунт насыпи и чем выше их влажность, тем больше разница в глубинах промерзания по сравнению с грунтом выемки.

В результате лабораторных опытов было установлено, что температура начала замерзания грунта насыпи составляет $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в выемке – $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что в дальнейшем подтвердилось при полевых исследованиях. Поэтому многократно повторяющийся процесс сезонного промерзания и оттаивания дорожной конструкции в местах сопряжения насыпи с выемкой приводит к неравномерной усадке данных участков и появлению поперечных трещин с различным шагом.

При одинаковой влажности и плотности грунта насыпи и выемки коэффициент теплопроводности для грунта выемки в 1,5 раза выше, чем грунта насыпи. Этим объясняется существенное различие в термическом режиме связных природных и с нарушенной структурой грунтов при равной плотности. Грунт насыпи интенсивнее нагревается весной и летом и быстрее охлаждается осенью и зимой, следовательно, наличие или отсутствие жёстких структурных связей между частицами глинистого грунта существенно сказывается на коэффициентах переноса тепла. В данном случае передача тепла в грунте выемки осуществляется от частицы к частице через жесткие связи, а в насыпи – через плёнки связной воды, обволакивающие глинистые частицы. Но теплопроводность материала скелета выше теплопроводности воды, и поэтому коэффициенты температуропроводности и теплопроводности для природного грунта выемки всегда выше, чем грунта насыпи с нарушенной структурой, равной плотности. Таким образом, на участках сопряжения грунта земляного полотна с нарушенной структурой и грунта, находящего в естественном состоянии, распространение тепла и влаги в природном грунте происходит быстрее, чем в грунте с нарушенной структурой. Причём в глинистых грунтах скорость распространения потенциалов тепла выше скорости распространения потенциалов влаги. Следовательно, в грунтах с нарушенной структурой относительная скорость распространения влаги по отношению к скорости распространения тепла выше, чем в природном грунте.

Регулярные наблюдения за изменением температурного режима на опытном участке автомобильной дороги в течение двух полных лет позволили определить, что глубина промерзания грунта выемки больше, чем грунта с нарушенной структурой насыпи. Глубины промерзания указанных грунтов приведены в таблице.

Глубина промерзания грунта делового слоя дорожной конструкции на участке сопряжения насыпи с выемкой

Элемент дороги	2010 г.				2011 г.			
	$W_{\text{грунта}}, \%$	W/W_L	$T_{\text{замер}}, ^\circ\text{C}$	$H_{\text{промерз}}, \text{М}$	$W_{\text{грунта}}, \%$	W/W_L	$T_{\text{замер}}, ^\circ\text{C}$	$H_{\text{промерз}}, \text{М}$
Насыпь	27,6	0,63	-0,26	1,63	31,2	0,70	-0,17	1,56
Выемка	26,5	0,60	-0,35	1,80	23,9	0,57	-0,46	1,80

В первый зимний период (2010 г.) разница в глубине промерзания грунта выемки и насыпи составляет 17 см, а во второй зимний сезон (2011 г.) разница уже составила 24 см. Полученные результаты подтверждают, что в массиве делового слоя дорожной конструкции происходит круглогодичная и непрерывная теплопередача между частицами глинистого грунта. Оценивая роль влажности и плотности грунта насыпи на глубину сезонного промерзания, следует отметить, что общее повышение влажности промерзающего глинистого грунта уменьшает глубину сезонного промерзания за счёт скрытой теплоты льдообразования.

Как было доказано советским учёным В.И. Фёдоровым, коэффициент теплопроводности грунта увеличивается по мере роста плотности и влажности последнего. Однако при влажности грунта нарушенной структуры, равной 33 %, его коэффициент температуропроводности остается ниже, чем у природного грунта, имеющему влажность 28 %. Коэффициент влагопроводности у природного грунта всегда в 1,22 раза выше, чем у грунта с нарушенной структурой.

Появление морозобойных трещин на поверхности автомобильной дороги с асфальтобетонным покрытием представляет собой сложный термодинамический процесс, протекающий в неоднородной капиллярно-пористой среде. Задача о протекании этого процесса является одной из наиболее сложных задач математической физики. Основной трудностью решения указанной задачи является необходимость учета изменения агрегатного состояния и теплофизических характеристик среды, в результате чего задача становится нелинейной. Кроме того, при промерзании и оттаивании одновременно с изменением температурного поля имеет место массоперенос, вызванный перемещением влаги.

Наличие возможностей промерзания грунтов в основании дорожной конструкции вызывает недопустимые осадки при оттаивании, пучение, образование наледей, морозобойное растрескивание и криогенный напор. Эти процессы могут быть следствием гидроизолирующего действия замерзшего грунта, приводящего к переувлажнению грунтов сезоннооттаивающего слоя, и формируемой талой зоны в местах сопряжения насыпи с выемкой.

Согласно проведённым экспериментальным исследованиям на границе соприкосновения природного грунта и грунта с нарушенной структурой существует скачок влажности глинистого грунта. Для случая связанного переноса влаги в местах сопряжения насыпи с выемкой на основании уравнения Лапласа (6) получим систему двух дифференциальных уравнений – для грунта выемки (ненарушенная структура) и грунта насыпи с нарушенной структурой, уплотнённого до коэффициента уплотнения:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = k \nabla^2 \theta + k \frac{\delta}{c_m} \nabla^2 t. \quad (6)$$

Для грунта выемки выражение будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta(x, z, \tau)}{\partial \tau} = k \left(\frac{\partial^2 \theta(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + \\ + k \frac{\delta}{c_m} \left(\frac{\partial^2 t(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, z, \tau)}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Для уплотнённого грунта насыпи

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta'(x, z, \tau)}{\partial \tau} = k' \left(\frac{\partial^2 \theta'(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta'(x, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + \\ + k' \frac{\delta'}{c'_m} \left(\frac{\partial^2 t'(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t'(x, z, \tau)}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Начальные условия:

$$\left. \begin{aligned} \theta(x, z, 0) = \varphi_1(x, z) \\ t(x, z, 0) = \varphi_1(x, z) = \text{const} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{при } \dots x \geq 0; z \geq 0;$$

$$\left. \begin{aligned} \theta'(x, z, 0) = \varphi_2(x, z) \\ t'(x, z, 0) = \varphi_2(x, z) = \text{const} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{при } \dots x \leq 0; z \geq 0.$$

Граничные условия:

$\theta(+0, z, \tau) = \theta'(-0, z, \tau)$ – равенство потенциалов переноса влаги поверхности соприкосновения грунта выемки с грунтом насыпи.

$t(+0, z, \tau) = t'(-0, z, \tau)$ – равенство температур грунта выемки и насыпи по поверхности соприкосновения.

Условия стационарного испарения влаги с поверхности выемки и насыпи:

$$k \cdot c_m \cdot \rho_d \left(\frac{\partial \theta(x, o, \tau)}{\partial z} + \delta \frac{\partial t(x, o, \tau)}{\partial z} \right) + \alpha (\theta_c - \theta'(x, o, \tau)) = 0;$$
$$k' \cdot c_m' \cdot \rho_d' \left(\frac{\partial \theta'(x, o, \tau)}{\partial z} + \delta' \frac{\partial t'(x, o, \tau)}{\partial z} \right) + \alpha' (\theta_c - \theta'(x, o, \tau)) = 0.$$

Условие стационарного влагообмена на границе сопряжения выемки с насыпью:

$$k \cdot c_m \cdot \rho_d \left(\frac{\partial \theta(o, z, \tau)}{\partial x} \right) = k' \cdot c_m' \cdot \rho_d' \left(\frac{\partial \theta'(o, z, \tau)}{\partial x} \right).$$

Полученные дифференциальные уравнения позволяют математически объяснить причину образования морозобойных трещин на асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог и дают возможность проанализировать процессы влагонакопления, выяснить взаимную связь между процессами и определить мероприятия по ликвидации причины образования морозобойной трещины в нулевых отметках автомобильных дорог.

Таким образом, в отношении тепловых свойств глинистого грунта делового слоя следует рассматривать выемку и насыпь как два различных физических тела, существенно отличающихся друг от друга по своим свойствам. Поэтому для улучшения прочностных характеристик грунта делового слоя необходимы проектные решения, которые бы учитывали явление образования морозобойных трещин на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог.

Список литературы

1. Воронкевич С.Д., Ларионова Н.А. Физико-химические процессы техногенной эволюции грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 2000.

2. Федоров В.И. Процессы влагонакопления и морозоопасность грунтов в строительстве. – Владивосток: Изд-во ДальНИИС, 1992.

3. Криогенные процессы в основании дорог / А.М. Бургонутдинов [и др.] // Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного, трубопроводного транспорта в Уральском регионе: материалы междунар. науч.-техн. конф.; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2005. – С. 16–21.

4. Бургонутдинов А.М. Исследование механизма пучинообразования на автомобильных дорогах // Состояние и перспективы транспорта, обеспечение безопасности дорожного движения: материалы междунар. науч.-техн. конф. к 30-летию автодорожного факультета ПГТУ: в 2 т. Т. 2. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 24–31.

5. Бургонутдинов А.М. Морозобойные трещины на автомобильных дорогах / Инновации в транспортной политике. Безопасность движения. Охрана окружающей среды: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 65-летию Победы советского народа в Великой отечественной войне, 28–29 октября: в 3 т. – Т. 3. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 41–47.

Получено 15.09.2011