

ЛЬДООБРАЗОВАНИЕ В СТРУКТУРЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА И КРИТЕРИИ ЕГО ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

ICE FORMATION IN ASPHALT CONCRETE STRUCTURE AND CRITERIA OF ITS DEPENDENCE ON COOLING TEMPERATURE

Е. П. Ходан,
старший преподаватель
кафедры «Строительство
и эксплуатация дорог»
Белорусского национального
технического университета,
г. Минск, Беларусь

Д. Г. Игошкин,
заместитель начальника
управления республиканского
дочернего унитарного
предприятия «Белорусский
дорожный научно-
исследовательский институт
«БелдорНИИ»»,
г. Минск, Беларусь

С. Е. Кравченко,
кандидат технических
наук, декан факультета
транспортных коммуникаций
Белорусского национального
технического университета,
г. Минск, Беларусь

В статье рассмотрен механизм льдообразования, реализуемый через проявление трех зон фазовых превращений воды в порах материалов: зоны переохлаждения воды, зоны интенсивного льдообразования, зоны стабилизации прироста льдистости. Приведены результаты анализа исследований, проведенных в области льдообразования в капиллярно-пористых телах, и результаты по определению характера льдообразования в структуре асфальтобетона в зависимости от температуры его охлаждения по различным критериям.

Проведены исследования по определению температуры льдообразования на поверхности асфальтобетона с получением зависимости скорости прохождения ультразвука через образец от различных температур его охлаждения с помощью прибора «Тестер ультразвуковой УК1401М». Графические зависимости «температура – скорость ультразвука» подтверждают различие скоростей прохождения ультразвука при образовании льда в порах асфальтобетона, насыщенного водой, и асфальтобетона, насыщенного соляным раствором.

Также были проведены исследования по определению льдообразования в структуре асфальтобетона в зависимости от температуры его охлаждения на двух образцах одного состава с учетом их фактической плотности и остаточной пористости. В качестве критерия указанного процесса была взята виброскорость, определяемая с помощью портативного виброанализатора «Вибран-3», который позволял производить запись и анализ колебательных процессов различных объектов, поиск дефектов структуры изделий. методом сопоставления реакций на ударное воздействие с эталонным спектром.

Ключевые слова: льдообразование, скорость прохождения ультразвука, ультразвуковой тестер, виброскорость, виброанализатор «Вибран-3», морозостойкость асфальтобетона, замораживание, оттаивание, температура охлаждения, противогололедные материалы.

The article deals with the ice formation mechanism implemented through the development of three zones of phase transformation of water in pores of materials: water supercooling zone, intensive ice formation zone and iciness growth stabilisation zone. The results of analysis are given for the researches carried out in the field of ice formation in the asphalt concrete structure as a function of its cooling temperature, in terms of various criteria.

The researches out for determination of ice formation temperature on asphalt concrete surface including the construction of a function describing the speed of ultrasound passing were carried through the specimen at various cooling temperatures; the device, «UK1401M Ultrasound Tester», was used for this purpose. The «temperature vs. ultrasound speeds» diagrams confirm the difference between speeds of ultrasound passage during the ice formation in pores of water-saturated asphalt concrete and brine-saturated asphalt concrete.

Also, the researches were carried out in order to determine ice formation in the asphalt concrete that depends on a function of its cooling temperature for two specimens with the same composition but with their effective density and residual porosity taken into consideration. As a criterion for this process, the vibration velocity measured by the «Vibran-3» portable vibration analyser was used, that made it possible to record and analyse the oscillatory processes for various objects and to search for defects in the structure of products by comparison of the impact responses versus the reference spectrum.

Keywords: ice formation, ultrasound passage speed, ultrasound tester, vibration velocity, «Vibran-3» vibration analyser, asphalt concrete frost resistance, freezing, thawing, cooling temperature, deicing agents.

ВВЕДЕНИЕ

Циклическое воздействие транспортных нагрузок в сочетании с воздействием знакопеременных температур и изменяющейся влажностью способствует появлению таких видов деформаций на поверхности асфальтобетонного покрытия как шелушение, выкрашивание, выбоины, трещины, которые существенно снижают срок службы покрытия. Причиной образования указанных дефектов могут быть различные факторы, в том числе и недостаточная морозостойкость асфальтобетона, на что неоднократно указывали многие исследователи. Среди работ, наиболее близко связанных с морозостойкостью асфальтобетона, следует отметить исследования Д. И. Гегелии, В. А. Головки, А. С. Баранковского, В. А. Зыкова, Н. С. Ковалева и других. Все без исключения авторы указывают на значительное изменение структуры и свойств асфальтобетона при воздействии на него циклическо-

го замораживания-оттаивания, сопровождающегося льдообразованием.

Важнейшим свойством асфальтобетона, определяющим долговечность этого материала, является устойчивость его структуры в условиях изменяющегося влажностного и температурного режима. Подобно большинству других пористых строительных материалов, асфальтобетон разрушается главным образом при длительном или периодическом увлажнении, а также в результате попеременного замораживания и оттаивания. Помимо разрушающего действия воды при ее замерзании в порах, адсорбционные слои воды, понижая поверхностную энергию, облегчают образование новых поверхностей в асфальтобетоне при его деформировании. Расклинивающее действие водных пленок, разъединяющих минеральные зерна и отслаивающих битумные слои, усиливает разрушающий эффект.

МЕХАНИЗМ ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ

Многочисленные исследования, проведенные в области льдообразования в капиллярно-пористых телах, указывают на то, что существует три зоны фазовых превращений воды в порах таких материалов:

- зона переохлаждения воды;
- зона интенсивного льдообразования;
- зона стабилизации прироста льдистости.

Анализ результатов теоретических исследований позволил для проведения испытаний асфальтобетона на морозостойкость температуру замораживания принять равной минус 20 °С. При такой температуре количество воды, перешедшей в лед в порах асфальтобетона, стабилизируется.

Среди причин, вызывающих разрушение строительных материалов, можно выделить:

- кристаллизационное давление льда;
- гидравлическое давление воды, отжимаемой из зоны промерзания при полном отсутствии заземленного воздуха;
- осмотическое давление;
- различие в коэффициентах линейного температурного расширения льда и материала;
- увеличение объема воды при переходе в лед.

На морозостойкость влияет комплекс климатических факторов:

- в одних случаях асфальтобетон, однажды подвергшийся морозному воздействию, в таком состоянии находится весь зимний период. В этом случае играет роль время нахождения асфальтобетона в замороженном состоянии;
- в другом случае асфальтобетон подвергается многократному замораживанию и оттаиванию, где значительную роль играет перепад температуры в области ее повышения и понижения.

Надо отметить, что в обоих случаях первоочередную роль играет структурное состояние асфальтобетона, которое может изменяться в зависимости от времени действия влажностного и температурного режима.

При длительном увлажнении вода проникает в поры асфальтобетона, частично насыщает битум, проникает через дефектные места битумных слоев к поверхности минеральных зерен. При этом замкнутые воздушные поры можно рассматривать как аккумулялирующие емкости, в которые отжимается избыточный объем воды. Все эти процессы способствуют отслаиванию битумных пленок, особенно при недостаточной адгезии их к поверхности минеральных частиц, и в итоге ведут к ослаблению структурных связей в асфальтобетоне, что облегчает его разрушение (рис. 1).



Рисунок 1 – Типичное изображение наполнителя, битума и воздушных пустот в асфальтобетонной смеси под микроскопом

Замерзшая вода, увеличиваясь в объеме до 9 %, вызывает большие напряжения в стенках пор, что значительно ускоряет процесс разрушения асфальтобетона.

Исследованиями установлены следующие интервалы значений параметров покрытия и приземного слоя воздуха, при которых происходит льдообразование:

- температура воздуха от 1 °С до минус 5 °С;
- относительная влажность воздуха от 86 % до 98 %;
- дефицит точки росы от 0 °С до минус 7 °С;
- разность температур воздуха на поверхности покрытия от 2 °С до 4 °С;
- разность температур поверхности покрытия и точки росы от 0 °С до минус 2 °С.

При условиях, характеризуемых значениями одного или нескольких из названных параметров, не входящих в указанные интервалы, как правило, льдообразования на покрытии не происходит.

Наиболее предрасположен к образованию дефектов на покрытии поверхностный слой асфальтобетона. Помимо факторов, указанных выше, он подвержен воздействию противогололедных материалов, которые оказывают воздействие как на механизм льдообразования, так и на характер структурных изменений поверхностного слоя асфальтобетона.

Долгое время считалось, что противогололедные реагенты не оказывают какого-либо заметного воздействия на структуру и свойства органических вяжущих материалов и асфальтобетонов.

Однако наблюдения за состоянием асфальтобетонных покрытий свидетельствуют, что при интенсивной обработке противогололедными материалами срок эксплуатации асфальтобетонных покрытий, как правило, сокращается.

На долговечность асфальтобетона в агрессивной среде большое влияние оказывает химическая стойкость битума, его адгезионные свойства и количество в асфальтобетонной смеси, химико-минералогический состав, структура и текстура минеральных компонентов.

Установлено, что под воздействием солевых растворов групповой химический состав битумов изменяется в сторону увеличения асфальтенов, что в результате приводит к существенному изменению температуры размягчения и температуры хрупкости вяжущего. При этом наблюдается ухудшение эластических и адгезионных свойств битумов.

Исследования И. А. Рыбьева [1] показали, что при длительном взаимодействии битумных материалов с водной средой наблюдается диффузия воды сквозь битумную пленку, ее аккумуляция в порах минеральных частиц и на границе раздела фаз. Этот процесс сопровождается выносом продуктов водной среды растворения, постепенным разрушением структуры и изменением (как правило, ухудшением) свойств битумо-минерального материала. Под влиянием водной среды ускоряется процесс старения битумов, изменяется групповой химический состав и свойства, повышается подвижность материалов, что является отражением процесса разрушения их структуры. Процесс разрушения происходит тем интенсивнее, чем интенсивнее диффузия. Процесс диффузии особенно усиливается с увеличением концентрации водорастворимых веществ, причем диффундирующая вода способна вымывать их из битума, придавая ему при низких температурах кавернозную структуру.

Проведенные ранее исследования подтверждают влияние растворов противогололедных реагентов на адгезионные свойства вяжущего, которые проявляются через активные полярные группы асфальтеновых комплексов в составе битумов, претерпевающих структурные изменения в процессе воздействия агрессивной среды. Изменение воздействия растворов противогололедных реагентов на адгезионные свойства вяжущего можно оценивать по методу кипячения [2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были проведены исследования по определению температуры льдообразования на поверхности асфальтобетона с получением зависимости скорости прохождения ультразвука через образец от различных температур его охлаждения. Как известно из справочных источников скорость ультразвука в воде составляет 1500–1600 м/с, тогда как во льду – порядка 4000–4500 м/с. Таким образом, можно предположить, что различие скоростей прохождения ультразвука при образовании льда в порах асфальтобетона, насыщенного водой, и асфальтобетона, насыщенного соляным раствором, отразится на графической зависимости «температура – скорость ультразвука».

Для проведения исследований были изготовлены две серии образцов из асфальтобетона ЩМСг10-1/2,2 по СТБ 1033 [3] с различной поровой структурой. Состав асфальтобетонной смеси представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав смеси

Наименование материала	Содержание в смеси, %
Щебень фр. 5–10 мм	70
Отсев из материалов дробления горных пород	20
Минеральный порошок	10
Стабилизирующая добавка на основе целлюлозного волокна, сверх 100 % минеральной части	0,2
Битум 70/100, сверх 100 % минеральной части	6,0

Уплотнение образцов осуществлялось с помощью секторного пресса (рис. 2), который коррелирует технологию уплотнения асфальтобетонной смеси в лабораторных условиях и технологию уплотнения асфальтобетонного покрытия катками в условиях строительной площадки.



Рисунок 2 – Секторный пресс

Для проведения испытаний были изготовлены две серии образцов-призм (по 4 шт.) размером 50 × 50 × 200 мм с различной поровой структурой. Режим уплотнения был подобран таким образом, чтобы получить образцы асфальтобетона с различной остаточной пористостью.

Образцы-призмы изготавливали следующим образом:

- уплотняли асфальтобетонные образцы размером 120 × 100 × 410 мм;

- уплотненные асфальтобетонные образцы выдерживали при комнатной температуре не менее суток;

- из образцов с помощью отрезного станка для каменных материалов циркулярной пилой с алмазными насадками и водяным охлаждением выпиливали образцы-призмы размером 50 × 50 × 200 мм.

Далее проводили исследования двух серий образцов с определением следующих физико-механических показателей: средней плотности, водонасыщения, остаточной пористости, пористости минерального остова.

После определения физико-механических свойств, проводили исследования образцов с помощью ультразвука с построением зависимости «температура образца – скорость ультразвука» по следующей методике.

Образцы высушивали на воздухе в течение двух суток и определяли остаточную влажность.

После высушивания образцов на воздухе производили замер температуры воздуха, замер температуры поверхности образца с помощью инфракрасного пирометра и определяли скорость прохождения ультразвука через образец с помощью прибора «Тестер ультразвуковой УК1401М» (рис. 3).



Рисунок 3 – Тестер ультразвуковой УК1401М

Далее образцы в воздушно-сухом состоянии помещали в герметичном пакете в морозильную камеру и термостатировали в течение 3 часов.

После этого измеряли температуру образцов и скорость прохождения ультразвука через образец.

Далее в течение двух часов образцы термостатировали при комнатной температуре. Для того чтобы не образовался конденсат на поверхности образцов, образцы при комнатной температуре помещали в герметичный пакет.

Далее все действия повторяли при разных температурах воздуха в морозильной камере.

Когда все измерения скорости звука на образцах в воздушно-сухом состоянии были выполнены, образцы в течение двух суток обезвоживали в при-

боре Сокслета с безводным хлористым кальцием.

Далее измеряли скорость ультразвука при разных температурах на абсолютно сухих образцах. Термостатирование образцов производили с помощью прибора Сокслета.

После этого образцы насыщали водой и 5 %-ным раствором NaCl в вакуумной камере и повторяли все измерения. Термостатирование образцов при комнатной температуре в этом случае производили в воде либо в растворе NaCl.

Результаты исследований приведены в таблице 2 и на рисунках 4–9.

Таблица 2 – Результаты исследований

Наименование показателя	Номер серии образцов	
	1	2
Средняя плотность, г/см ³	2,46	2,38
Водонасыщение, % по объему	2,2	3,3
Остаточная пористость, % по объему	2,5	5,3
Пористость минерального остова, % по объему	16,2	19,15
Температура воздуха при термостатировании в течение 3 часов перед измерением скорости ультразвука, °С	+25	+25
	-1	-1
	-3	-3
	-5	-5
	-7	-7
Температура поверхности образца, °С, в абсолютно сухом состоянии и соответствующая ей скорость ультразвука, м/с	+25,5 – 3250	+25,6 – 3175
	-1 – 3970	-1 – 3865
	-3 – 4040	-3 – 3915
	-5 – 4090	-5 – 3975
	-7 – 4140	-7 – 4045
Температура поверхности образца, °С, в воздушно-сухом состоянии (остаточная влажность 0,5 %–0,6 % по массе) и соответствующая ей скорость ультразвука, м/с	+25,5 – 3305	+25,5 – 3200
	-1 – 4015	-1,1 – 3890
	-3 – 4075	-3 – 4020
	-5 – 4210	-5 – 4100
	-7 – 4270	-7 – 4140
Температура поверхности образца, °С, в водонасыщенном состоянии и соответствующая ей скорость ультразвука, м/с	+23,4 – 3420	+23,4 – 3365
	+1,8 – 3980	+0,6 – 3975
	+0,6 – 4040	+0,1 – 3990
	-4,8 – 4350	-4,6 – 4290
	-7,1 – 4390	-7 – 4340
Температура поверхности образца, °С, насыщенного 5 %-ным раствором NaCl, и соответствующая ей скорость ультразвука, м/с	+23,5 – 3390	+23,5 – 3320
	-1,1 – 4040	-1 – 3960
	-3 – 4110	-3 – 4005
	-5 – 4160	-5 – 4080
	-6,5 – 4290	-5,8 – 4160
	-9 – 4310	-9 – 4200

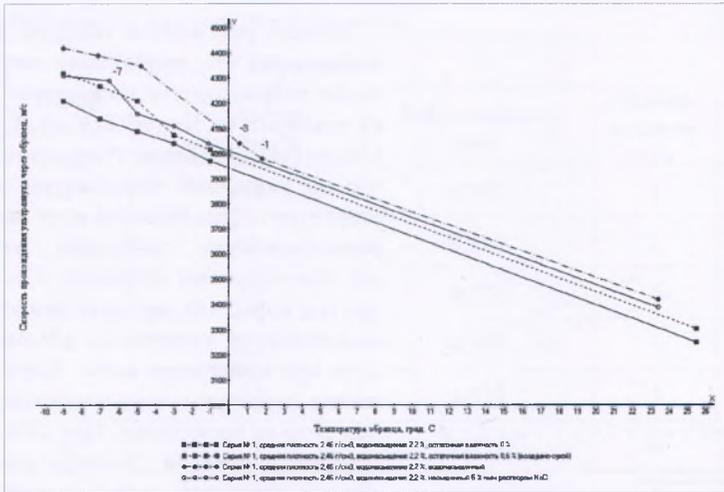


Рисунок 4 – Зависимость «температура образца – скорость ультразвука» для образцов серии № 1

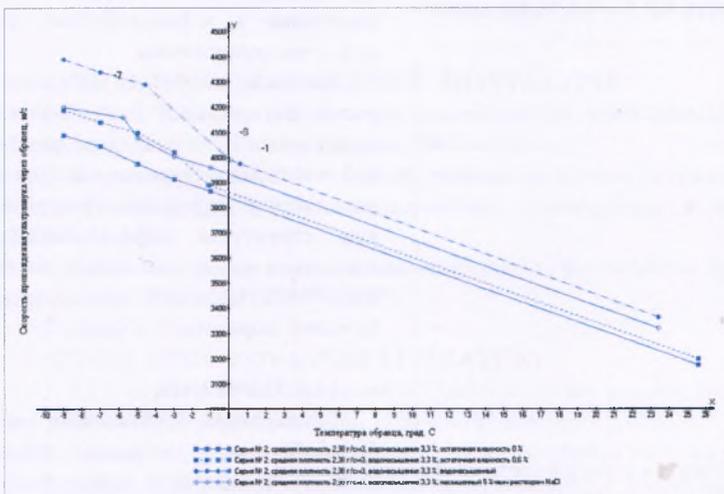


Рисунок 5 – Зависимость «температура образца – скорость ультразвука» для образцов серии № 2

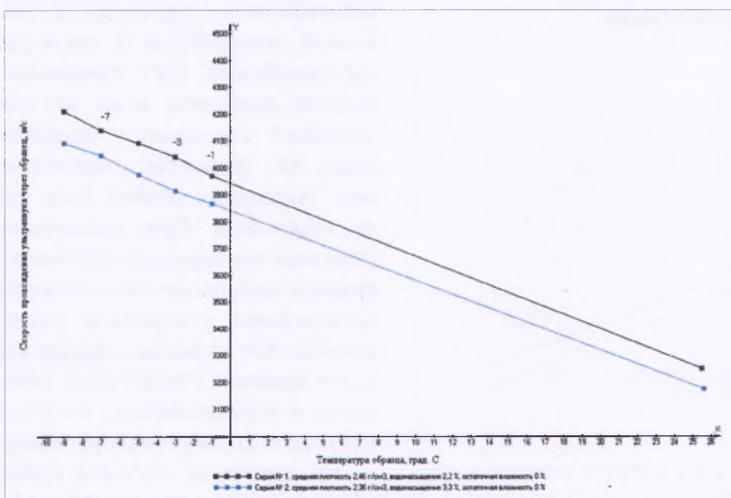


Рисунок 6 – Зависимость «температура образца – скорость ультразвука» для образцов серии № 1 и серии № 2 в абсолютно сухом состоянии

Анализ результатов исследований подтверждает выводы, сделанные на основании результатов ранее проведенных исследований, о том, что температура минус 7 °С – 9 °С является тем пороговым значением, при котором меняется характер льдообразования и механизм его воздействия на структуру асфальтобетона.

Также были проведены исследования по определению льдообразования в структуре асфальтобетона в зависимости от температуры его охлаждения на двух образцах одного состава с учетом их фактической плотности и остаточной пористости. В качестве критерия указанного процесса была взята виброскорость, мм/с, определяемая с помощью портативного виброанализатора «Вибран-3» (рис. 10), который позволял производить запись и анализ колебательных процессов различных объектов, поиск дефектов структуры изделий методом сопоставления реакций на ударное воздействие с эталонным спектром. Прибор состоит из 4 вибродатчиков и электронного блока. Вибродатчики воспринимают механические колебания объекта контроля, преобразуют их в электрический сигнал и передают его в электронный блок. Электронный блок производит запись и последующую обработку полученных сигналов [4].



Рисунок 10 – Виброанализатор портативный «Вибран-3»

Результаты испытаний приведены в таблице 3.

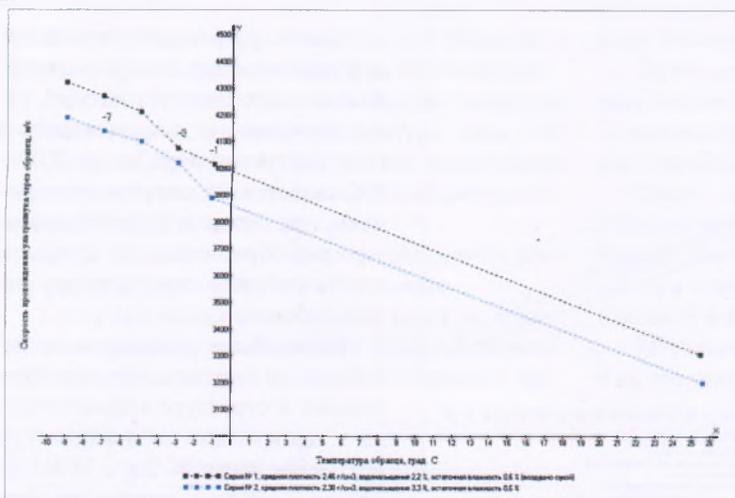


Рисунок 7 – Зависимость «температура образца – скорость ультразвука» для образцов серии № 1 и серии № 2 в воздушно-сухом состоянии (остаточная влажность 0,5 %–0,6 % по массе)

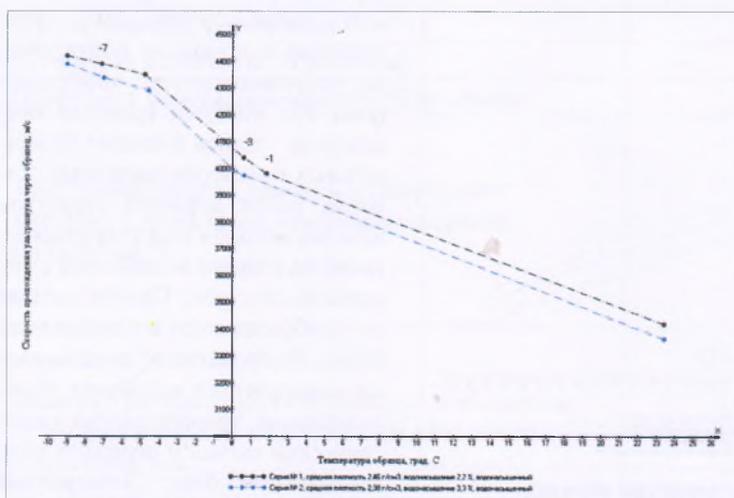


Рисунок 8 – Зависимость «температура образца – скорость ультразвука» для образцов серии № 1 и серии № 2 в водонасыщенном состоянии

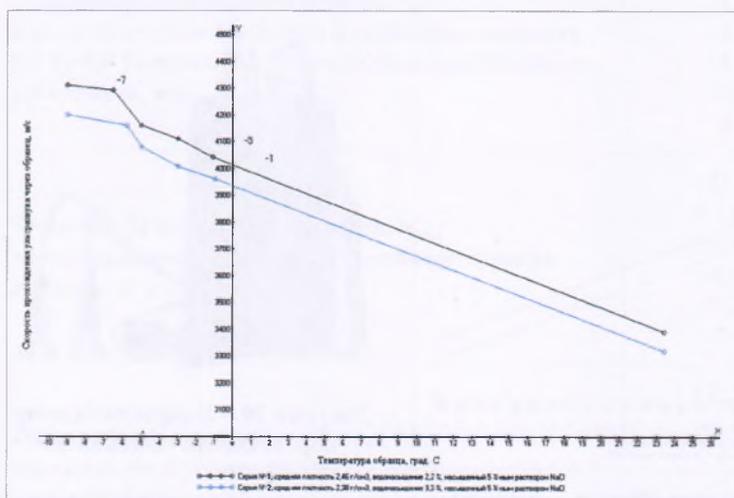


Рисунок 9 – Зависимость «температура образца – скорость ультразвука» для образцов серии № 1 и серии № 2 при насыщении 5%-ным раствором NaCl

Анализ результатов таблицы 3 показывает, что наибольшее значение виброскорости соответствует температуре минус 7 °С–9 °С. Следовательно, можно утверждать, что до указанной температуры в структуре асфальтобетона идет перераспределение свободной воды: она заполняет открытые и закрытые поры, что, соответственно, компенсирует увеличение объема льда при замерзании воды. Разрушения структуры асфальтобетона при этом не происходит. При дальнейшем снижении температуры образца показатель виброскорости уменьшается, что позволяет сделать вывод о наличии структурных изменений в асфальтобетоне, то есть о его разрушении.

Значение показателя виброскорости для образца 2 изменяется аналогично, но с той лишь разницей, что температура, при которой начинаются процессы разрушения структуры асфальтобетона, несколько ниже, что может быть следствием меньшей плотности и большей пористости образца 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температура охлаждения асфальтобетонного образца минус 7 °С–9 °С является тем пороговым значением, при котором меняется характер льдообразования в асфальтобетоне и механизм воздействия на его структуру. До указанной температуры в структуре асфальтобетона идет перераспределение свободной воды, которая заполняет открытые и закрытые поры, что позволяет компенсировать увеличение объема льда при ее замерзании. При дальнейшем снижении температуры образца показатели виброскорости и скорости прохождения ультразвука уменьшаются, что позволяет сделать вывод о наличии структурных изменений в асфальтобетоне, то есть о начальной стадии его разрушения.

На пороговые значения температуры охлаждения асфальтобетонного образца оказывают влияние его плотность и пористость.

Таблица 3 – Результаты испытаний

Образец 1			Образец 2		
Номер испытания	Температура образца, °С	Виброскорость, мм/с	Номер испытания	Температура образца, °С	Виброскорость, мм/с
1	+18	0,792	1	+18	1,562
2	+2	0,840	2	+1,8	1,961
3	-3,4	0,870	3	-4,8	2,623
4	-6,3	0,994	4	-7,7	4,714
5	-6,9	1,579	5	-7,8	6,715
6	-7,1	4,514	6	-8,3	9,300
7	-13,6	2,516	7	-13,8	8,109
8	-13,2	1,634	8	-13,6	1,806

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение : учеб. пособие для строит. спец. вузов / И. А. Рыбьев. – 2-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2004. – 701 с.
2. Битумы нефтяные. Методы определения сцепления битума с мрамором и песком : ГОСТ 11508-74.
3. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия : СТБ 1033-2016.
4. Виброанализатор портативный «Вибран-3» : руководство по эксплуатации / Научно-производственное предприятие «ИНТЕРПРИБОР».

SPISOK ISPOL'ZOVANNOJ LITERATURY

1. Ry'b'yev, I. A. Stroitel'noe materialovedenie : ucheb. posobie dlya stroit. specz. vuzov / I. A. Ry'b'yev. – 2-e izd., ispr. – M. : Vy'sshaya shkola. –2004. –701 s.
2. Bitumy' neftyany'e. Metody' opredeleniya scephleniya bituma s mramorom i peskom : GOST 11508-74.
3. Smesi asfal'tobetonny'e dorozhny'e, ae'rodromny'e i asfal'tobeton. Texnicheskie usloviya : STB 1033-2016.
4. Vibroanalizator portativny'j «Vibrans-3» : rukovodstvo po e'kspluacii / Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «INTERPRIBOR».

Статья поступила в редакцию 10.12.2018.