

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 620.179.13.05

И. С. Мельникова, В. И. Борисов

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ

UDC 620.179.13.05

I. S. Melnikova, V. I. Borisov

DETECTION OF ROAD PAVEMENT DAMAGES USING THERMAL CONTROL METHOD

Аннотация

Рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований по обнаружению дефектов дорожных асфальтобетонных покрытий методом тепловизионного контроля. Большое внимание уделяется проблеме обнаружения поверхностных трещин шириной раскрытия от 1 до 20 мм, которые с трудностью выявляются при диагностике дорог широко распространенным методом визуального линейного сканирования, осуществляемого фото- и видеокамерами. Показано, что тепловизионный контроль состояния асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог имеет определенные преимущества перед визуально-оптическим.

Ключевые слова:

тепловизор, метод конечных элементов, асфальтобетон, дефект, трещина.

Abstract

The results of the research based on the detection of surface damages of road asphalt concrete using the method of thermal control are presented in the article. Attention has been paid to the problem of detection of surface cracks with width from 1 to 20 mm, which are hard to detect using widely used method of visual linear scanning (using photo and video cameras). The advantages of the thermal control method over the visual and optical control method in road pavements diagnostics are presented in the article.

Key words:

thermal camera, finite element method, asphalt concrete, defect, crack.

Введение

Циклическое действие транспортной нагрузки и погодных-климатических факторов вызывает появление поверхностных повреждений дорожных асфальтобетонных покрытий уже в первые пять лет периода эксплуатации автомобильной дороги [1]. Выявление и устранение дефектов в виде трещин, ко-

леи на ранней стадии их возникновения, которые впоследствии негативно сказываются на эффективности работы автомобильного транспорта и безопасности движения, позволило бы избежать развития крупных повреждений в виде выбоин, просадок и дорогостоящего ремонта в будущем.

В Республике Беларусь при диаг-

ностике дорожных покрытий широкое распространение получило применение георадарного оборудования «Око», установки ИПМ-1 для оперативного определения физико-механических характеристик асфальтобетонов, системы визуального сканирования с помощью камеры линейного сканирования LineScan [2, 3]. Однако визуально-оптический контроль дорожного покрытия не обеспечивает достаточного контраста между изображениями дефектной и бездефектной областей, что связано с небольшой разницей коэффициентов отражения света в этих областях и возникновением ложных дефектов, обусловленных неровностями дорожного покрытия [4]. Поэтому разработка других методов дефектоскопии дорожных покрытий является актуальной задачей. Одним из таких методов может служить тепловизионный, основанный на регистрации теплового поля поверхности дорожного покрытия с помощью тепловизора. Он также находит применение в дорожном строительстве при контроле температуры асфальтобетонной смеси при ее укладке, при этом отмечается его преимущество перед визуально-оптическим при выявлении таких дефектов, как мелкие трещины с раскрытием 1...2 мм [5]. Однако использование метода тепловизионного контроля состояния дорожных асфальтобетонных покрытий при диагностике дорог требует обоснования и подробного изучения [6].

Теоретическое обоснование применения метода термографии для обнаружения дефектов дорожных покрытий

Предлагаемая работа посвящена количественному анализу теплового поля асфальтобетонного дорожного покрытия с целью определения возможности использования тепловизора для вы-

явления поверхностных дефектов в виде трещин и раковин, а также подповерхностных дефектов в виде пор. Как известно, метод термографии основан на применении тепловизора для съемки и визуализации теплового поля поверхности нагретого физического объекта благодаря его собственному тепловому излучению в инфракрасной области спектра. С помощью тепловизора строится изображение теплового поля, яркость или цвет которого однозначно определяется энергетической яркостью контролируемой поверхности объекта контроля. Энергетическая яркость зависит от температуры объекта T или его коэффициента излучения ε [7, 8].

Для обоснования целесообразности применения тепловизионного метода при диагностике поверхностных повреждений дорожных асфальтобетонных покрытий на ранней стадии их появления было проведено математическое моделирование дефектной области асфальтобетонного дорожного покрытия. Схема расчетной модели слоя асфальтобетонного покрытия из горячей плотной асфальтобетонной смеси типа Б толщиной 40 мм с поверхностной трещиной приведена на рис. 1, а, вид расчетной конечно-разностной схемы – на рис. 1, б.

В расчетах рассматривались наиболее распространенные повреждения покрытия в виде трещин раскрытием от 2 до 20 мм и глубиной от 10 до 20 мм. При этом определялось распределение температуры по глубине слоя и внутри трещин. Температуры покрытия на поверхности и на глубине 40 мм задавались в зависимости от времени года и с учетом суточных колебаний температуры покрытия на основании экспериментальных измерений на автомобильной дороге М-3 Минск–Витебск дорожно-измерительной станцией в поселке Раубичи по данным РУП «Белорусский дорожный инженерно-технический центр» для апреля.

Результаты математического моделирования распределения температу-

ры в слое асфальтобетонного покрытия представлены в табл. 1.

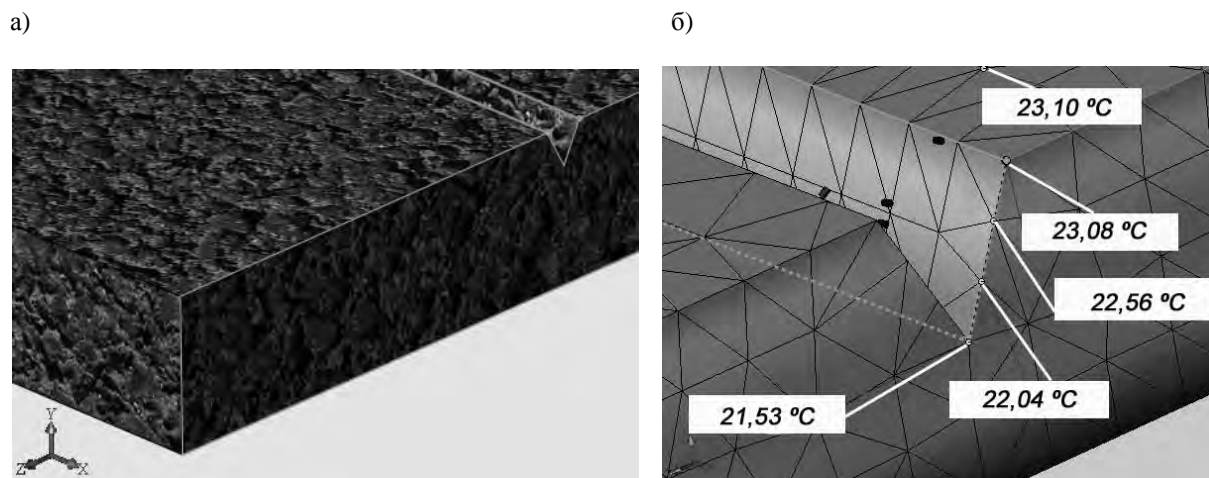


Рис. 1. Моделируемый слой покрытия с трещиной (а) и результаты расчета температурного поля (б)

Табл. 1. Расчетные значения температуры асфальтобетонного слоя с трещинами

| Трещина | Размер трещины | | Температура, °С, на глубине, мм | | | |
|---------|----------------------|-------------|---------------------------------|-------|-------|-------|
| | Ширина раскрытия, мм | Глубина, мм | 0 | 5 | 10 | 20 |
| 1 | 2 | 10 | 23,32 | 23,09 | 22,65 | – |
| 2 | 5 | 10 | 23,31 | 22,94 | 22,44 | – |
| 3 | 10 | 10 | 23,09 | 22,70 | 22,31 | – |
| 4 | 20 | 20 | 23,08 | 22,56 | 22,30 | 21,53 |

В расчетах температура поверхности покрытия задавалась в соответствии с данными дорожно-измерительных станций для теплого времени года и составляла 23,10 °С, температура нижней грани слоя на расстоянии 40 мм от поверхности слоя – 20,00 °С.

Из полученных расчетов видно, что различие в абсолютных значениях температуры на поверхности дорожного покрытия и на дне трещин составляет от 0,7 до 1,5 °С, что достаточно для применения тепловизора для диагностики таких дефектов в теплое время года.

Также были проведены тепловизионные экспериментальные исследования асфальтобетонных образцов с ис-

кусственными дефектами в лабораторных условиях и натурные исследования дефектов на автомобильной дороге.

Экспериментальные исследования по выявлению дефектов дорожных асфальтобетонных покрытий

Были проведены лабораторные исследования асфальтобетонных образцов с различными дефектами и экспериментальные исследования на дорожном асфальтобетонном покрытии с трещинами. При испытаниях использовался тепловизор длинноволнового спектра с неохлаждаемой матрицей EasIRTM-4.

Исследовались асфальтобетонные образцы цилиндрической формы диа-

метром и высотой 80 мм и образцы в форме прямоугольного параллелепипеда сечением 40×40 мм и высотой 100 мм. В прямоугольных образцах путем их разлома на две части были устроены трещины шириной от 0,7 до 5 мм и глубиной от 5 до 10 мм (в зависимости от высоты образца). Трещины в цилиндрических образцах моделировались в виде пропилов шириной 4...5 мм и глубиной 10...20 мм.

Предполагалось, что обеспечить наиболее благоприятные условия для выявления поверхностных дефектов образцов можно при их нагреве снизу, моделируя таким образом возникающий температурный градиент в теплое летнее время года. С целью реализации этого условия была разработана и изготовлена экспериментальная установка с нагревательным элементом.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

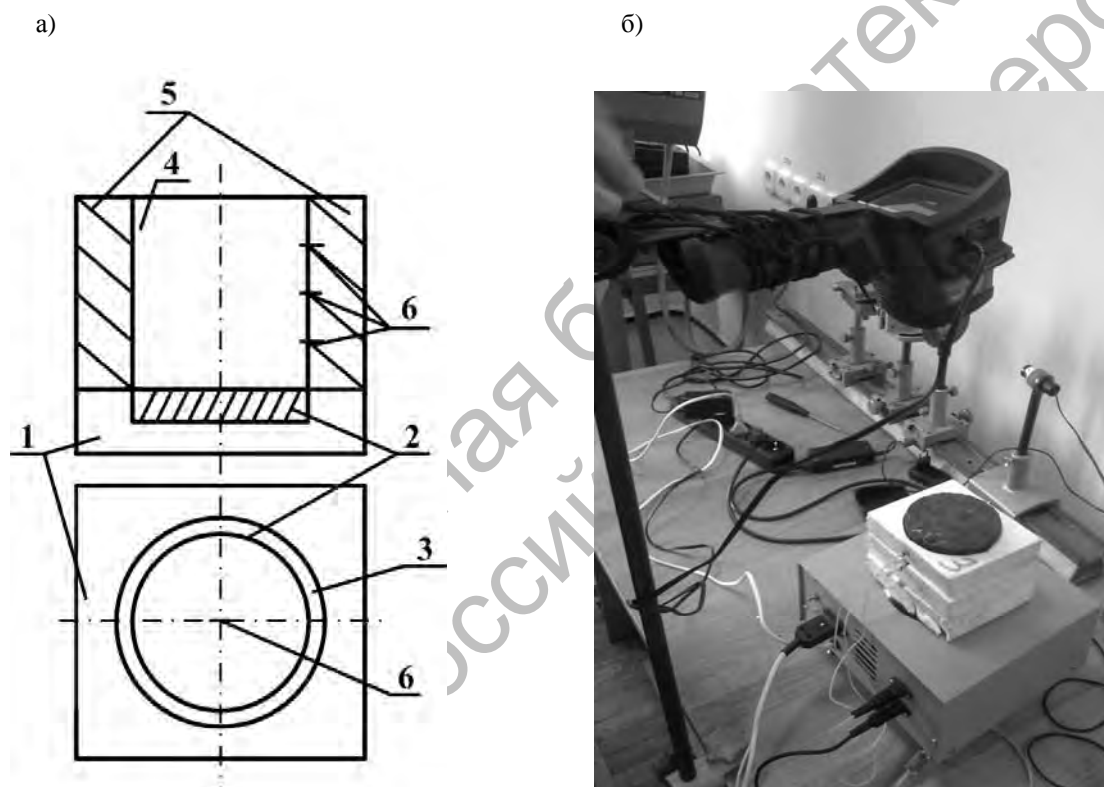


Рис. 2. Конструктивное исполнение установки для выполнения лабораторных исследований (а) и фотография лабораторной установки с установленным контролируемым образцом цилиндрической формы (б)

В металлический короб 1 помещен нагревательный элемент 2 мощностью 450 Вт, работающий от стандартной сети 220 В, над которым находится пластина с ободом 3 из алюминиевого сплава для обеспечения хорошей теплопроводности. Нагрев и поддержание постоянной средней температуры на пластине осуществлялись за счет цикла

«нагрев–охлаждение». Для этого использовался микроконтроллерный блок терморегулирования, который обеспечивал регулирование нагрева образца (стабилизацию температуры на нижней поверхности образца) и измерение температуры образца в трех точках. Управление блоком терморегулирования и измерения температур осуществлялось с

помощью ЭВМ. Посредством ЭВМ на блок терморегулирования, связанный с нагревательным элементом и установленным на пластине температурным датчиком, передавалось значение температуры, которое необходимо поддерживать постоянным. Далее происходил нагрев пластины до заданной температуры. Затем обеспечивался отвод тепла от нагревателя с помощью вмонтированного в короб 1 вентилятора, и цикл повторялся. Испытуемый образец 4 устанавливался непосредственно на пластину над нагревательным элементом. Для исключения отвода тепла по боковым граням образцов устанавливались коробки 5 из теплоизолирующего материала. Для контроля температуры на нагреваемой пластине и по высоте образца использовались датчики 6 температуры BS 1820. Температура нагревательной пластины задавалась таким образом, чтобы был обеспечен такой градиент температуры по высоте образца, какой проявляется на реальной автомобильной дороге [9]. Контроль температуры на пластине и внутри образца на разной его глубине осуществлялся датчиками температуры, а температура верхней поверхности контролируемого образца – тепловизором. Непрерывное изменение температуры в контрольных точках регистрировалось в виде графической временной зависимости на ЭВМ, а температурный контроль поверхности образцов тепловизором осуществлялся каждые 10 мин.

Лабораторные измерения на экспериментальной установке по выявлению поверхностных дефектов асфальтобетонных образцов проводились в следующей последовательности:

1) асфальтобетонный образец комнатной температуры помещают на пластину установки над нагревательным элементом, на образец надевают короб из теплоизолирующего материала, внутри образца устанавливают датчики температуры (при необходимости);

2) тепловизор закрепляют на шта-

тиве на высоте 45...50 см над поверхностью образца (см. рис. 2, б);

3) на ЭВМ задают температуру для поддержания на нагревательном элементе в пределах от 25 до 40 °С (не выше 40 °С во избежание превышения предела текучести битума, входящего в состав асфальтобетона);

4) включают нагревательный элемент, дожидаются стабилизации температурного поля образца в течение 20...40 мин для образца высотой до 50 мм и в течение 50...60 мин для образца высотой от 50 мм;

5) выполняют съемку поверхности образца с дефектами тепловизором;

6) обрабатывают полученные изображения на ЭВМ с применением программного обеспечения Guide IrAnalyser или другого.

Для проверки соответствия полученных экспериментальных данных было проведено исследование, результаты которого сопоставлялись с результатами измерений температуры по глубине асфальтобетонного слоя покрытия на существующей автомобильной дороге. На рис. 3 представлены результаты измерений датчиками температуры в ходе эксперимента при определении температурного градиента по высоте цилиндрического образца при его нагреве. Высота образца – 80 мм. Датчик 1 был установлен на расстоянии 20 мм от низа образца, датчик 2 – посередине образца на расстоянии 40 мм от низа, датчик 3 – на высоте 60 мм от нижнего края образца. На нагревателе посредством блока терморегулирования была установлена температура 27 °С, в течение часа температурное поле образца стабилизировалось. По прошествии 60 мин устанавливался требуемый температурный градиент, моделирующий ситуацию утренних часов летнего периода года, когда асфальтобетон снизу прогрет больше, чем на поверхности, а разность температур «низ–поверхность» составляет около 8 °С.

Из рис. 3 следует, что температура внутри контролируемого образца моно-

тонно увеличивается со временем нагрева. При этом градиент температур по высоте образца почти не зависит от времени нагрева.

Результаты лабораторных измерений по истечении 60 мин и результаты измерений с существующей автомобильной дороги представлены в табл. 2.



Рис. 3. Показания термодатчиков при нагреве цилиндрического образца высотой 80 мм: 1 – термостат; 2 – датчик 1; 3 – датчик 2; 4 – датчик 3

Табл. 2. Результаты исследования температурного поля асфальтобетонного образца

| Высота образца (снизу вверх), мм | Температура, °C | |
|----------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| | По результатам измерений на дороге [9] | По результатам лабораторных измерений |
| 20 | 20,44 | 20,13 |
| 40 | 16,84 | 16,37 |
| 60 | 15,61 | 15,37 |
| 80 | 13,78 | 13,51 |

Таким образом, полученное в лабораторных условиях с помощью разработанной установки распределение температуры внутри асфальтобетонных образцов соответствует физическим процессам распространения тепловых потоков, происходящим в реальном асфальтобетонном дорожном покрытии, что свидетельствует о высокой степени адекватности физической модели реальному дорожному покрытию.

Результаты экспериментальных исследований по выявлению тепловизо-

ром дефектов асфальтобетонных образцов, а также исследований на существующей автомобильной дороге представлены далее.

Результаты регистрации термограмм приведены на рис. 4, а для образца в форме прямоугольного параллелепипеда высотой 40 мм и на рис. 5, а для цилиндрического образца высотой 80 мм. Для примера на рис. 4, б и 5, б приведены фотографии контролируемых поверхностей тех же образцов соответственно. В первом случае темпера-

тура поверхности образца составила в среднем 22,2 °С, а температура поверхностной трещины в образце шириной 0,7 мм – 22,8 °С. Во втором случае (цилиндрический образец с пропилами) средняя температура поверхности образца составила 19,0 °С, а в области пропилов шириной 4 мм и глубиной 10 мм – 19,9 °С.

Сравнение анализа цветных термограмм и анализа фотографических изображений показало, что контраст изображения термограмм в дефектной и бездефектной областях для обоих образцов значительно выше, чем контраст

фотографического изображения (однако при черно-белой печати термограмм это различие выглядит не столь существенным).

По термограммам можно сделать вывод об удовлетворительном выявлении трещин шириной раскрытия от 0,7 мм.

Для примера на рис. 6 приведено изображение одной из полос поверхности дороги М-6 Минск–Гродно, полученное в ходе проведения сканирования поверхности дороги системой LineScan (зафиксировано фотокамерой).

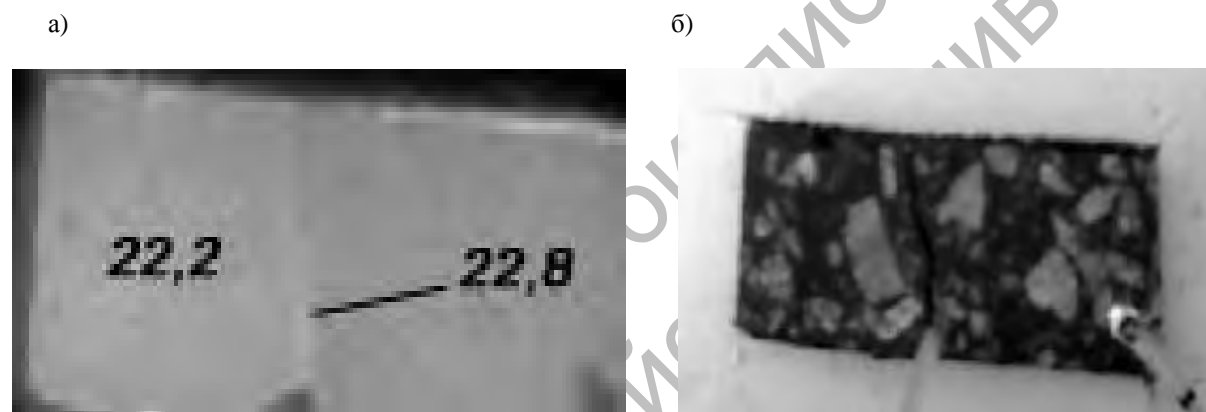


Рис. 4. Термограмма (а) и фотография (б) образца с трещиной шириной раскрытия 0,7 мм

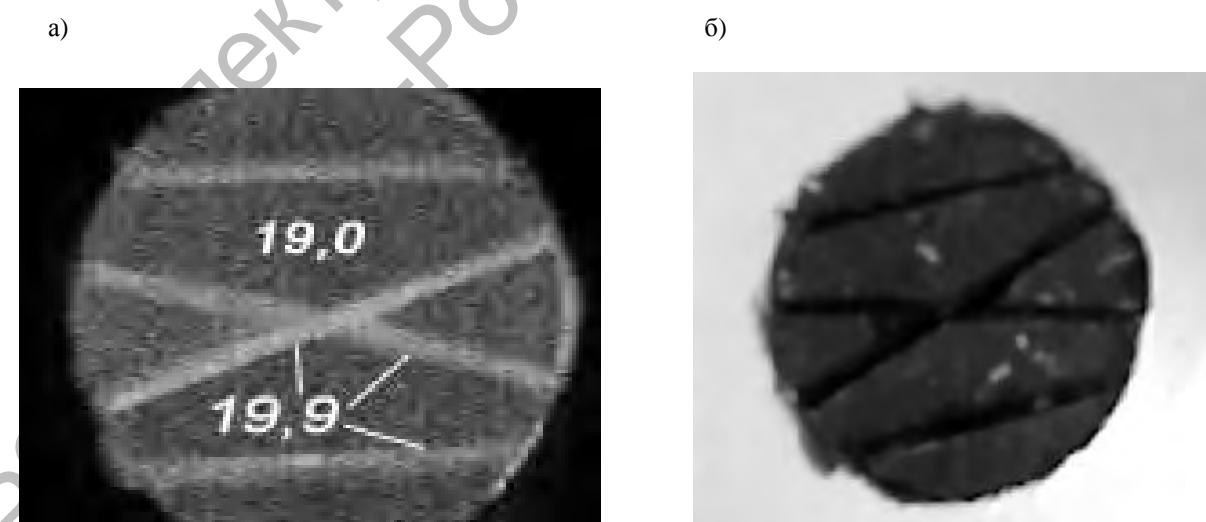


Рис. 5. Термограмма (а) и фотография (б) цилиндрического образца с поверхностной трещиной шириной 4 мм

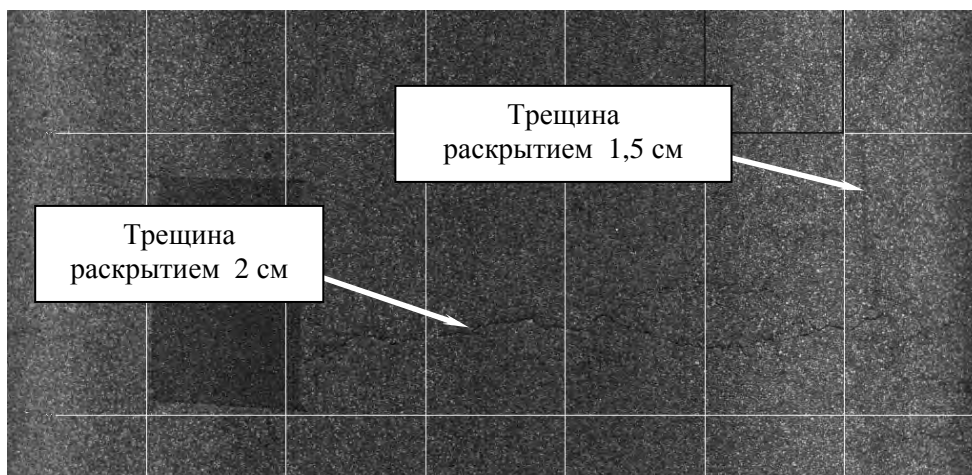


Рис. 6. Полученное с автомобильной дороги М-6 Минск–Гродно фото дорожного покрытия с трещинами шириной раскрытия 1,5...2 см

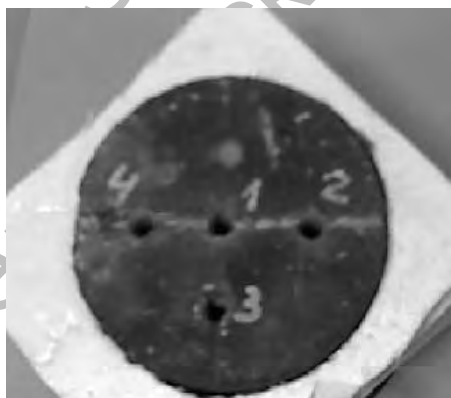
Оказывается, что программное обеспечение по обработке полученных фотографий при фотографическом сканировании в автоматическом режиме не позволяет выявлять трещины шириной раскрытия до 3...5 мм.

Сравнивая результаты проведенного авторами эксперимента по регистрации трещин с помощью тепловизора с результатами диагностики системой визуального сканирования, можно отметить преимущество метода термографии перед съемкой оптическими фото- и видеокамерами, т. к. тепловизионный метод позволяет четко выявлять трещины

раскрытием до 1 мм, потому что дефекты выявляются с более высоким контрастом. А это, в свою очередь, показывает перспективность применения тепловизионного метода контроля для определения качества асфальтобетонного покрытия автодорог.

В работе также были проведены исследования возможности определения скрытых дефектов типа воздушных пор методом тепловой дефектометрии. Для этого использовался цилиндрический асфальтобетонный образец высотой 100 мм, фото поверхности которого приведено на рис. 7.

а)



б)

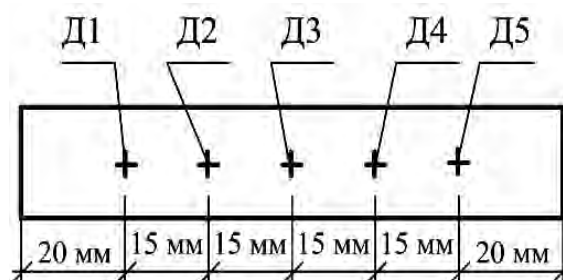


Рис. 7. Фотография поверхности образца (а) и схема линейки (б) к определению скрытых дефектов

В образце были высверлены цилиндрические отверстия диаметром 7 мм глубиной 95...98 мм (рис. 7, отверстия 1...4). Нагрев образца производился с торцевой поверхности, где располагались просверленные отверстия.

Проведенные с помощью тепловизора измерения распределения температуры по торцевой поверхности образца, на которую не выходят просверленные отверстия, показали, что температура как в тех областях, где просверлены отверстия, так и там, где их нет, одна и та же. Для более точного измерения температур на этой поверхности образца использовалась линейка с пятью температурными датчиками (см. рис. 7, б), которые непосредственно устанавливались на контролируемой поверхности.

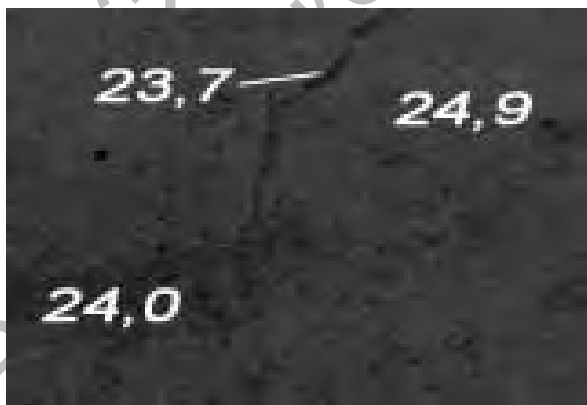
Результаты измерений температуры линейкой показали, что в области центрального отверстия глубиной 95 мм, расположенного на оси образца, температура выше по сравнению с температурой поверхности без дефекта на $0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$, что объяснило результат измерения температуры тепловизором, который имеет погрешности измерения температуры $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, использование тепловизора повышенной точности измерений температуры позволит выявлять дефекты в виде воздушных

пор внутри слоя из асфальтобетона.

В работе также были проведены тепловизионные измерения дефектных участков на существующей автомобильной дороге. Был выбран экспериментальный участок в городе Могилеве по улице Турова с имеющимися на асфальтобетонном покрытии выбоинами и трещинами различной ширины раскрытия. Исследования проводились в июле в сухую погоду при температуре воздуха $20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в период времени с 20 до 22 ч. Термограмма и фотография заполненной песком трещины раскрытием 15 мм представлены на рис. 8.

Обработка термограмм с помощью программного обеспечения Guide IRAnalyser показала разницу в температуре между дном трещины и поверхностью асфальтобетонного покрытия от 1 до $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом температура в области раскрытия трещины меньше, чем температура бездефектной области. Противоположный знак градиента температуры наблюдался для трещины раскрытием 8 мм, не заполненной песком, термограмма и фотография которой приведена на рис. 9. Такое различие знака градиента температуры связано с различием в значениях коэффициента теплового излучения сухого песка и асфальтобетона.

а)

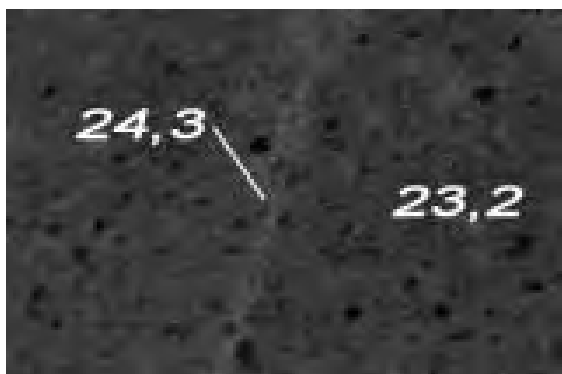


б)



Рис. 8. Термограмма (а) и фотография (б) заполненной песком трещины шириной раскрытия 15 мм

а)



б)



Рис. 9. Термограмма (а) и фотография (б) трещины шириной раскрытия 8 мм

Рекомендации для улучшения выявления поверхностных дефектов асфальтобетонных дорожных покрытий

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют обозначить некоторые рекомендации для улучшения выявления поверхностных повреждений дорожных асфальтобетонных покрытий методом тепловизионной дефектometрии.

1. Требования к оборудованию.

Для обнаружения поверхностных дефектов дорожных асфальтобетонных покрытий достаточно использовать применяемый авторами тепловизор с неохлаждаемой болометрической матрицей 160×120 пикселей, работающий в диапазоне 8...14 мкм с точностью ± 2 °С. Тепловизионные камеры с охлаждаемой матрицей с более высокой температурной чувствительностью позволили бы определять также скрытые повреждения покрытия, а тепловизоры с более высоким углом обзора – одновременно получать изображение двух–трех полос движения на автомобильной дороге вместо одной полосы.

2. Требования ко времени года и времени суток.

Исследования показали, что летом в дневное время асфальтобетонные дорожные покрытия не излучают энергии достаточно для обнаружения дефектов с

высоким контрастом. Исследования авторами температуры покрытия, температуры внутри асфальтобетонных слоев, а также экспериментальные исследования на участке дороги показали, что наиболее благоприятным для выявления поверхностных дефектов, в том числе трещин раскрытием до 1 мм, являются вечерние часы после 20 ч. В это время покрытие наиболее нагрето солнцем, и излучаемая тепловая энергия при охлаждении поверхности покрытия с заходом солнца лучше всего фиксируется тепловизором. На рис. 10 представлен проведенный анализ температуры слоя асфальтобетонного покрытия, характерной для апреля, позволивший определить оптимальное время контроля.

3. Требования к состоянию дорожного асфальтобетонного покрытия и к характеру выявляемых дефектов.

Покрытие при испытаниях должно быть полностью сухим, т. к. в дождь наличие воды на поверхности может привести к выравниванию температуры и некорректному отображению повреждений на термограмме: при компьютерной обработке изображений области со скопившейся дождевой водой можно принять за выбоины и другие повреждения. Наполненность поверхностных трещин песком под действием движущегося по трассе транспорта не имеет значения для их выявления.

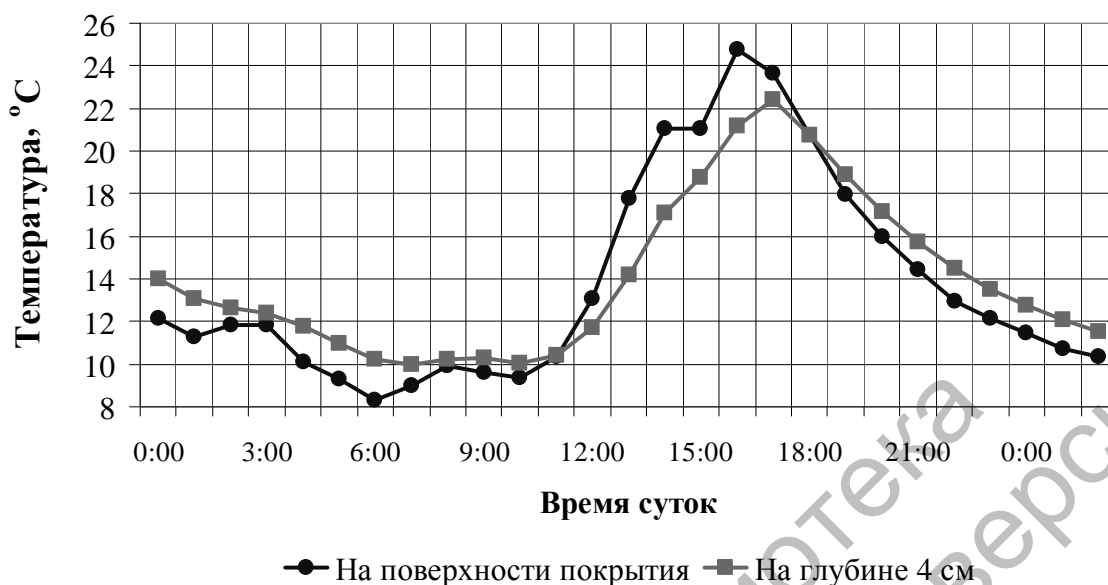


Рис. 10. График изменения температуры покрытия в зависимости от времени суток для определения оптимального времени проведения тепловизионных исследований

Выводы

1. Теоретически и экспериментально установлено, что для обнаружения поверхностных повреждений дорожных асфальтобетонных покрытий на ранней стадии их возникновения, главным образом трещин шириной раскрытия от 0,7 мм, целесообразно применять метод тепловизионного контроля, а ис-

пользование высокоточных тепловизоров позволит выявлять также скрытые повреждения.

2. Разработаны некоторые рекомендации для улучшения выявления дефектов асфальтобетонных дорожных покрытий (требования к используемому оборудованию, времени проведения диагностики, состоянию покрытия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Леонович, И. И.** Диагностика и управление качеством автомобильных дорог : учеб. пособие / И. И. Леонович, С. В. Богданович, И. В. Нестерович. – Минск : Новое знание, 2011. – 350 с.
2. **Мельникова, И. С.** Диагностика повреждений дорожных покрытий / И. С. Мельникова // Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда городов центральной России, Украины и Беларуси : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 12–13 марта 2014 г. – Брянск : Брянская гос. инж.-технол. акад., 2014. – С. 270–273.
3. **Мельникова, И. С.** Учет наличия трещин и определение трещиностойкости дорожных покрытий при диагностике автомобильных дорог / И. С. Мельникова // Труды БГТУ. – 2013. – № 2. – С. 102–105.
4. **Ермолов, И. Н.** Методы и средства неразрушающего контроля / И. Н. Ермолов, Ю. Я. Останин. – М. : Высш. шк., 1988. – 368 с.
5. **Monem, T. A.** Asphalt crack detection using thermography / T. A. Monem, A. A. Oloufa, H. Mahgoub // Inframation. – 2005. – Vol. 6. – P. 139–150.
6. **Дроздов, В. А.** Термография в строительстве / В. А. Дроздов, В. И. Сухарев. – М. : Стройиздат, 1987. – 237 с.
7. **Госсорг, Ж.** Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение : пер. с фр. / Ж. Госсорг ; под ред. Л. Н. Курбатова. – М. : Мир, 1988. – 420 с.

8. **Ллойд, Дж.** Системы тепловидения : пер. с англ. / Дж. Ллойд ; под ред. А. И. Горячева. – М. : Мир, 1978. – 416 с.

9. **Leonovich, I.** Estimation of the cracking probability in road structures by modeling of external influences / I. Leonovich, I. Melnikova // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2013. – Vol. 8. – P. 240–249.

Статья сдана в редакцию 22 сентября 2014 года

Ирина Сергеевна Мельникова, старший преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: rin_m@mail.ru.

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-299-73-56-21.

Irina Sergeevna Melnikova, lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: rin_m@mail.ru.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-299-73-56-21.