

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 <https://t-s.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS419.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS419 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS419>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Подлесных И.С., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И. Уточнение напряженно-деформированного состояния пролетного строения с ортотропной плитой при учете солнечной радиации // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/15SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS419

For citation:

Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu., Skalko Yu.I. (2019). Clarification of the stress-strain state of the superstructure with orthotropic slab taking into account solar radiation. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS419

УДК 72

Подлесных Игорь Сергеевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия
Аспирант кафедры «Строительной механики»
E-mail: 94igor@mail.ru

Гриднев Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия
Профессор кафедры «Строительной механики»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

Скалько Юрий Иванович

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)», Москва, Россия
Доцент кафедры «Вычислительной физики»
Кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: skalko@mail.mipt.ru

Уточнение напряженно-деформированного состояния пролетного строения с ортотропной плитой при учете солнечной радиации

Аннотация. Целью данной работы является уточнение напряженно-деформированного состояния пролетного строения при воздействии солнечной радиации с использованием результатов бесконтактного пирометра и контактного термометра. Проведены натурные измерения температуры элементов пролетного строения с ортотропной плитой в течение светового дня при экстремально высоких температурах и воздействии солнечной радиации. В намеченных точках асфальтобетонного покрытия и главных балок были сняты показания температуры на двух измерительных приборах. Выполнена верификация бесконтактного пирометра по показаниям контактного термометра. Анализ результатов натурных измерений показал, что при измерении температуры элементов пролетного строения с помощью бесконтактного пирометра может возникать погрешность в результатах по сравнению с контактным термометром. При помощи специального программного комплекса определено детальное распределение температуры по толщине слоев дорожной одежды, ортотропной плиты и по высоте главных балок для различных случаев воздействия солнечной радиации. С

помощью разработанной конечно-элементной модели пролетного строения было выполнено 2 варианта расчета напряженно-деформированного состояния: (1) в соответствии с показаниями бесконтактного пирометра; (2) в соответствии с показаниями контактного термометра.

Выполнено сопоставление результатов расчетов, полученных на основании показаний контактного термометра и бесконтактного пирометра. Результаты численных исследований показали, что при расчете напряженно-деформированного состояния пролетного строения наблюдается расхождение результатов по исходным данным пирометра и термометра. При натуральных измерениях температуры в условиях воздействия солнечной радиации для уточнения результатов рекомендуется уточнять показания бесконтактного пирометра по показаниям контактного термометра.

Ключевые слова: пролетное строение; ортотропная плита; солнечная радиация; натурные измерения; распределение температуры; конечно-элементная модель; напряженно-деформированное состояние; контактный термометр; пирометр

Введение

Пролетное строение эксплуатируется в условиях постоянно изменяемого температурного поля. Это обусловлено перепадом суточных и годовых температур, неравномерным нагревом элементов от воздействия солнечной радиации и рядом других факторов. С целью совершенствования проектирования, строительства и эксплуатации мостов выполняется мониторинг состояния пролетного строения¹ для накопления данных о работе сооружения, при воздействии реальных подвижных нагрузок и природных факторов, одним из которых является температурное воздействие.

В настоящее время существует множество типов приборов для измерения температуры поверхности строительных конструкций. Их можно классифицировать по способу измерения на 2 большие группы: контактные термометры и бесконтактные пирометры².

В большинстве случаев, точки измерения температуры пролетного строения не доступны для контактного измерения или доступ к ним затруднен. Бесконтактный пирометр позволяет беспрепятственно проводить измерение температуры поверхности в самых труднодоступных местах. Однако при дистанционном измерении температуры помимо типа материала объекта на результат измерения могут повлиять частицы пыли и грязи, влажность, пары и газы. Также немаловажную роль играет угол измерения и расстояние до поверхности. Если расстояние между пирометром и поверхностью измерения слишком большое, то точка замера может оказаться больше, чем сам объект.

Чтобы избежать ошибок и больших погрешностей при измерении температуры необходимо придерживаться правилам эксплуатации пирометра³ и провести калибровку прибора с помощью контактного термометра.

При обзоре научных работ, посвященных анализу воздействия солнечной радиации, отмечено влияние температуры на НДС пролетного строения и необходимость её учета при проектировании и строительстве мостовых конструкций [1]. В работе [2–3] зарубежных авторов выполнен анализ распределения температуры в пролетном строении с применением

¹ Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.4.002-2008. "Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений".

² ГОСТ 28243-96 Пирометры. Общие технические требования.

³ Руководство по бесконтактному измерению температуры / Testo. – 2009. – 51 с.

современных конечно-элементных программных комплексов, выделены наиболее неблагоприятные случаи воздействия солнечной радиации и изучено ее влияние на прочность конструкции.

Авторами статьи был выполнен ряд работ, посвященных анализу воздействия солнечной радиации. В статьях [4–6] изучено распределение температуры по высоте поперечного сечения сталежелезобетонного пролётного строения и её влияние на сохранность верхнего слоя дорожной одежды. В работах [7–9] с помощью пирометра проведены натурные измерения температуры элементов пролетного строения с ортотропной плитой в разное время года и дана оценка влияния различных случаев воздействия солнечной радиации на НДС мостового сооружения. Сопоставлены результаты расчетов, полученных по рекомендациям нормативных документов и на основании натурных измерений.

Цели исследования:

1. Выполнить натурные измерения температуры элементов пролетного строения при воздействии солнечной радиации при экстремально высоких температурах с использованием двух измерительных приборов.
2. Верифицировать показания пирометра по показаниям контактного термометра.
3. Определить характер температурного поля по толщине слоев дорожной одежды, ортотропной плиты и по высоте главных балок используя полученные результаты натурных измерений.
4. С помощью разработанной конечно-элементной модели пролетного строения выполнить расчет НДС с использованием результатов натурных измерений при различных случаях воздействия солнечной радиации с учетом результатов двух измерительных приборов.
5. Выполнить сопоставление результатов расчетов, полученных на основании показаний контактного термометра и бесконтактного пирометра.
6. Дать рекомендации случаев, для которых необходимо уточнять показания бесконтактного прибора.

1. Описание последовательности выполнения натурных измерений

Натурные измерения температуры проводились на пролетном строении $L = 43,1$ м автодорожного моста через реку Ворона в г. Борисоглебске (рис. 1). Конструктивные особенности сооружения описаны в статье [7].



Рисунок 1. Мост через реку Ворона в г. Борисоглебске

Измерения на объекте проводились в течение светового дня 15 августа 2019 года в 08:30, 10:00, 12:00, 14:30 и 17:00. На каждом этапе были проведены замеры температуры в 3 точках асфальтобетонного покрытия пролетного строения и температура по высоте главных балок при различных температурах воздуха и положениях солнца. Измеряемые элементы пролетного строения представлены на рис. 2.



а) б)
Рисунок 2. Измеряемые элементы пролетного строения: а) асфальтобетонное покрытие; б) главные балки

Измерение температуры выполнялось с использованием двух приборов (рис. 3): пирометр (инфракрасный термометр) «Мегеон 16400» и контактный термометр «мультиметр РМ838».

Мегеон 16400 позволяет на расстоянии узнать температуру поверхности исследуемого объекта в диапазоне от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Принцип действия пирометра заключается в сборе на объективе инфракрасной энергии, излучаемой объектом. Затем сенсор превращает данную энергию в электрический сигнал с дальнейшим выводом результата измерения на дисплей.

Для измерения температуры с помощью контактного термометра РМ838 необходимо установить переключатель в положение $^{\circ}\text{C}$, подсоединить термопару в гнездо прибора, другим концом приложить к измеряемой поверхности, снять показания температуры на дисплее. Диапазон измерения температуры составляет $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\%$)



а) б)
Рисунок 3. Приборы для измерения температуры элементов пролетного строения: а) пирометр Мегеон 16400; б) термометр РМ838

На рис. 4 приведен график изменения температуры в течение светового дня 15 августа 2019 года.

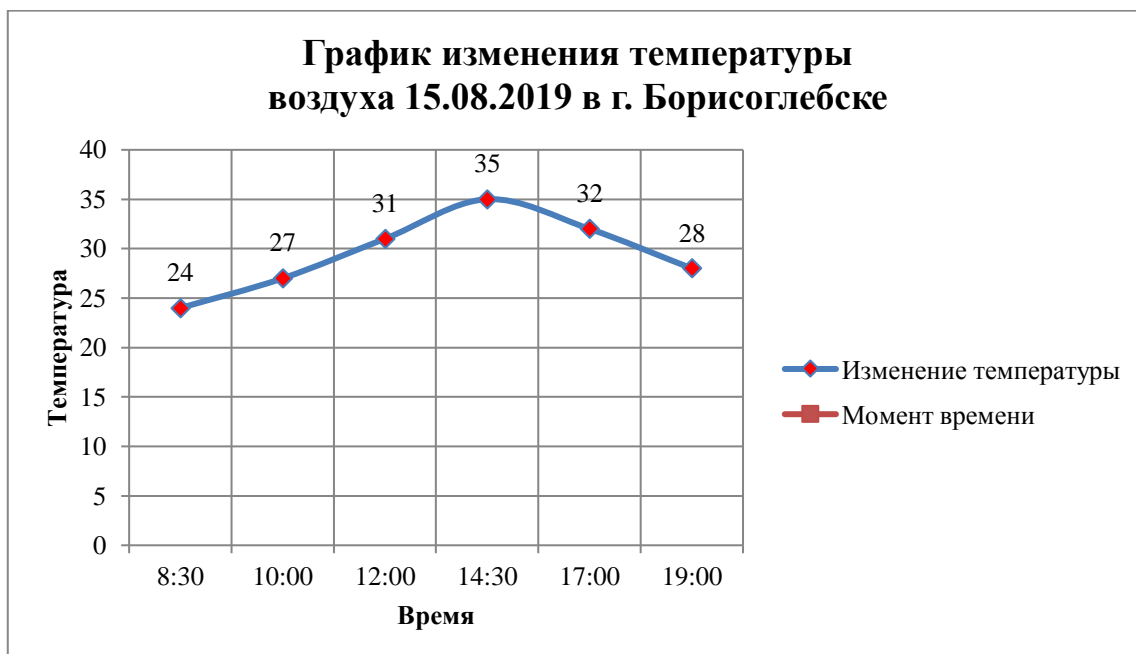


Рисунок 4. График изменения температуры в течение светового дня

Максимальная температура воздуха в день исследования на объекте составила 35 °С. Пролетное строение ориентировано таким образом, что одна главная балка находится на солнце и подвержена нагреву, а другая постоянно находится в тени. Асфальтобетонное покрытие в течение всего периода измерения находилось под воздействием солнечных лучей.

Используемый контактный термометр позволяет выполнять измерения с точностью до целых чисел. Для более точного измерения снимались показания температуры в 3-х точках (рис. 5) в измеряемой области и находилась средняя температура.



а) б)
Рисунок 5. Точки в области измерения элемента пролетного строения: а) асфальтобетонное покрытие; б) главные балки

2. Результаты натурных измерений

Сравнение показаний температуры элементов пролетного строения на термометре и пирометре в характерных точках для момента времени 17:00 при температуре воздуха 32,0 °С представлены на рис. 6.

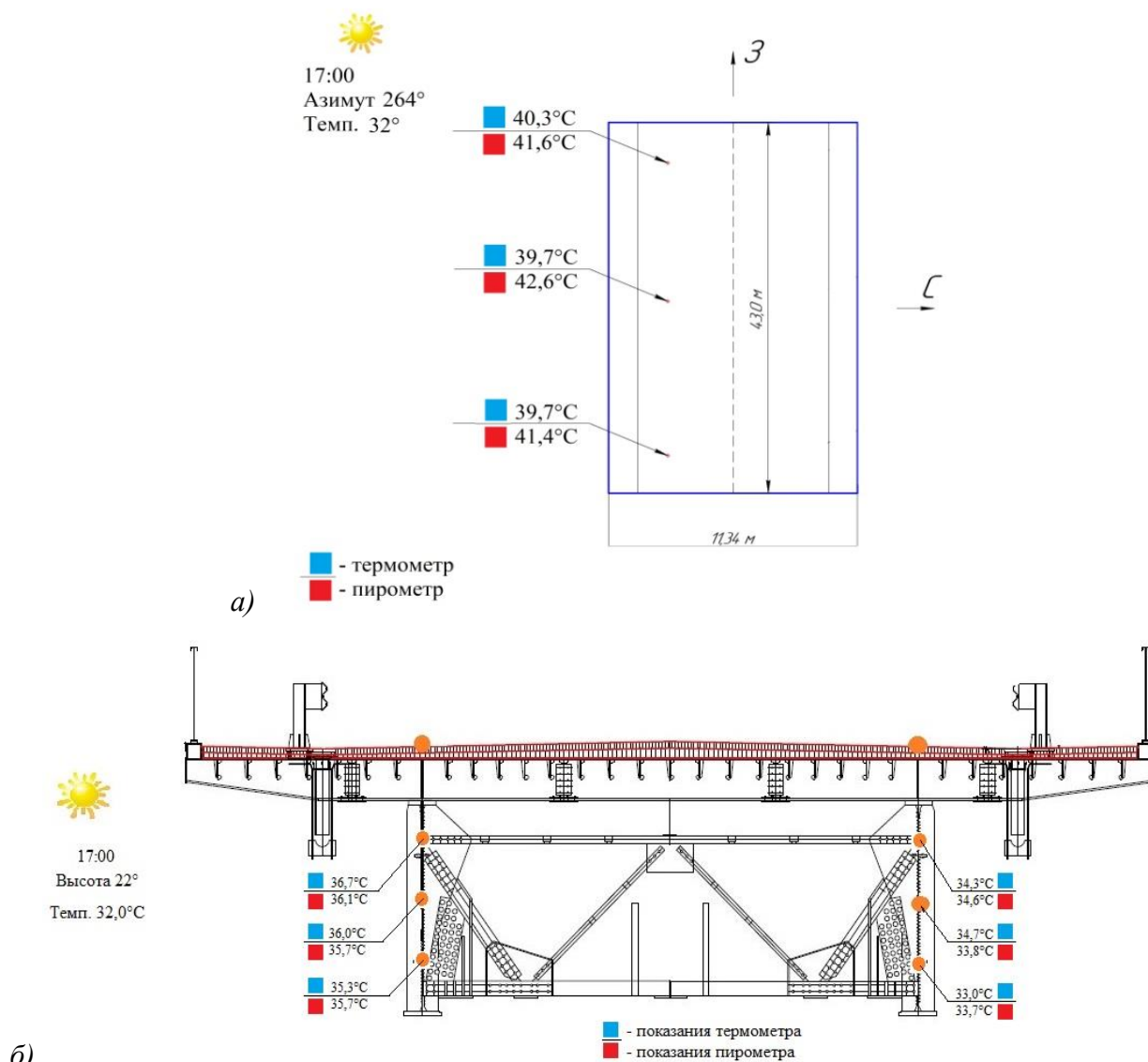


Рисунок 6. Сравнение температуры элементов пролетного строения 15.08.2019: а) асфальтобетонное покрытие; б) главные балки

Пример работы измерительных приборов представлен на рис. 7.



Рисунок 7. Пример работы бесконтактного пирометра и контактного термометра: а) измерение температуры асфальтобетонного покрытия; б) измерение температуры главных балок

В течение дня асфальтобетонное покрытие под действием солнечных лучей нагрелось до 48,5 °С, при температуре воздуха 35 °С. Максимальная температура главных балок составила 37,0 °С. Сравнение температуры асфальтобетонного покрытия на термометре и пирометре представлено на рис. 8.

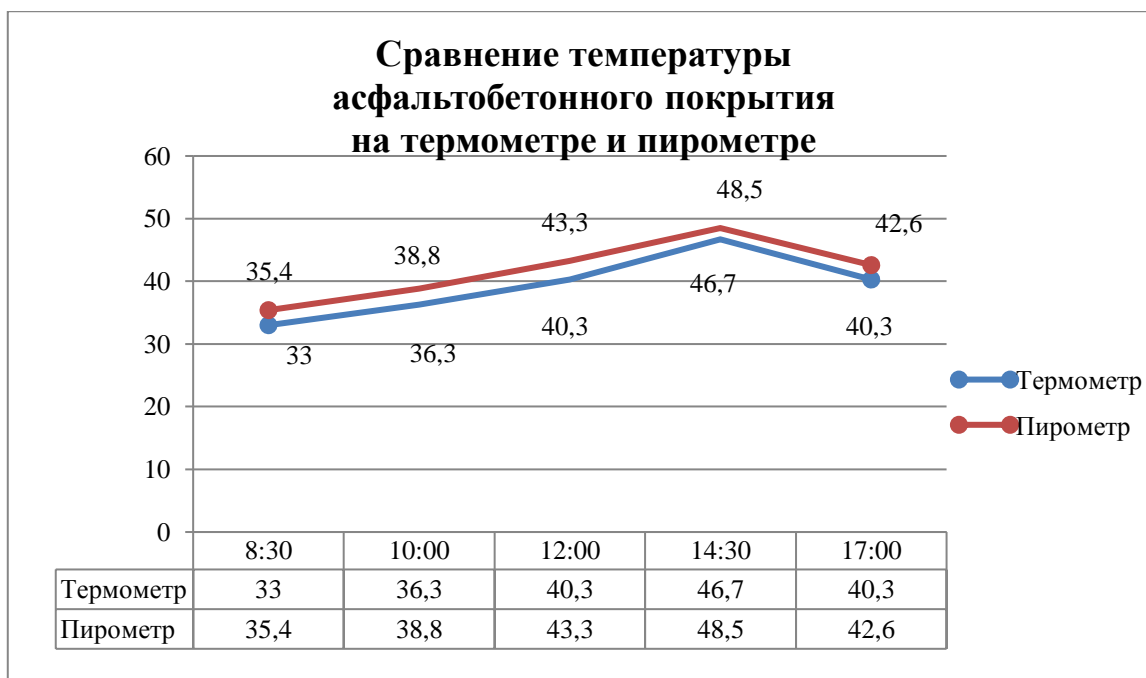
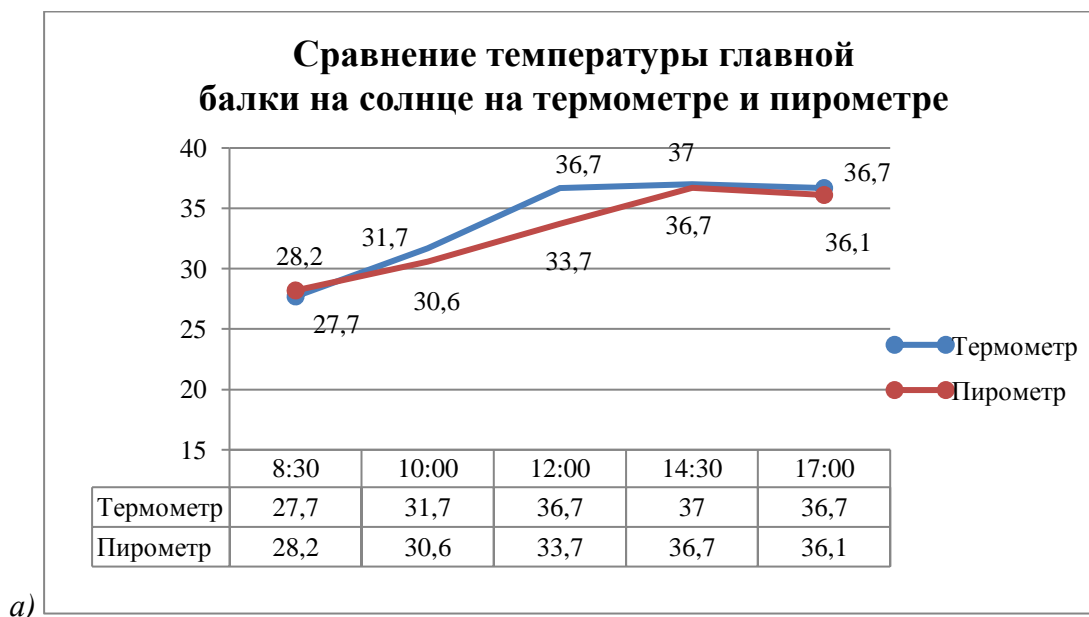


Рисунок 8. Сравнение температуры асфальтобетонного покрытия на термометре и пирометре

Сравнение температуры главных балок на термометре и пирометре представлено на рис. 9.



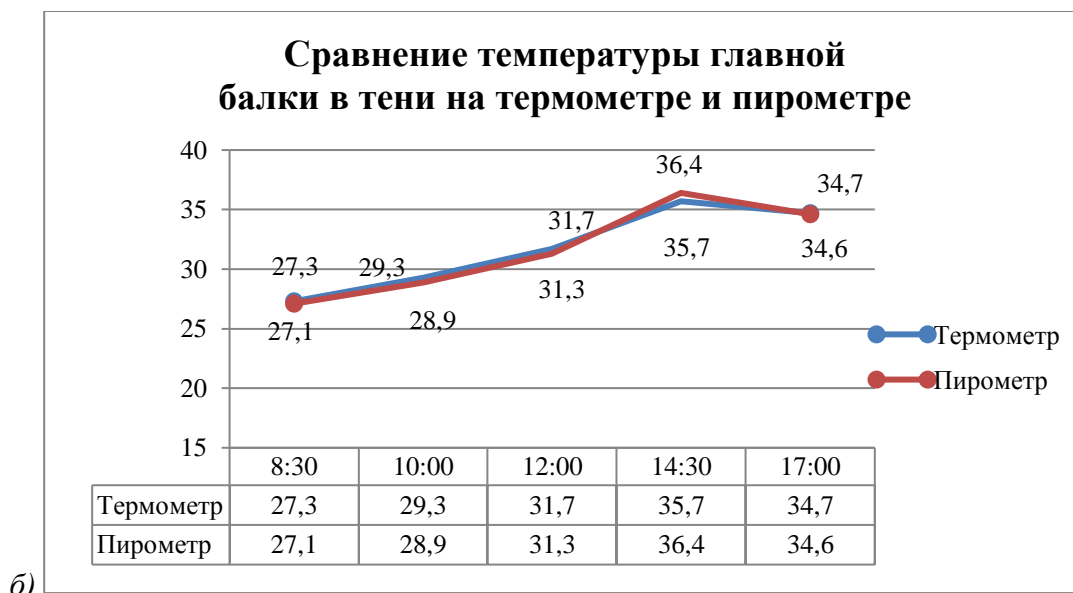


Рисунок 9. Сравнение температуры главных балок на термометре и пирометре: а) сравнение температуры главной балки на солнце; б) сравнение температуры главной балки в тени

Перепад температуры между главными балками и асфальтобетонным покрытием, достигает 12,8 °С (26,3 %). Максимальная разница температур в асфальтобетонном покрытии в течение дня составила 13,1 °С. Наибольшая разница температур в главных балках в тени и на солнце составила 5,0 °С.

3. Описание конечно-элементной модели

Для анализа напряженно-деформированного состояния пролетного строения использовалась разработанная в комплексе «ПК Лира САПР» пространственная конечно-элементная (КЭ) модель (рис. 10), включающая слои дорожной одежды, и позволяющая учитывать неравномерное распределение температуры по высоте поперечного сечения мостового сооружения.

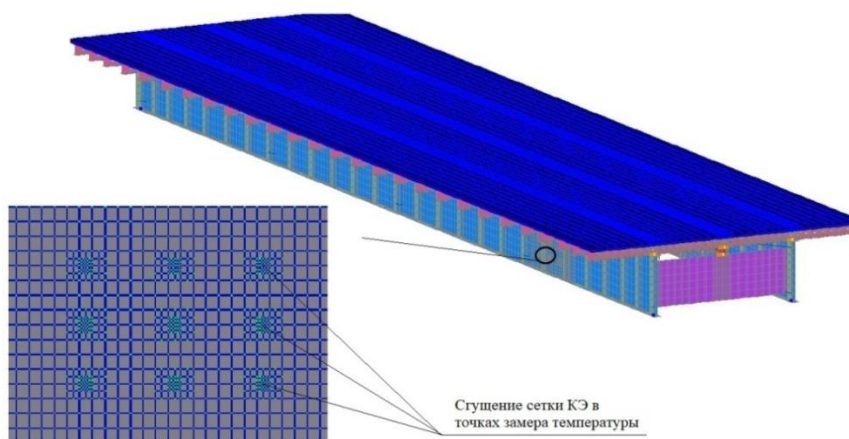


Рисунок 10. Конечно-элементная модель пролетного строения

Подробное описание конечно-элементной модели было представлено в [7]. Для уточнения напряженно-деформированного состояния в условиях солнечной радиации сетка КЭ в точках замера температуры сгущалась.

Характер распределения температуры в слоях дорожной одежды определен с помощью программного комплекса для моделирования тепловых полей ELCUT Student. В статье [4] описаны возможности данного комплекса и выполнен сравнительный анализ.

Характер распределения температуры по толщине дорожной одежды при максимальной температуре воздуха 35 °С изображен на рис. 11.

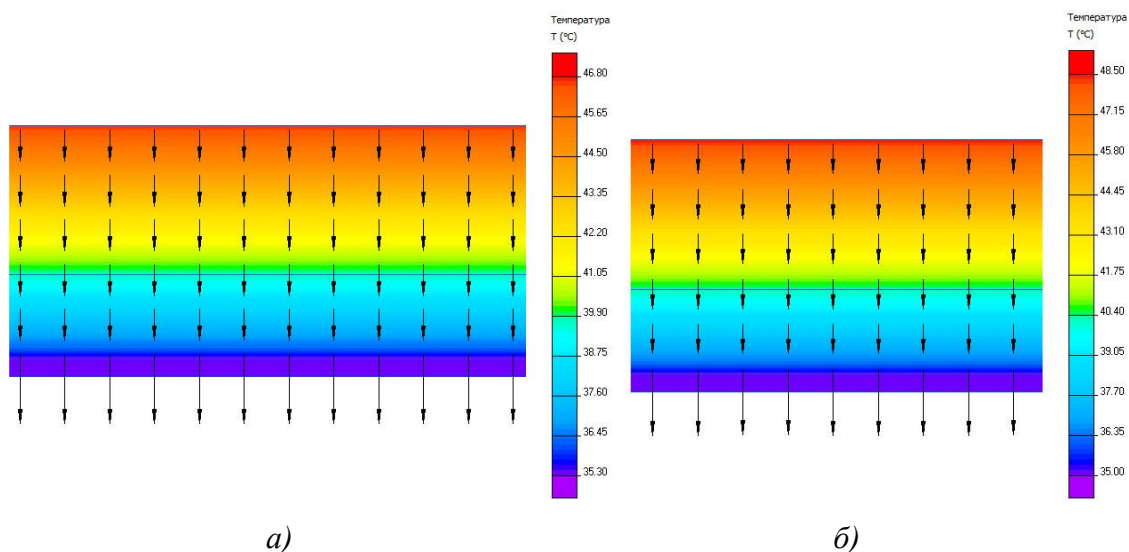


Рисунок 11. Распределение температуры в слоях дорожной одежды:
 а) на основании показаний термометра; б) на основании показаний пирометра

4. Анализ результатов численных исследований

При выполнении расчета были получены напряжения элементов пролетного строения. Проведен сравнительный анализ результатов расчета, полученных на основании показаний контактного термометра и бесконтактного пирометра для каждого случая воздействия солнечной радиации.

Сравнение напряжений в главных балках представлено на рисунке 12.

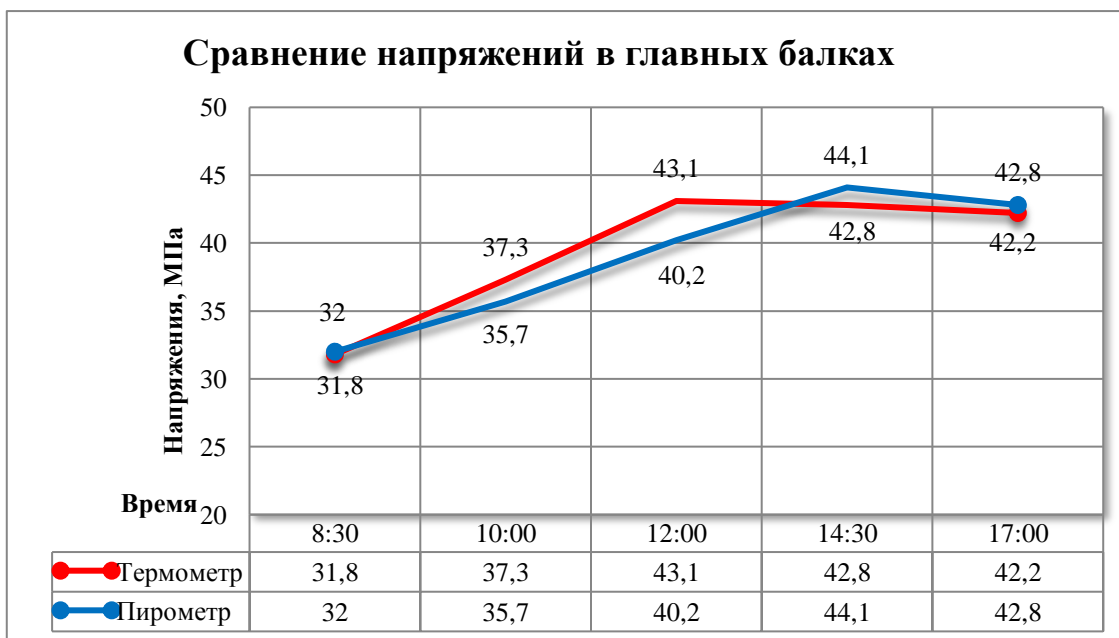


Рисунок 12. Сравнение напряжений в главных балках

Наибольшая разница напряжений наблюдается в 12-00. В это время температура на термометре была выше на 8,9 %, чем на пирометре, при этом напряжение увеличилось на 7,2 %.

Сравнение напряжений в верхнем слое дорожной одежды представлено на рисунке 13.

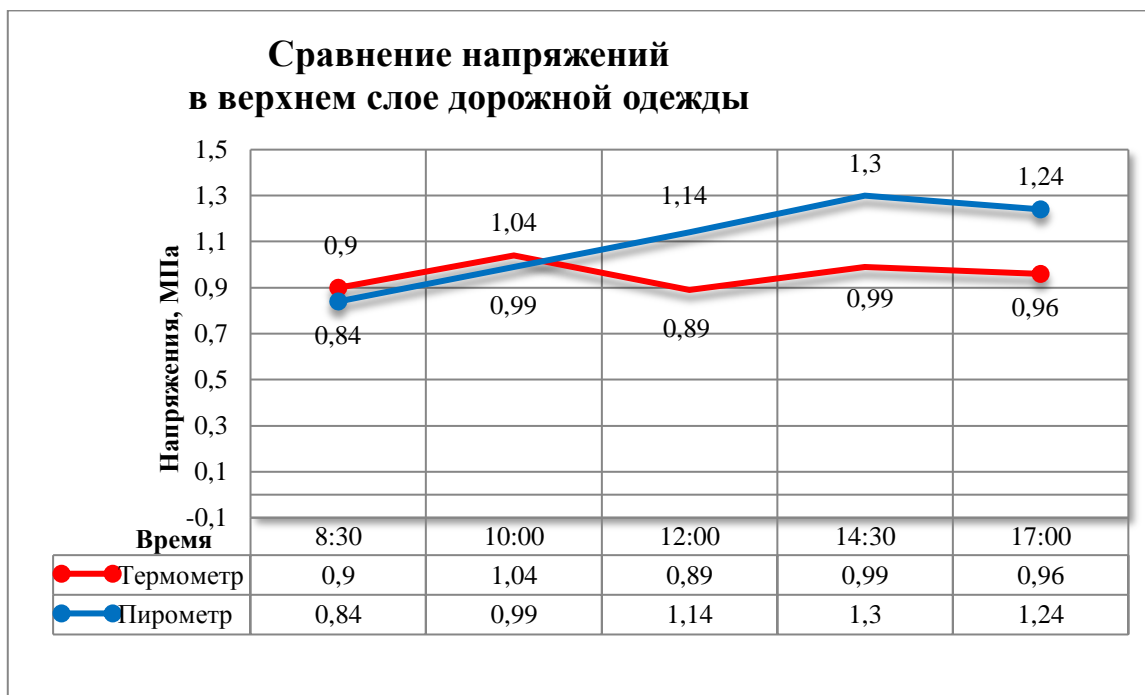


Рисунок 13. Сравнение напряжений в верхнем слое дорожной одежды

Максимальные напряжения в верхнем слое дорожной одежды в течение дня с использованием показаний термометра составили 0,99 МПа, а с использованием пирометра 1,3 МПа. То есть разница показаний в одинаковый момент времени существенно отличается и достигает 31,3 %.

Сравнение напряжений в ортотропной плите представлено на рисунке 14.



Рисунок 14. Сравнение напряжений в ортотропной плите

Как видно по графику погрешность в результатах напряжений в моменты времени 08-30 и 10-00 незначительна и составляет менее 1 %. В дальнейшие моменты времени погрешность варьируется от 12,6 % до 13,2 %.

Таким образом, измерение бесконтактным пирометром подходит не для всех случаев. Минимальная погрешность (менее 2 %) в показаниях приборов и результатах расчета НДС наблюдается в теневой зоне главных балок. Наибольшее расхождение наблюдается в асфальтобетонном покрытии, где при разнице показаний приборов в 7,4 %, напряжения увеличились на 31,3 %.

Выводы

1. Анализ результатов натуральных измерений показал, что при измерении температуры элементов пролетного строения с помощью бесконтактного пирометра может возникать погрешность в результатах по сравнению с контактным термометром.
2. Результаты численных исследований позволили установить, что при расчете НДС пролетного строения наблюдается расхождение результатов по исходным данным пирометра и термометра.
3. При натуральных измерениях температуры в условиях воздействия солнечной радиации для уточнения результатов рекомендуется верифицировать показания бесконтактного пирометра по показаниям контактного термометра.
4. Измерение бесконтактным пирометром подходит не для всех случаев. При натуральных измерениях поверхностей, находящихся в тени, разница в показаниях приборов минимальна и не сказывается на результатах НДС. При измерении поверхностей, подверженных воздействию солнечной радиации, погрешность возрастает. В таких случаях рекомендуется уточнять показания бесконтактного пирометра по показаниям контактного термометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишутин, В.О. Необходимость учета температурных деформаций при проектировании и строительстве мостовых конструкций / В.О. Мишутин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3 (43). – С. 203–208.
2. Linren Zhou, Yong Xia, James M.W. Brownjohn, Ki Young Koo. Temperature Analysis of a Long-Span Suspension Bridge Based on Field Monitoring and Numerical Simulation. Journal of Bridge Engineering. – 2016. – Vol. 21, Issue 1.
3. XuMing Song, Hani Melhem, Jun Li, QingYuan Xu, Li Jun Cheng. Effects of Solar Temperature Gradient on Long-Span Concrete Box Girder during Cantilever Construction. Journal of Bridge Engineering. – 2016. – Vol. 21, Issue 3.
4. Подлесных И.С., Гриднев С.Ю., Барченкова Н.А. Анализ влияния солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/12SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS218.
5. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Влияние солнечной радиации на сохранность верхнего слоя дорожной одежды сталежелезобетонного пролётного строения / Сборник материалов XIX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». – 2018. – С. 34–36.
6. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Распределение температуры по высоте поперечного сечения сталежелезобетонного пролётного строения автодорожного моста / Сборник материалов XIX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». – 2018. – С. 36.
7. Podlesnykh, I.S., Gridnev, S.Yu., Barchenkova, N.A. Verifying Regulatory Documents for Solar Radiation Level Control When Estimating Stress-Strain State of the Spans Based on the Orthotropic Slab. Proceedings of 24th International Conference “МЕХАНИКА 2019”, Kaunas University of Technology. – 2019. – p. 116–121.
8. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Влияние неравномерного нагрева на распределение напряжений в элементах пролетного строения с ортотропной плитой / Сборник материалов XX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры». – 2019. – С. 108–110.
9. Гриднев С.Ю., Подлесных, И.С. Особенности температурного поля в элементах пролетного строения автодорожного моста при близких к нулю отрицательных температурах / Сборник материалов XX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры». – 2019. – С. 110–112.

Podlesnykh Igor Sergeevich

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
E-mail: 94igor@mail.ru

Gridnev Sergey Yuryevich

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
E-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

Skalko Yury Ivanovich

Moscow institute of physics and technology, Moscow, Russia
E-mail: skalko@mail.mipt.ru

Clarification of the stress-strain state of the superstructure with orthotropic slab taking into account solar radiation

Abstract. The purpose of this work is to clarify the stress-strain state of the superstructure under the influence of solar radiation using the results of a non-contact pyrometer and contact thermometer. Full-scale measurements of the temperature of the superstructure elements with orthotropic slab during daylight at extremely high temperatures and exposure to solar radiation were carried out. Temperature readings on two measuring instruments were taken at the designated points of the asphalt pavement and main beams. Verification of the non-contact pyrometer according to the readings of the contact thermometer was performed. The analysis of the results of full-scale measurements showed that when measuring the temperature of the superstructure elements using a non-contact pyrometer, an error in the results may occur in comparison with a contact thermometer. With the help of a special software package, a detailed temperature distribution was determined by the thickness of the layers of road pavement, orthotropic slab and the height of the main beams for various cases of solar radiation exposure. With the help of the developed finite element model of the superstructure, 2 variants of calculating the stress-strain state were performed: (1) in accordance with the readings of the non-contact pyrometer; (2) in accordance with the readings of the contact thermometer.

The results of calculations obtained on the basis of the contact thermometer and non-contact pyrometer are compared. The results of numerical studies have shown that when calculating the stress-strain state of the span structure, there is a discrepancy between the results of the initial data of the pyrometer and the thermometer. In full-scale temperature measurements under the influence of solar radiation to clarify the results, it is recommended to specify the readings of the non-contact pyrometer according to the readings of the contact thermometer.

Keywords: span structure; orthotropic slab; solar radiation; field measurements; temperature distribution; finite element model; stress-strain state; contact thermometer; pyrometer

REFERENCES

1. Mishutin V.O. (2014). The need to take into account temperature deformations in the design and construction of bridge structures. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 3(43), pp. 203–208 (in Russian).
2. Linren Zhou, Yong Xia, James M.W. Brownjohn, Ki Young Koo (2016). Temperature Analysis of a Long-Span Suspension Bridge Based on Field Monitoring and Numerical Simulation. *Journal of Bridge Engineering*, 1(21).
3. XuMing Song, Hani Melhem, Jun Li, QingYuan Xu, Li Jun Cheng (2016). Effects of Solar Temperature Gradient on Long-Span Concrete Box Girder during Cantilever Construction. *Journal of Bridge Engineering*, 3(21).
4. Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu., Barchenkova N.A. (2018). Analysis of influence of solar radiation on the deflected mode of steel-reinforced concrete span. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS218.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS218.
5. Gridnev S.Yu., Podlesnykh I.S. (2018). Vliyanie solnechnoy radiatsii na sokhrannost' verkhnego sloya dorozhnoy odezhdy stalezhelezobetonnoy prolyotnogo stroeniya. [*The effect of solar radiation on the safety of the upper layer of pavement of steel-reinforced concrete span.*] pp. 34–36.
6. Gridnev S.Yu., Podlesnykh I.S. (2018). Raspredelenie temperatury po vysote poperechnogo secheniya stalezhelezobetonnoy prolyotnogo stroeniya avtodorozhnogo mosta. [*Temperature distribution over the cross-sectional height of the steel-reinforced concrete span of the road bridge.*] p. 36.
7. Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu., Barchenkova N.A. (2019). *Verifying Regulatory Documents for Solar Radiation Level Control When Estimating Stress-Strain State of the Spans Based on the Orthotropic Slab*. Lithuania: Kaunas University of Technology, pp. 116–121.
8. Gridnev S.Yu., Podlesnykh I.S. (2019). Vliyanie neravnomernogo nagreva na raspredelenie napryazheniy v ehlementakh proletnogo stroeniya s ortotropnoy plitoy. [*The effect of uneven heating on the distribution of stresses in spans with an orthotropic plate.*] pp. 108–110.
9. Gridnev S.Yu., Podlesnykh I.S. (2019). Osobennosti temperaturnogo polya v ehlementakh proletnogo stroeniya avtodorozhnogo mosta pri blizkikh k nulyu otritsatel'nykh temperaturakh. [*Peculiarities of the temperature field in the span elements of a road bridge at negative temperatures close to zero.*] pp. 110–112.