

## Численное и натурное исследование дефектных участков наружных ограждающих конструкций с повышенной воздухопроницаемостью

С.А. Тихомиров<sup>1</sup>, К.С. Тихомиров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

**Аннотация:** Строительный контроль на стадии подготовки к сдаче объекта требует проверки качества наружных ограждающих конструкций по параметру воздухопроницаемости. Имеющаяся в распоряжении специалистов методика ГОСТ 31167, как и другие аналогичные методики, основана на принципе создания и поддержания требуемого перепада давлений в помещении и за его границей длительное время, одновременно определяя и расход подаваемого для испытаний воздуха. Суть этого метода ограничивает возможности количественной оценки величин воздухопроницаемости через конкретные участки наружных ограждающих конструкций, а позволяет определять только комплексные показатели для одного помещения или группы помещений без указания конкретных величин дефектов различных типов наружных стен, заполнений оконных, дверных проемов и примыканий. Предлагаемый способ качественной и количественной оценки воздухопроницаемости основан на дополнительном анализе температурных полей внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций при обеспечении заданной разности давлений и температур внутреннего и наружного воздуха, поступающего в помещение за счет создания разрежения. Проведение натурных исследований обязательно дополняется результатами численного моделирования конструкций в неразрушенном и дефектном состояниях.

**Ключевые слова:** нестационарный теплоперенос, численное моделирование, расчет температур в дефектной области, анализ температурных полей, сопротивление воздухопроницанию, экспериментальная оценка воздухопроницаемости.

### Введение

Сегодня существуют достоверные способы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий, широко описанные в специализированной литературе [1,2], а использование ультразвукового [3] или теплотрического [4] методов подчеркивает их достоинства. Широко в практике специалистов строительного контроля используется тепловой [5-7] метод неразрушающего контроля для дефектометрии теплоизоляционных конструкций зданий и сооружений. Вместе с тем, при решении задачи переноса тепла через наружные ограждающие конструкции полностью исключено перемещение воздуха

---

через стенку в любом направлении, что недостижимо на практике. Конструкции с повышенной воздухопроницаемостью существенно увеличивают энергетические затраты на подогрев поступающего воздуха в холодный период года [8-10]. В нормативной литературе, в частности в п.7 СП 50.13330.2012 приводятся требования к сопротивлению воздухопроницанию ограждающих конструкций,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{кг}$ , а суть метода экспериментальной оценки воздухопроницаемости в натуральных условиях, как показано в ГОСТ 31167-2009, заключается в том, что из испытываемого помещения нагнетателем удаляют часть воздуха, создавая требуемый перепад давлений при постоянном измеряемом расходе. Аналогичны по способу оценки и методики ГОСТ Р 59615-2021, ГОСТ 33792-2021, ГОСТ 32493-2013 [11]. По результатам измерений вычисляют обобщенные характеристики воздухопроницаемости ограждений испытываемого помещения. Такой метод позволяет получить количественные характеристики для всей наружной ограждающей конструкции без уточнения мест и характеристик дефектов. Предлагаемый способ качественной и количественной оценки величины дефектов сопротивления воздухопроницанию наружных ограждающих конструкций предполагает дополнение в виде измерения величины температурного перепада между внутренней поверхностью и воздухом помещения. Для проведения натуральных испытаний по определению температур поверхностей в зоне дефектов наружных ограждающих конструкций по ГОСТ Р 54852-2011 [12] кроме специализированной установки использованы контактный термометр ТК-5.11 с зондами температуры и относительной влажности, набор смарт-зондов Тесто 805i, 405i, 410i, 905i, 510i, тепловизор Тесто 872 в комплекте со смарт-зондом Тесто 605i, измеритель плотности тепловых потоков и температуры ИТП-МГ4.03 с набором датчиков температуры и плотности тепловых потоков с сертификатами калибровки в условиях завода-изготовителя. Так

---

как в натуральных условиях установление стационарного режима теплообмена наружных ограждающих конструкций невыполнимо [13], то определение характеристик дефектов требуется проводить для режимов охлаждения участков дефектных областей при прохождении через них холодного [14] наружного воздуха в зимний период при создании разрежения в помещении.

### **Натурное исследование воздухопроницаемости комбинированным методом**

В первую очередь проводится оценка качества строительства по характерным признакам дефектов наружных ограждающих конструкций, отличающих их от нормативного состояния. Визуально выявляются характерные дефекты: отсутствие заполнения монтажного зазора пенным утеплителем (или его разрушение), дефекты в местах примыкания внутренних откосов или подоконника к коробке оконного блока (здесь может отсутствовать герметизация, образовываться трещины и щели), в конструкциях не должно быть сквозных отверстий и щелей. Также проверяется целостность прозрачной и непрозрачной частей заполнения оконных и дверных проемов, их геометрическая правильность и отклонения от вертикальных осей. Инструментальная проверка наличия непроектных отверстий и движения воздуха через конструкции предварительно проводится при помощи малогабаритных тепловизоров по величине отклонения температуры внутренних поверхностей. Качественный анализ термограмм при этом позволяет выявить непроектные величины воздухопроницаемости при естественном перепаде давлений внутри и снаружи здания. На рисунках 1 – 4 показаны случаи обнаружения дефектов (доступ наружного воздуха в конструкцию, доступ наружного воздуха в зоне примыкания по периметру оконного блока, доступ наружного воздуха в зоне примыкания подоконника и оконного блока, доступ наружного воздуха в зоне запирающих приборов и петель дверных и оконных блоков) путем

проведения количественного анализа посредством измерения полей температур и выявления термически однородных зон с последующим измерением величины плотности тепловых потоков через фрагменты ограждений.

Количественный анализ величин дефектных областей проводится по величине тепловых потерь в зоне дефекта вначале для случая естественного перепада температур и давлений внутри и снаружи здания. Для этого определяется плотность теплового потока в реперной зоне, величины наружных и внутренних температур и давлений. Для примера, представленного на рисунках 1 – 4 меньшее из фактических сопротивлений теплопередаче реперных зон по результатам обследования составило  $R_0 = 3,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что удовлетворяет требованиям тепловой защиты согласно СП 50.13330, где  $R_0 > R_0^{\text{НОРМ}} = 2,99 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

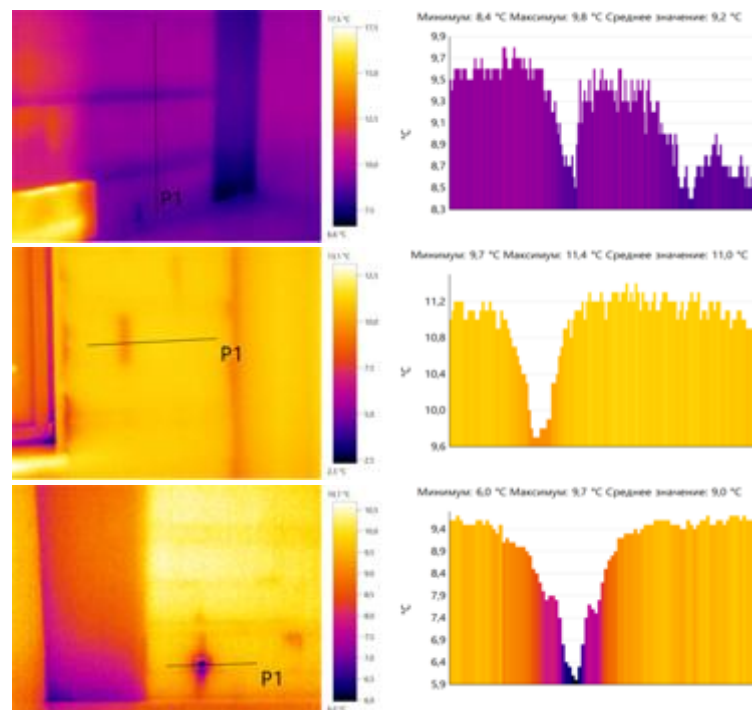


Рис. 1. – Термограмма дефектного участка (доступ наружного воздуха в конструкцию из ячеистобетонных блоков)

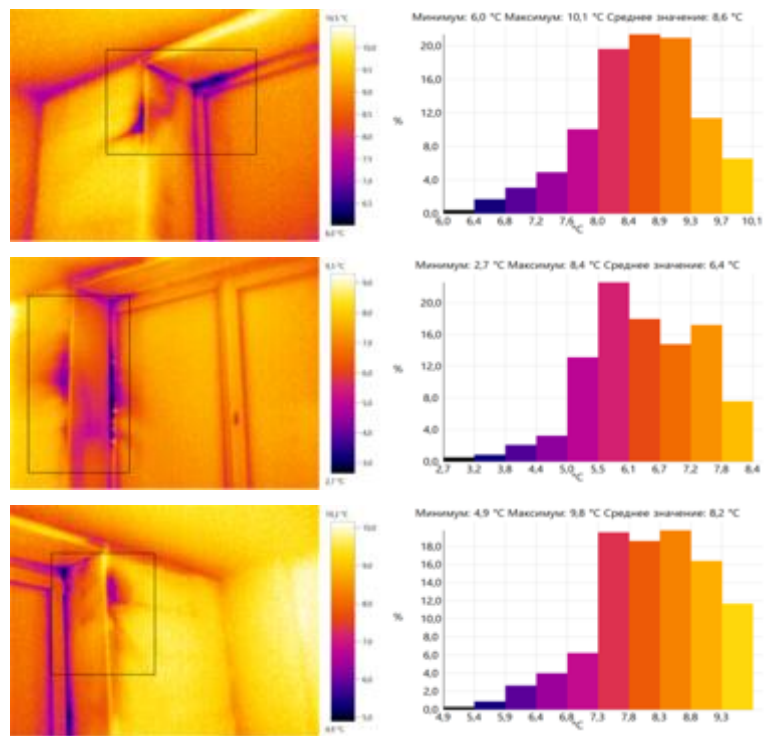


Рис. 2. – Термограмма дефектного участка (доступ наружного воздуха в зоне примыкания оконного блока)

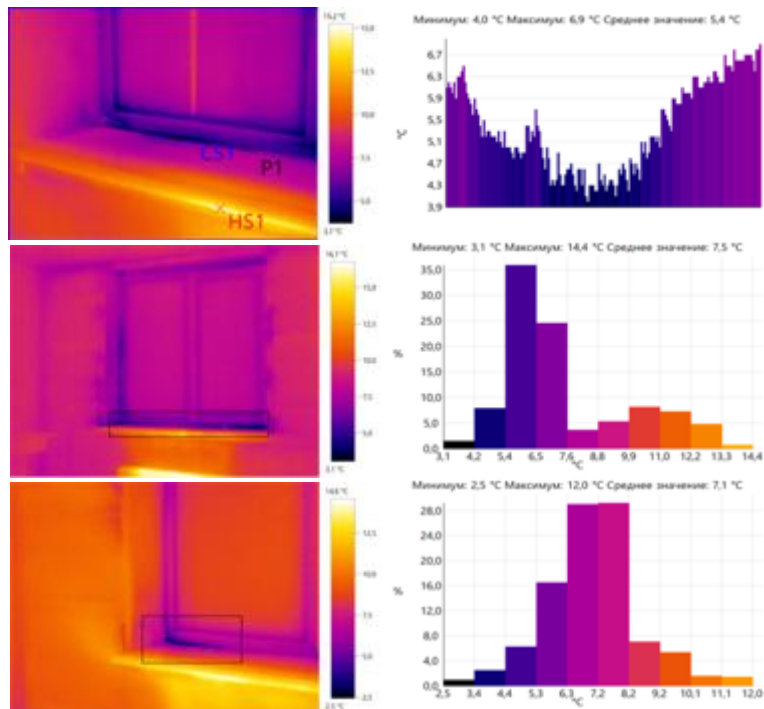


Рис. 3. – Термограмма дефектного участка (доступ наружного воздуха в зоне примыкания подоконника и оконного блока)

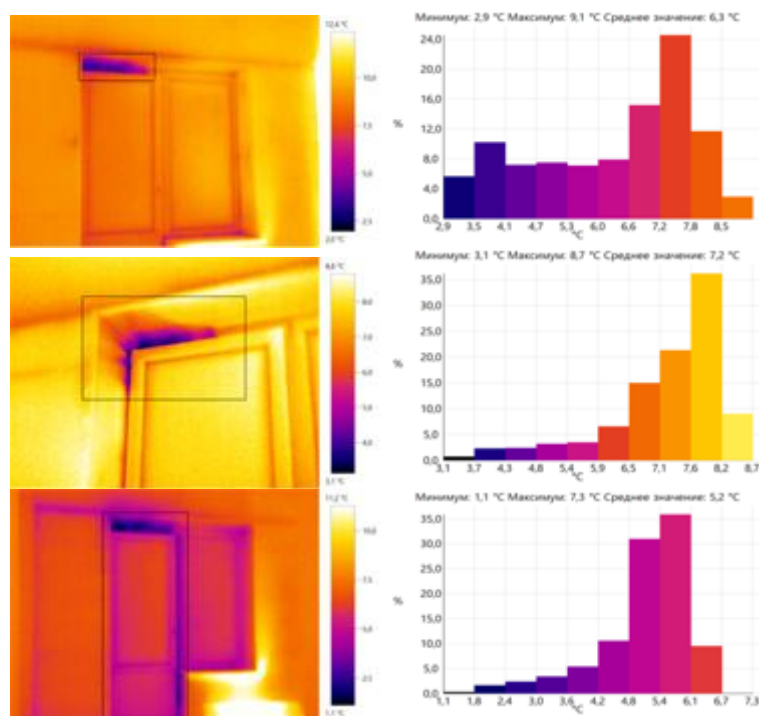


Рис. 4. – Термограмма дефектного участка (доступ наружного воздуха в зоне запирающих приборов и петель дверных и оконных блоков)

Определение коэффициентов теплотехнической однородности фрагментов наружных ограждающих конструкций в соответствии с СП 230.1325800.2015 выполнялось только для элементов, не имеющих дефектов, определяемых качественно по величине отклонения температуры от температур бездефектных областей в сопоставимых условиях исследования. Таким образом, после отбора участков наружных стен, имеющих плоские, линейные и точечные элементы, где не зафиксированы дефекты ограждающих конструкций, определены коэффициенты теплотехнической однородности по отношению:

$$r = R^{пр} / R_0^{усл}$$







где  $R^{пр}$  – приведенное термическое сопротивление фрагмента,

$R_0^{усл}$  – осредненное по площади значение условных термических сопротивлений всех частей фрагмента теплозащитной оболочки здания.

Так как, величины термических сопротивлений обратно пропорциональны теплотерям и прямо пропорциональны перепаду температур, следовательно при вычислении отношения термических сопротивлений определяющим могут быть значения температур, но принимаемое как отношение их разностей. Определение перепада температур на поверхностях конструкции не вызывает принципиальных затруднений, а механизм такого определения с помощью тепловизионной техники показан на рисунках. Результат анализа температур был принят в расчет сверхнормативной воздухопроницаемости наружных ограждающих конструкций.

После устранения дефектов наружных ограждающих конструкций и приведения их в нормативное состояние возможен дальнейший анализ количественных параметров воздухопроницаемости по стандартизованным методикам.

### Математическое моделирование процесса теплообмена

Температурный анализ двумерных тепловых полей выполнен в плоской линейной постановке среды ELCUT, используя уравнение теплопроводности с граничными и краевыми условиями. Особенностью расчета температур и тепловых потоков в таких задачах является наличие довольно большого числа фрагментов с очень различающимися свойствами. На рис. 5 показана схема элементов, составляющих наружную ограждающую конструкцию в месте сопряжения стены и оконного блока, включающая алюминиевую вставку   $\lambda=220$ , монтажную пену   $\lambda=0.05$ , пенополистирол   $\lambda=0.05$ , герметик   $\lambda=0.34$ , осушитель   $\lambda=0.3$ , оконный ПВХ профиль   $\lambda=0.17$ , воздушную

прослойку   $\lambda=0.104$ , стекло   $\lambda=0.76$ , уплотнительную ленту   $\lambda=0.2$  и другие материалы.

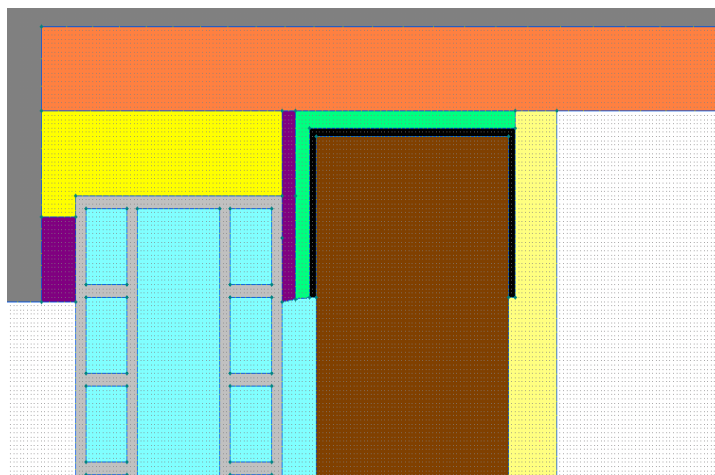


Рис. 5. – Схема расчетного узла

Решение такой задачи не вызывает принципиальных затруднений, однако требует внесения в модель достоверной информации не только о фактических геометрических характеристиках материалов, но и их свойствах.

Для представленных на рисунках 1 – 4 конструкций стен с оконными и дверными заполнениями выполнено моделирование температур и тепловых потоков для условий натурального эксперимента в бездефектном состоянии с перерасчетом для условий наиболее холодной пятидневки, как указано в СП 50.13330. На рис. 6-7 показаны результаты такого моделирования.

Моделирование дефектных областей при смене свойств или геометрических характеристик материалов также не представляет особых трудностей [15]. Так, например, отсутствие утеплителей (пенополистирольных вставок или уплотнителей и заполнителей монтажной пеной) приводит к появлению теплопроводных включений с возможностью выявления их также по величине температурного перепада. При этом расчет все равно выполняется по принципу отсутствия перемещения масс воздуха через конструкцию стены в зоне примыкания [16]. Также, при выполнении



расчета, пренебрегают и радиационной составляющей теплообмена из-за невысокой температуры исследуемых тел [17].

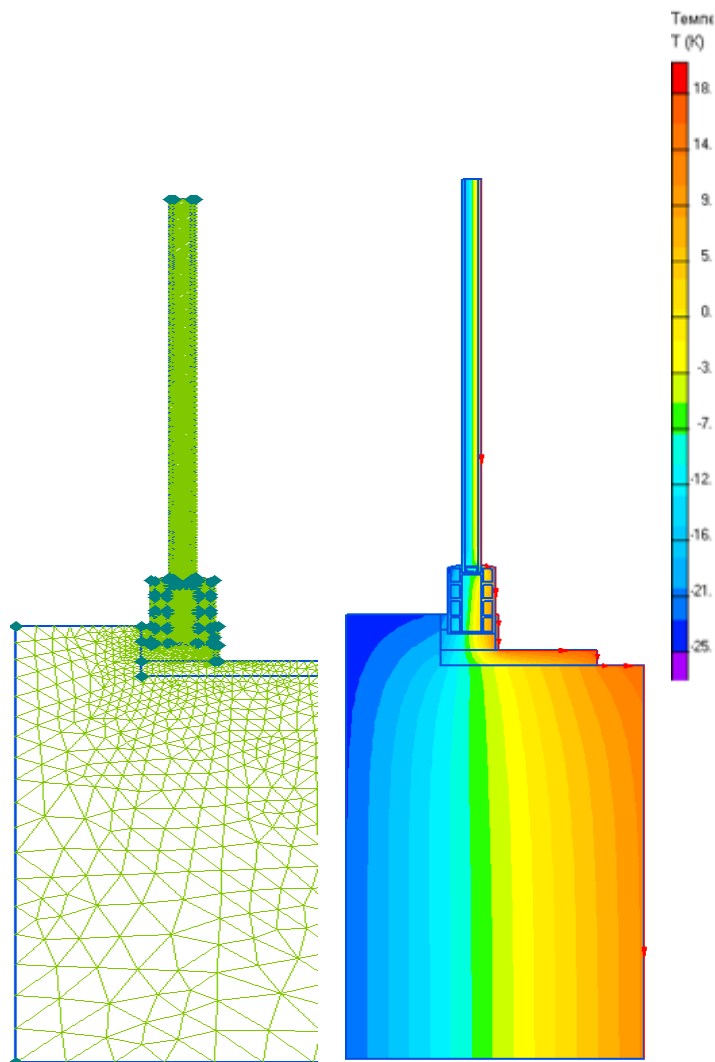


Рис. 6. – Расчет конструкции узла примыкания части оконного блока в бездефектном состоянии при проектном температурном перепаде и нормативной воздухопроницаемости

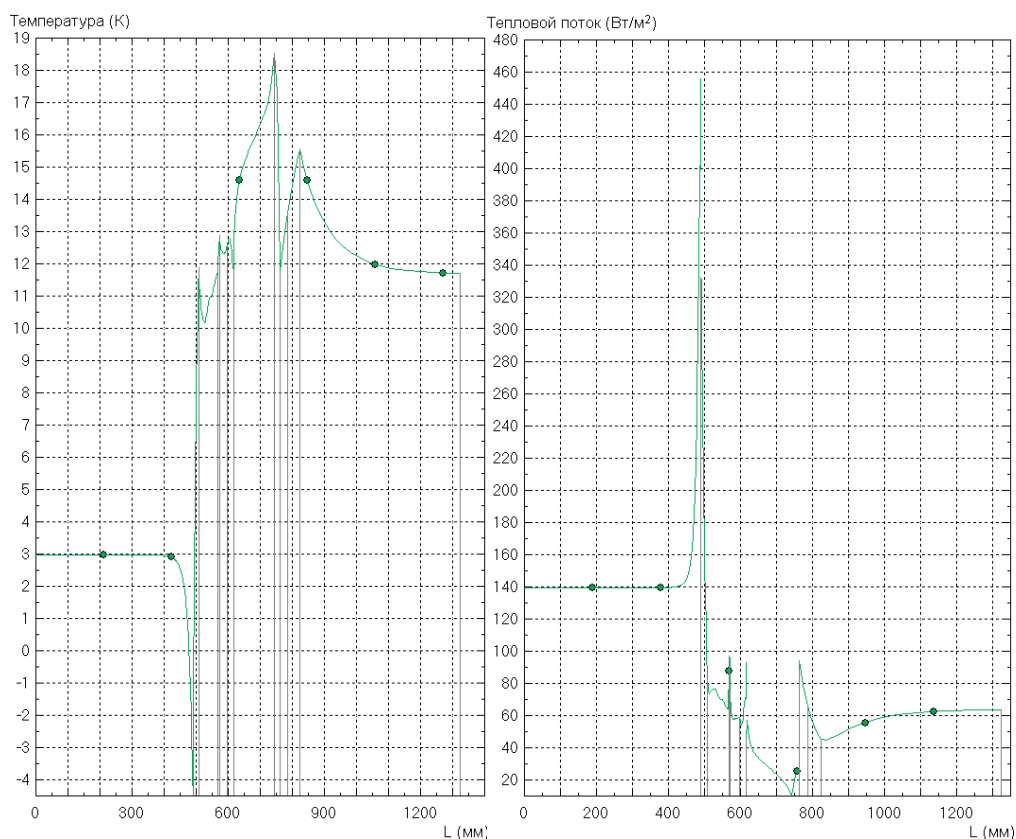


Рис. 7. – Температура и тепловой поток на внутренней поверхности узла примыкания части оконного блока в бездефектном состоянии при проектном температурном перепаде и нормативной воздухопроницаемости

### Литература

1. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. Москва: ООО "Спектр", 2011. – 155 с.
2. Фокин В.М., Ковылин А.В., Усадский Д.Г. Стеклопакеты и их теплофизические свойства: монография. Санкт-Петербург: Издательство «Научные технологии», 2017. – 130 с.
3. Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Самохвалов А.И. Ультразвуковой метод определения температуропроводности материалов // ИФЖ. 1976. Т. 30, № 6, с. 965-985.

4. Геращенко О.А., Гриценко Т.Г. Теплометрический метод определения комплекса теплофизических свойств вещества при гармоническом теплоточном воздействии // Теплофизика и теплотехника. Киев: Наукова думка, 1979. Вып. 36, с. 19-22.
  5. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. -М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
  6. Варганов И.С., Геращенко О.А. Тепловой метод неразрушающего контроля с помощью датчика теплового потока // Промышленная теплотехника. 1987. № 4, с. 77-80.
  7. Иванов В.В., Бойков А.Г., Кудрявцев Л.В. Определение тепловых свойств материалов используемых в системах теплоснабжения и строительства. Волгоград: ВолгГАСА, 1998. – 98 с.
  8. Дацюк Т.А., Гримитлин А.М. Влияние воздухопроницаемости ограждающих конструкций на энергопотребление жилых зданий // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6(65), с. 182-187. – DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-182-187.
  9. Штайнер В.Ю., Питык А.Н., Архипова Е.С., Колотиенко М.А. Энергосбережение в России: основные проблемы и перспективы // Инженерный вестник Дона. 2017, № 4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_222\\_steiner\\_pityk.pdf\\_1f1ac56d92.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_222_steiner_pityk.pdf_1f1ac56d92.pdf)
  10. Шеховцов А.В. Воздухопроницаемость оконного блока из ПВХ профилей при действии отрицательных температур // Вестник МГСУ. 2011. № 3-1, с. 263-269.
  11. Вытчиков Ю.С., Черенева А.В. Экспериментальное исследование воздухопроницаемости беспесчаного керамзитобетона // Строительные материалы. 2011. № 7, с. 10-11.
  12. Тихомиров С.А. Определение границ дефектных участков при проведении тепловизионных обследований наружных ограждающих
-

- конструкций зданий в условиях эксплуатации // Научное обозрение. 2012. № 6, с. 122-124.
13. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Математическое моделирование нестационарного влажностного режима ограждений с применением дискретно-континуального подхода // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 2, с. 244-256. – DOI 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256.
14. Денисихина Д.М., Иванова Ю.В., Мокров В.В. Численное моделирование истечения из современных воздухораспределительных устройств // Инженерный вестник Дона. 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_183\\_denisikhina\\_ivanova\\_mokrov.pdf\\_eb27152529.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_denisikhina_ivanova_mokrov.pdf_eb27152529.pdf)
15. Bondareva N.S., Sheremet M.A., Buonomo B., Manca O. Heat transfer performance of the finned nano-enhanced phase change material system under the inclination influence // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 135. P. 1063-1072. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.045.
16. Kozyrev S., Amosov P. Numerical modelling of blind excavation ventilation taking into account failure zone // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017 : Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 2017. Vol. 17. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2017. P. 591-598. – DOI 10.5593/sgem2017/13/S03.075.
17. Sparrow E.M., Lin S.H. Boundary layers with prescribed heat flux application to simultaneous convection and radiation // International J. Heat Mass Transfer. 1965, v.202, №1070. pp. 437 – 448.
-

## References

1. Fokin V.M., Kovylin A.V., Chernyshov V.N. E`nergoe`ffektivny`e metody` opredeleniya teplofizicheskix svojstv stroitel`ny`x materialov i izdelij. [Energy-efficient methods for determining the thermophysical properties of building materials and products]. ООО "Спектр", 2011. 155 p.
  2. Fokin V.M., Kovylin A.V., Usadskij D.G. Steklopakety` i ix teplofizicheskie svojstva. [Double-glazed windows and their thermophysical properties]. Sankt-Peterburg: Izdatel`stvo «Naukoemkie tehnologii», 2017. 130 p.
  3. Baranov V.M., Kudryavcev E.M., Samoxvalov A.I. IFZh. 1976. T. 30, № 6, pp. 965-985.
  4. Gerashhenko O.A., Gricenko T.G. Teplofizika i teplotexnika. Kiev: Naukova dumka, 1979. Vy`p. 36, pp. 19-22.
  5. Vavilov V.P. Teplovy`e metody` nerazrushayushhego kontrolya. [Thermal methods of non-destructive testing] Spravochnik. M.: Mashinostroenie. 1991. 240 p.
  6. Varganov I.S., Gerashhenko O.A. Promy`shlennaya teplotexnika. 1987. № 4, pp. 77-80.
  7. Ivanov V.V., Bojkov A.G., Kudryavcev L.V. Opredelenie teplovy`x svojstv materialov ispol`zuemy`x v sistemax teplosnabzheniya i stroitel`stva. [Determination of thermal properties of materials used in heat supply and construction systems]. 1998. 98 p.
  8. Daczyuk T.A., Grititlin A.M. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2017. № 6(65), p. 182-187. DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-182-187
  9. Shtajner V.Yu., Pityk A.N., Arxipova E.S., Kolotienko M.A. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2017, № 4. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_222\\_steiner\\_pityk.pdf\\_1f1ac56d92.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_222_steiner_pityk.pdf_1f1ac56d92.pdf)
  10. Shexovczov A.V. Vestnik MGSU. 2011. № 3-1. p. 263-269.
-



11. Vy`tchikov Yu.S., Chereneva A.V. Stroitel`ny`e materialy`. 2011. № 7, pp. 10-11.
12. Tixomirov S.A. Nauchnoe obozrenie. 2012. № 6, pp. 122-124.
13. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Vestnik MGSU. 2020. T. 15, № 2, p. 244-256. DOI 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256.
14. Denisixina D.M., Ivanova Yu.V., Mokrov V.V. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_183\\_denisikhina\\_ivanova\\_mokrov.pdf\\_eb27152529.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_183_denisikhina_ivanova_mokrov.pdf_eb27152529.pdf)
15. Bondareva N.S., Sheremet M.A., Buonomo B., Manca O. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 135. pp. 1063-1072. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.045.
16. Kozyrev S., Amosov P. 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017 : Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 2017. Vol. 17. pp. 591-598. DOI 10.5593/sgem2017/13/S03.075.
17. Sparrow E.M., Lin S.H. International J. Heat Mass Transfer. 1965, v.202, №1070. pp. 437 – 448.