

Matematičeskoe modelirovanie energopotrebleniya zdaniy: perspektivy razvitiya

Citation for published version (APA):

Hensen, J. L. M., Evers, J. E. J., & Khayrullina, A. (2014). Matematičeskoe modelirovanie energopotrebleniya zdaniy: perspektivy razvitiya. *Zdaniâ vysokih tehnologij*, 2014(spring), 58-65.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2014

Document Version:

Het geaccepteerde manuscript inclusief aanpassingen uit het peer-review proces

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЙ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

ЯН ХЕНСЕН, ЯННЕКЕ ВЕРКЕРК-ЭВЕРС, АДЕЛЯ ХАЙРУЛИНА

Большая доля спроса на энергию в Нидерландах приходится на архитектурно-строительную отрасль, где необходимы меры по снижению энергопотребления, связанного в первую очередь с коммунальными услугами. В то же время необходимо гарантировать здоровую и комфортную среду в помещениях.



Актуальные задачи архитектурно-строительной отрасли

В настоящее время в мировой практике проектирования энергоэффективных зданий следуют принципам Trias Energetica* [1]:

- уменьшение энергозатрат посредством снижения потерь энергии и применения мер по энергосбережению;
- применение возобновляемых источников (энергия ветра, солнца, воды и земли);
- эффективное использование энергии в тех случаях, когда возобновляемые источники недоступны.

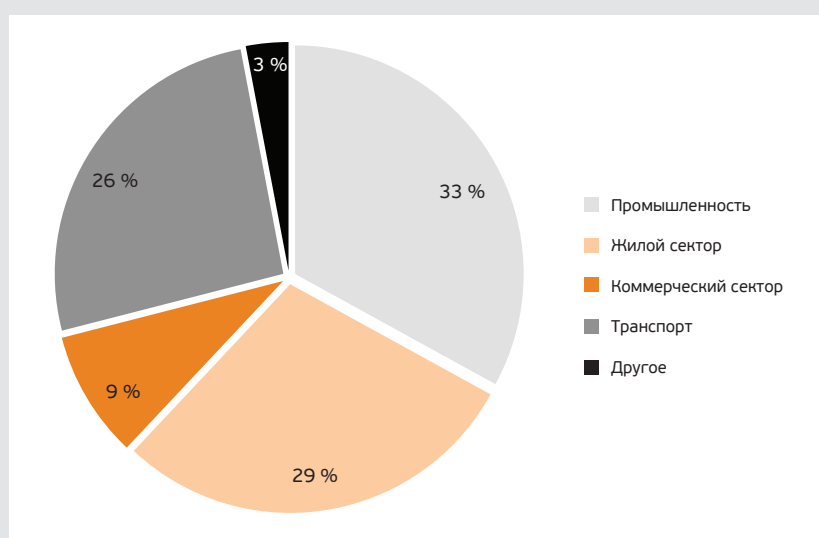
В дополнение необходимо стараться возместить ущерб, причиняемый окружающей среде. К примеру, посадить дерево.

В настоящее время снижение энергопотребления является одной из главных задач. Её можно достаточно просто решить, допустим, применением эффективной теплоизоляции. Однако, среда, в которой находится человек, должна обеспечивать условия, стимулирующие работу и отдых (в зависимости от назначения зданий).

Строительная инфраструктура отличается сложностью, что обусловлено с множеством различных типов зданий и сооружений, к которым предъявляются высокие требования к исполнению и эксплуатации. Можно выделить три основные задачи в области строительного проектирования:

- рассматривать комплексные инженерные системы зданий в расчётах;
- учитывать интересы общества и окружающей среды при расчёте эффективности затрат;

РИС. 1. МИРОВОЙ СПРОС НА ЭНЕРГИЮ ПО СЕКТОРАМ, (ДАННЫЕ IEA ЗА 2008 ГОД [2])



ОБ АВТОРАХ

Ян Хенсен – профессор Технического университета Эйндховена, Нидерланды, кафедра строительной физики и инженерного оборудования зданий. Профессор Чешского технического университета в Праге, кафедра моделирования эксплуатационных условий. Его исследовательская и преподавательская деятельность основана на моделировании зданий с целью оптимизации их дизайна и проектных решений, повышению энергоэффективности и улучшения эксплуатационных показателей в помещениях.

В 2013 году награждён званием почётного члена IBPSA. Хенсен – выдающийся член научных сообществ ASHRAE, REHVA; удостоен многочисленных научных и инженерных наград. Член редколлегии журналов Building and Environment, Energy and Buildings, International Journal of Low-Carbon Technologies, а также основатель и главный редактор Journal of Building Performance Simulation.

Яннеке Веркерк-Эверс – магистр Технического университета Эйндховена, Нидерланды, по направлению – строительная физика. В 2009 году являлась помощником главного инженера проекта с экспертизой в области строительной физики, акустики и пожаробезопасности в проектном бюро Nieman B. V.

С 2013 года продолжила профессиональную деятельность в архитектурно-проектном бюро Scheldebouw B. V. (Херлен, Нидерланды).

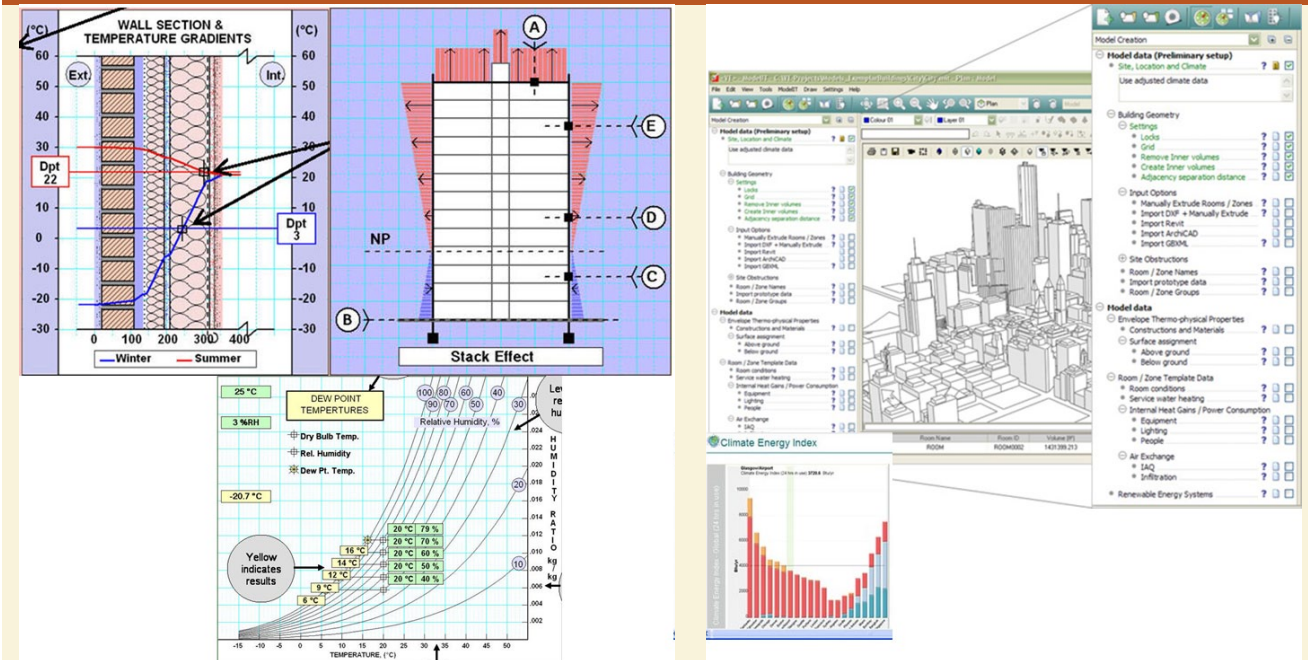
Аделя Хайрулина – магистр Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ, Башкортостан), инженер-строитель по специальности «Промышленное и гражданское строительство».

В 2012 году защитила магистерскую диссертацию о потенциале ветровой энергии на территории городской застройки с применением методов математического моделирования CFD. С октября 2012 года – студентка Технического университета Эйндховена, Нидерланды, строительной физики и инженерного оборудования зданий.

* Trias Energetica – принята за рубежом концепция экономии энергии, уменьшения зависимости от ископаемых видов топлива и сохранения окружающей среды, основанная на трёх простых правилах:

- сокращение энергопотребления за счёт устранения избыточного расхода энергии и реализации энергосберегающих мероприятий;
- использование возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра, солнца и т. д.;
- использование ископаемого топлива как можно более эффективно и только тогда, когда недоступны возобновляемые источники.

РИС. 2. ПРИМЕР РАСЧЁТА ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В КОНСТРУКЦИЯХ В ПРОГРАММЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ



Пример расчёта тепло- и влагопереноса в конструкциях

Температура в помещениях в зависимости от климатических условий

• осуществить междисциплинарное взаимодействие с целью применения инноваций из различных областей. Традиционные инженерные средства не пригодны для выполнения

таких задач в связи с их монодисциплинарностью, ограниченностью и ориентированностью на конкретные решения. Они предполагают статические граничные условия

(в большей части экстремальные), базирование на аналитических методах, предоставляющих точные решения для упрощённых моделей [3].

ТАБЛ. 1. ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Задача	Программный комплекс
Воздушный поток	Ansys Fluent, OpenFoam, Code Saturn, IES VE
Определение энергоэффективности здания, эксплуатационных параметров в помещениях	IES VE, Energy Plus, ESP-r, VABI Elements
Моделирование инженерного оборудования зданий	MatLAB Simulink, TRNSYS, IES VE, Energy Plus
Расчёт инсоляции	IES VE, Energy plus, Radiance
Подбор параметров искусственного и естественного освещения	Radiance, Dialux
Расчёт акустических характеристик	DIRAC, Ansys Fluent
Определение тепло- и влагопередачи, расчёт воздушных потоков, транспорта солей в материалах	Comsol, BSim, Delphin 5, HAMLab

Моделирование эксплуатационных характеристик и энергоэффективности зданий

Комплексное моделирование способно решить вышеприведённые задачи и рассчитывать эксплуатационные характеристики зданий в зависимости от климата, архитектурной концепции и требуемого микроклимата в помещении, а именно:

- теплообмен и влагоперенос в зданиях;
- дневной свет и искусственное освещение;
- эффективность вентиляции;
- шумоизоляционные характеристики;
- энергопотребление.

Важно также иметь инструменты для проектирования автоматизированных систем управления зданиями. Таким образом, возможно предварительно, на стадии проектирования, оценить и оптимизировать энергопотребление зданий с учётом качества воздуха в помещениях, теплового, визуального и акустического комфорта.

Существует множество программ для моделирования, функции которых частично совпадают. Примеры программ, применяемых при решении определённых задач, приведены в табл. 1.

Пример: климатические стратегии будущего*

В данном исследовании [4] использовался программный вычислительный комплекс VABI Elements, впервые разработанный в 1972 году в Нидерландах с участием инженерных, строительных, научных, правительственных организаций, а также технических университетов. Комплекс даёт возможность моделировать жилые, общественные и промышленные здания, и их системы (отопление, вентиляция и кондиционирование; системы с использованием возобновляемых источников энергии), а также проводить сертификацию зданий по энергостандартам. На основе 3D-модели здания, данных о его конструкции, применяемых инженерных системах, местонахождении объекта и климатических данных региона программный комплекс рассчитывает энергопотребление зданий при комфортных условиях в помещениях.

Применение климатических сценариев при проектировании зданий

Метеорологический институт королевства Нидерланды (KNMI) со-

ОФИСНОЕ ЗДАНИЕ LA TOUR В АПЕЛДОРНЕ (НИДЕРЛАНДЫ)



Источник: www.flexas.nl



План одного из этажей здания

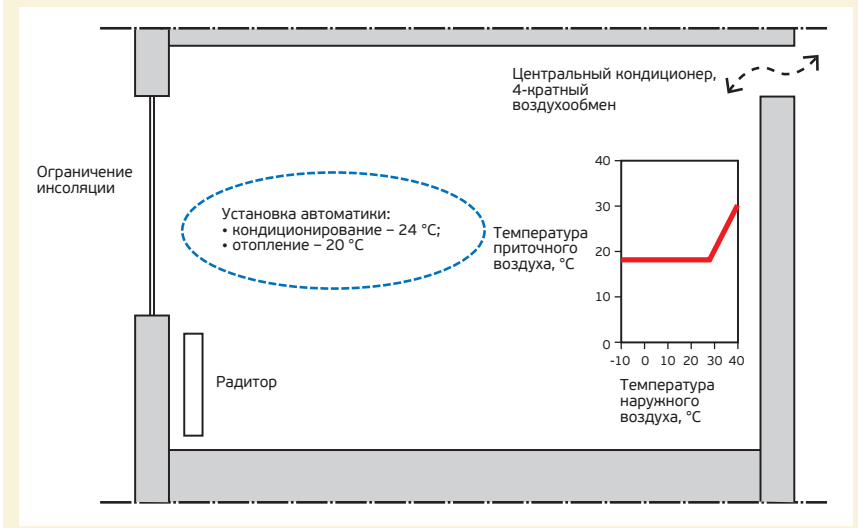
ставил сценарии изменения климата во всём мире. Сценарии для Нидерландов: повышение температуры на 1 °C (сценарий умеренного климата G) или 2 °C (сценарий тёплого климата W) в период с 1990 до 2050 года. Для каждого сценария возможны варианты с изменением и без изменения воздушного потока (дополнительный знак «+» в индексе). В результате изменения воздушного потока зима становится мягче и характеризу-

ется повышением влажности воздуха, а летний период – теплее и суше. На данный момент невозможно с точностью определить, какой из сценариев наиболее вероятен. В данном примере рассмотрены все возможные варианты.

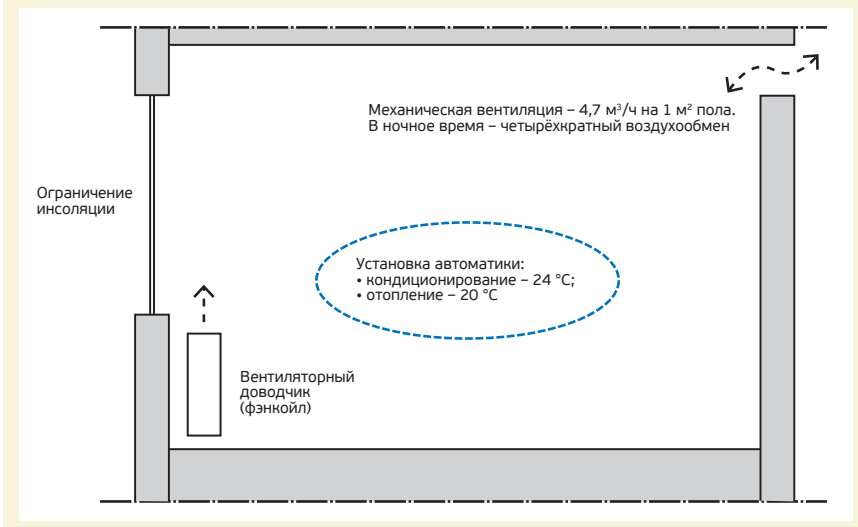
В результате сотрудничества Технического университета Эйндховена с Vabi Software климатические сценарии применены к справочным данным о климате NEN 5060:2008 «Eigenschappen Van Gebouwen –

* На основе магистерской диссертации Я. Веркерк-Эверс (Технический университет Эйндховена (TU/e), Нидерланды, 2010).

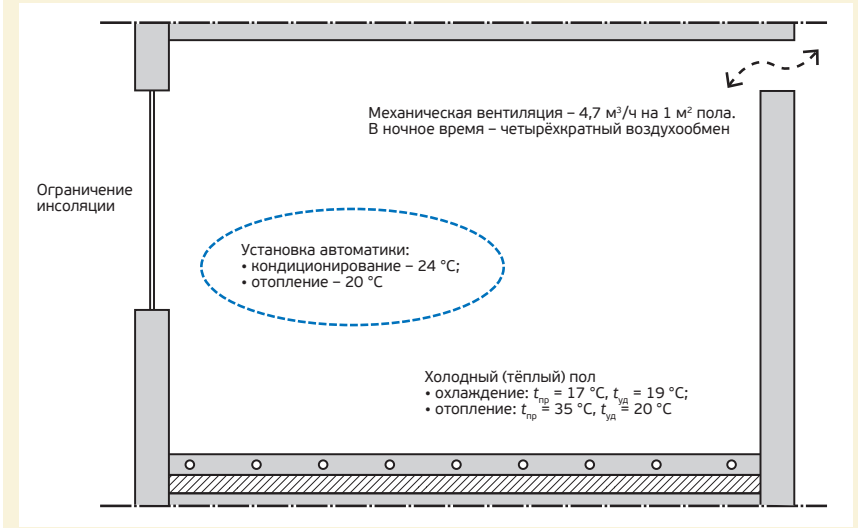
РИС. 3. МЕТОДЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ



Центральный кондиционер



Вентиляторный доводчик



Холодный пол

Referentieklimaatgegevens», которые разработаны на основе данных статистики за 1986–2005 годы. В результате получены 6 климатических сценариев: один – за прошедший период (на основе климатических показателей 1960-х годов); другой – в настоящее время (на основе данных NEN 5060:2008), четыре сценария – спустя 30 лет (что соответствует срокам службы инженерного оборудования в зданиях).

Оценка климатических сценариев для здания La Tour

Для анализа изменений эксплуатационных характеристик в зависимости от сценария был выбран один из промежуточных этажей офисного здания La Tour в Апелдорне (Нидерланды). Высота этажа – 3,4 м, размеры в плане – 23,8 × 38,2 м. Для упрощения модели входы в помещения не учитывались. Структурное ядро здания и несущие стены состоят из железобетона (200 мм) и теплоизоляции (минеральная вата) (100 мм), 20% поверхности фасада выполнено из стекла с низким фактором проникновения солнечной радиации внутрь помещений проникает 30% солнечной теплоты. Максимально допустимая температура в помещениях – 24 °C.

Для офисных зданий в Нидерландах характерен расход большей части энергии на охлаждение воздуха. В данном примере сравнивались три метода кондиционирования воздуха в помещениях (рис. 3):

Для офисных зданий в Нидерландах характерен расход большей части энергии на охлаждение воздуха:

- «пиковое» охлаждение, при котором приточный воздух, подаваемый центральным кондиционером, имеет температуру ниже наружной на 2 °C (разница в температуре не превышает 10 °C). В данном случае воздух поступает при температуре 18 °C (при температуре наружного воздуха 24 °C). При

достижении температуры наружного воздуха 28 °С температура повышается. Следует отметить, что при применении этой стратегии влажность воздуха не регулируется, центральный кондиционер работает только как охлаждающий агент, что уменьшает возможности (мощность) охлаждения;

- охлаждение посредством вентиляторного доводчика с четырёхтрубной системой (фэнкойл) – традиционный способ кондиционирования в офисах. По теплообменнику внутри доводчика проходит охлаждённая жидкость (6 °С), которая понижает температуру воздуха, циркулирующего через доводчик;
- охлаждение с помощью трубной системы, интегрированной в пол (холодный пол). Во встроенных в пол трубках циркулирует вода, охлаждённая до 17 °С.

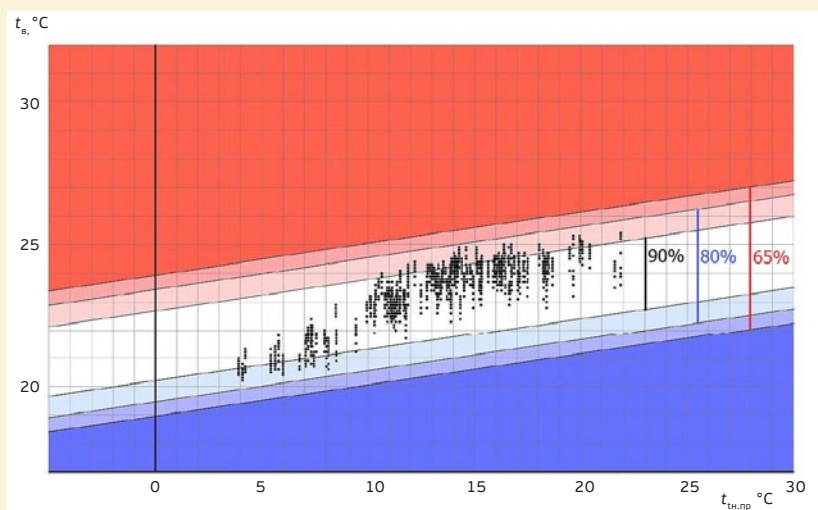
Эксплуатационные характеристики помещений при применении вышеприведенных концепций были спрогнозированы с помощью программного комплекса VABI (версия VA114). Для сравнительной оценки климатических сценариев выбран показатель температурного комфорта. Мощность системы кондиционирования воздуха и ее нагрузки рассчитаны для обеспечения удовлетворительных показателей микроклимата в помещениях.

Результаты

Данное исследование преследовало две цели:

- оценить энергоэффективность и температурный комфорт трёх систем кондиционирования воздуха (рис. 3) для различных сценариев в течение летнего периода (с 1 апреля по 31 октября);
- определить важность использования актуальных климатических данных при оценке энергопотребления и теплового комфорта в офисном здании в тёплый период.

РИС. 4. ПРИМЕР ВЫВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ VABI



Распределение температур воздуха в помещении $t_v, ^\circ\text{C}$, в зависимости от приведенной температуры наружного воздуха $t_{н.пр}, ^\circ\text{C}$, для периода с 1 апреля по 31 октября. Цветовые зоны показывают границы обеспечения комфорта для 65, 80 и 90 % от всего числа пользователей. Тип здания «бета» (вентиляция), класс микроклимата. В (условия комфорта удовлетворены для 80 % пользователей за всё время эксплуатации)

$$T_{н.пр} = \frac{T_{\text{сегодня}} + 0,8 \cdot T_{\text{вчера}} + 0,4 \cdot T_{2 \text{ дня назад}} + 0,2 \cdot T_{3 \text{ дня назад}}}{2,4}$$

СООБЩЕСТВО IBPSA (INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION)

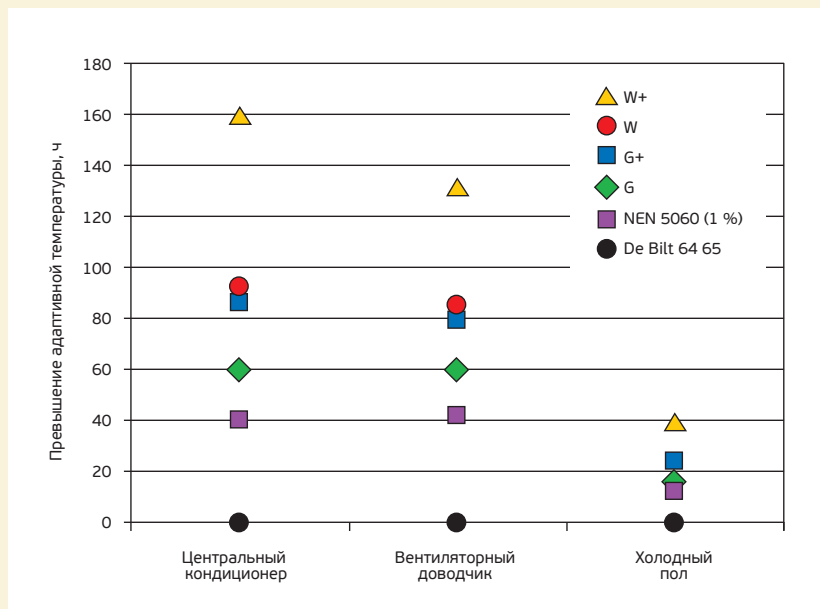
IBPSA – некоммерческое сообщество научных сотрудников в области моделирования зданий, разработчиков и инженеров, основанное в 1986 году. Миссия IBPSA – способствовать научным исследованиям и практическому применению моделирования зданий и сооружений в целях улучшения архитектуры, проектных решений, строительства, функционирования и техобслуживания новых и существующих зданий во всём мире.

IBPSA рассматривает вопросы в области строительной физики (тепло- и влагопередача, распределение воздушных потоков, искусственного и естественного освещения, акустика, распространение дыма); систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха; систем энергоснабжения (в том числе с возобновляемыми источниками энергии и хранилищами тепловой энергии, системы централизованного отопления и кондиционирования воздуха, комбинированного отопления и энергоснабжения); из-

учает человеческий фактор (в том числе здоровье, производительность, тепловой, визуальный и акустический комфорт, качество воздуха в помещениях) и его влияние на энергозатраты; занимается новыми разработками в области моделирования и расчётов. В настоящее время IBPSA насчитывает 28 филиалов в мире, которые административно и финансово независимы. IBPSA выпускает международный научный журнал Journal of Building Performance Simulation, книги о строительстве, об эксплуатации и управлении зданиями, а также информационный бюллетень о предстоящих конференциях. Международная конференция IBPSA проходит один раз в два года и является значительным событием в области моделирования энергоэффективных зданий. Доклады затрагивают темы энергии, передачи теплоты и влаги в зданиях, освещения и воздушных потоков в помещениях.

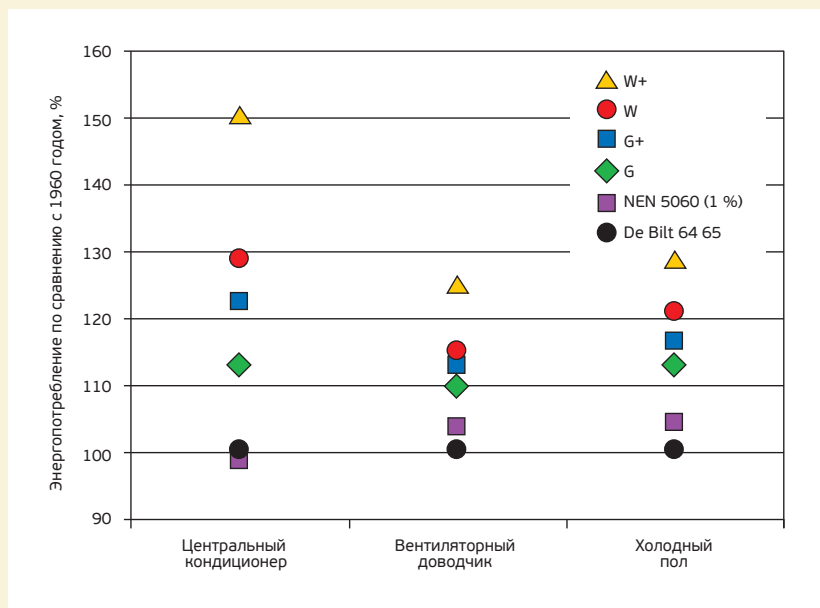
www.ibpsa.org

РИС. 5. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА (ПРЕВЫШЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, Ч, ДЛЯ КЛАССА МИКРОКЛИМАТА В ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ ЧЕРЕЗ 30 ЛЕТ)



Примечание. Значения NEN 5060 приведены для 2008 года, значения De Bilt – для 1960-х годов.

РИС. 6. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА: (ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ НА КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ)



Примечание. В целях сравнения в качестве 100 % принято энергопотребление при климатической концепции 1960-х годов, КПД и энергопотери не учитываются.

Температурный комфорт оценивается на основе показателя превышения адаптивной температуры. Первые стандарты по тепловому комфорту в Нидерландах были разработаны в 1970-х годах на основе работы П. О. Фангера [5]. По данным лабораторных исследований он установил следующие температурные лимиты (стандарты): превышение температуры в 25 °С в течение не более 100 раб. ч в год, превышение температуры в 28 °С – не более 20 раб. ч в год.

Спустя некоторое время было отмечено, что тепловой дискомфорт наиболее характерен для зданий с низкой тепловой массой (из лёгких конструкций). Для этого был введён показатель взвешенных градусо-часов, который учитывает не только количество часов превышенной температуры воздуха в помещении, но и величину этого превышения. Критерием комфортного микроклимата является показатель в 150 °С•ч.

На основе работы [6] установлен новый критерий комфорта – адаптивная температура. Данный параметр учитывает психологический фактор в поведении человека, к примеру – открытие окон, снятие одежды. Более того, учитывается факт, что в течение продолжительного периода с повышенной температурой наружного воздуха человек приспосабливается к более высокой температуре в помещении (рис. 4).

Классы микроклимата А, В, С удовлетворяют общепринятым условиям комфорта соответственно 90, 80, 65 % от всех пользователей в течение всего срока эксплуатации. Класс В используется для нового строительства. Это означает, что условия комфорта удовлетворяют 80 % пользователей здания за время эксплуатации. Критерии комфорта различны для зданий с естественной вентиляцией и возможностью открыть окна

ТАБЛ. 2. ОЦЕНКА МЕТОДОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Метод кондиционирования воздуха	Преимущества	Недостатки
Охлаждение центральным кондиционером	–	Тепловой дискомфорт, высокое энергопотребление
Охлаждение вентиляторным доводчиком с четырёхтрубной системой	Легко приспособить к изменениям в климате	Высокое энергопотребление
Охлаждение холодным полом	Наиболее стабильный тепловой комфорт	Риск выпадения конденсата при низких температурах охлаждающего агента в трубах, значительная тепловая инерция

(«альфа») и с механической вентиляцией («бета»). Таким образом учитывается человеческий фактор. В данном исследовании здание имеет тип «бета» и класс микроклимата В.

Результаты превышения адаптивной температуры (в часах) и энергопотребления (в процентах от показательного года) для трёх методов кондиционирования и шести климатических сценариев приведены на рис. 5 и 6. При сравнительной оценке имеет значение разброс результатов для определённого метода кондиционирования в зависимости от климатического сценария. Так, небольшой разброс в результатах говорит о стабильности микроклимата в здании.

Для данного примера холодный пол является наиболее стабильной системой в плане обеспечения теплового комфорта в помещениях. Центральный кондиционер – это наименее стабильный вариант по результатам оценки превышения адаптивной температуры и энергопотребления. Это связано с ограничением скорости и минимальной температуры подаваемого воздуха (во избежание сквозняков и дискомфорта). Вентиляторный доводчик легко адаптируется к перепадам температуры с помощью дополнительных модулей, что, однако, негативно сказывается на энергопотреблении. Холодный пол является наиболее стабильной системой, что

очень кстати в плане обеспечения теплового комфорта, т. к. возможность изменить мощность системы ограничена в связи с её расположением в конструкции пола здания. Температуру жидкости также желательно понижать в связи с риском выпадения конденсата и неравномерного распределения воздуха в помещении.

Выводы

Результаты показывают, что при проектировании зданий необходимо учитывать возможные изменения климатических показателей (можно сравнить результаты, полученные на основе De Bilt и NEN 5060:2008). Нельзя с точностью предсказать климатическую обстановку через 30–50 лет, но можно применять инженерные решения, обладающие стабильностью и гибкостью (оптимизацией в процессе эксплуатации). В данном случае система холодного пола гарантирует стабильность теплового комфорта в офисных помещениях в тёплое время и обладает невысоким энергопотреблением.

Пример иллюстрирует возможности программных комплексов для моделирования зданий: оценку энергопотребления и эксплуатационных показателей, которую можно произвести как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации и реконструкции зданий.

Литература

1. Infoblad: Trias Energetica en energieneutraal bouwen/Agentschap NL. 2013.
2. Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency: Key Insights from IEA Indicator Analysis/IEA. 2008.
3. Hensen J., Lamberts R. Introduction to Building Performance Simulation // Building Performance Simulation for Design and Operation. New York: Spon Press, 2011.
4. Klimatiseringsconcepten voor de toekomst / J. E. J. Verkerk-Evers // TVVL magazine. 2010. № 7 / 8.
5. Fanger P. O. Thermal Comfort Analyses and Applications in Environmental Engineering. London; New York: McGraw-Hill, 1970.
6. Dear R. J. de, Brager G. S. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: revisions to ASHRAE Standard 55 // Energy and Buildings. 2002. 34 (6).
7. Adaptive Temperature Limits: A New Guideline in The Netherlands. A New Approach for the Assessment of Building Performance with Respect to Thermal Indoor Climate / A. C. Linden A. C. et al. // Energy and Buildings. 2006. Vol. 38.
8. Banks J., Gibson R. R. Don't Simulate When... 10 Rules for Determining when Simulation is Not Appropriate // IIE Solutions. 1997. Sept.
9. Thermische Behaaglijkheid – Eisen Voor De Binnentemperatuur In Gebouwen: ISSO Publicatie 74/ISSO. 2004. ●