**Уго Хэнс**

**ФИЗИКА ЗДАНИЯ**

**Тепло, воздух и влага**

**ВВЕДЕНИЕ**

**Физика здания**

**Определение**

Физика зданий – это прикладная наука, изучающая тепловлажностные, акустические и световые свойства, а также эксплуатационные характеристики материалов, конструкций (кровли, фасады, окна, перегородки и т.д.), помещений, зданий в целом и окружающей среды. На уровне целого здания рассматриваются такие вопросы, как качество внутренней среды и энергоэффективность, а на уровне городской среды физика зданий переходит в «городскую физику». Основные аспекты включают требования пользователей к тепловому, акустическому и визуальному комфорту, а также санитарные нормы и ограничения, накладываемые архитектурными, экономическими и экологическими решениями.

Термин «прикладная» указывает на то, что физика зданий направлена на решение конкретных задач: теория используется как инструмент, а не как самоцель. Здесь можно выделить три основных направления. Первое, тепловлажностное, изучает перенос тепла, воздуха и влаги в материалах, конструкциях и зданиях в целом, а также взаимодействие здания с внешней средой. Специфические темы включают: тепловую изоляцию и тепловую инерцию; температурные и влажностные деформации, напряжения и напряженно-деформированные состояния; стойкость к влаге (дождь, подъем влаги, сорбция/десорбция, поверхностная и межслойная конденсация); транспорт солей; герметичность и устойчивость к ветру; чистую и конечную потребность в энергии; вентиляцию; качество внутренней среды; комфорт при воздействии ветра и т.д. Второе направление, акустика зданий, изучает проблемы шума внутри зданий, между зданиями и окружающей средой. Основные темы включают воздушный и ударный шум, передаваемый через стены, перекрытия, наружные стены, перегородки, окна и крыши, акустику помещений, снижение шумов от инженерных систем и внешней среды. Наконец, третье направление, освещение, рассматривает вопросы естественного и искусственного освещения и их влияние на благополучие человека и первичное энергопотребление.

**Критерии**

Физика зданий охватывает широкий спектр критериев: с одной стороны, это требования, связанные с комфортом, здоровьем и благополучием человека, а с другой стороны — ограничения, вызванные архитектурой, использованием материалов, экономикой и требованиями устойчивого развития.

**Комфорт**

Комфорт определяется как субъективное восприятие удовлетворенности окружающей средой. Достижение такого состояния зависит от множества факторов, как окружающей среды, так и человеческих. Под тепловым, акустическим и визуальным комфортом понимаются качества, которые человек неосознанно требует от своей среды, чтобы чувствовать себя тепло, акустически и визуально комфортно при выполнении той или иной деятельности (не слишком холодно, не слишком жарко, не слишком шумно, без резких контрастов в яркости и т.д.).

Тепловой комфорт связан с физиологией и психологией человека. Как экзотермическое существо, человек должен поддерживать постоянную температуру тела около 37 °C (310 K) и иметь возможность выделять тепло в окружающую среду при любых обстоятельствах, используя такие механизмы, как теплопроводность, конвекция, излучение, потоотделение и дыхание. Температура воздуха, градиенты температуры, радиационная температура, асимметрия излучения, контактные температуры, относительная скорость воздуха, турбулентность воздуха и относительная влажность в непосредственной среде определяют тепловой обмен через перечисленные механизмы. При определённой активности и одежде человек испытывает комфорт при определённых сочетаниях этих параметров окружающей среды, а при других — нет, хотя возможность адаптировать окружающую среду под свои предпочтения влияет на степень удовлетворенности.

Акустический комфорт тесно связан с нашим умственным восприятием. Физически молодые взрослые воспринимают звуковые частоты в диапазоне от 20 до 16 000 Гц. Интенсивность звука воспринимается логарифмически, при этом слух более чувствителен к высоким частотам, чем к низким. Соответственно, акустика работает с логарифмическими шкалами и единицами: децибелами (дБ), где 0 дБ — это порог слышимости, а 140 дБ — порог боли. Мы легко раздражаемся нежелательными шумами, такими как звуки от соседей, транспорта, промышленности и самолетов.

Визуальный комфорт сочетает психические и физические факторы. Физически глаз чувствителен к электромагнитным волнам с длинами от 0,38 до 0,78 мкм. Максимальная чувствительность находится около длины волны 0,58 мкм, что соответствует желто-зеленому свету. Кроме того, чувствительность глаза адаптируется к средней яркости. Например, в темноте чувствительность глаза возрастает в 10 000 раз по сравнению с дневным временем. Как и ухо, глаз реагирует логарифмически. Слишком большие различия в яркости раздражают. Психологически освещение помогает создавать атмосферу.

**Здоровье**

Здоровье — это не только отсутствие болезней, но также отсутствие нейровегетативных жалоб, психологического стресса и физического дискомфорта. Благополучие человека может быть нарушено из-за пыли, волокон, ЛОС (летучих органических соединений), радона, CO (угарного газа), вирусов и бактерий в воздухе, плесени и клещей на поверхностях, а также избыточного шума в непосредственной среде, локального термического дискомфорта и других факторов.

**Архитектура и материалы**

Физика зданий должна работать в рамках архитектурных требований. Форма полов, фасадов и крыш, эстетика и выбор материалов — все это элементы, формирующие здание, и их проектирование базируется, среди прочего, на эксплуатационных требованиях, которые предъявляет физика зданий. Противоречивые структурные и физические требования могут усложнять решения. Например, необходимые тепловые разрывы могут противоречить требованиям по прочности и жесткости соединений. Водонепроницаемость и паропроницаемость не всегда совместимы. Акустическое поглощение противоречит паронепроницаемости. Некоторые материалы не могут долго оставаться во влажном состоянии и т.д.

**Экономические факторы**

Необходимо не только уложиться в бюджетные рамки при строительстве, но и минимизировать общие жизненные циклические затраты на здание. В этом контексте играют роль энергопотребление, техническое обслуживание, необходимые обновления и ожидаемый срок службы здания. Здание, спроектированное и построенное с учетом принципов физики зданий, может иметь значительно меньшие затраты на жизненный цикл по сравнению с теми зданиями, которые строились без должного внимания к их целесообразности.

**Устойчивое развитие**

Общественная обеспокоенность местным, национальным и глобальным воздействием на окружающую среду значительно возросла за последние десятилетия. На местном уровне эксплуатация зданий приводит к образованию твердых, жидких и газообразных отходов. На глобальном уровне строительство и эксплуатация зданий составляют 35–40% от общего ежегодного потребления первичной энергии. Значительная часть этой энергии связана с ископаемым топливом, что означает, что выбросы CO2 в зданиях оцениваются на уровне 35-40%. По объему CO2 является наиболее значимым из газов, ответственных за глобальное потепление.

Стремление к большей устойчивости отражается в растущем значении анализа жизненного цикла и сертификационных систем, таких как LEED, BREEAM и других. В рамках анализа жизненного цикла здания оценивают с точки зрения их воздействия на окружающую среду на всех этапах — от А до Я, т.е. от производства материалов и строительства до эксплуатации и сноса с возможностью повторного использования. На каждом этапе учитываются все потоки материалов, энергии и воды, а также все загрязняющие твердые, жидкие и газообразные выбросы, и оценивается их воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Программы сертификации, в свою очередь, сосредоточены на общей пригодности зданий и городской среды для их использования.

**Важность физики зданий**

Необходимость создания комфортной внутренней среды, которая защищает человека от капризов внешнего климата, определяет роль физики зданий. Следовательно, разделение между внутренним и внешним пространством, то есть оболочка здания (полы, внешние стены, крыши), подвергается воздействию различных климатических нагрузок и климатических различий (солнце, дождь, ветер, внешний шум; разницы температур, парциального давления водяного пара и давления воздуха). Правильное проектирование оболочки здания и корректная детализация должны учитывать эти нагрузки, смягчать их, где это возможно, или использовать их, если это применимо, чтобы обеспечить желаемый комфорт и благополучие с минимальным использованием технических средств и при минимальном энергопотреблении.

Ранее опыт был главным ориентиром. Строители прошлых поколений полагались на ограниченный набор материалов (дерево, солома, глина, природный камень, свинец, медь и чугун, выдувное стекло), а знания о том, как использовать эти материалы, накапливались на протяжении веков. Они использовали стандартные детали для крыш, краев крыш и внешних стен. Начиная с размеров и ориентации окон до общей планировки, здания строились так, чтобы ограничить нагрев зимой и предотвратить перегрев летом. Поскольку источники шума были редки, шумовые раздражители за пределами городов были практически неизвестны, а наши предки экономили энергию (дрова) благодаря образу жизни, адаптированному к сезонам.

Новая эра началась с промышленной революции XIX века. На рынок хлынули новые материалы: сталь, железобетон и предварительно напряженный бетон, цветные металлы, синтетические материалы, битум, теплоизоляционные материалы и т.д. Более продвинутые технологии открыли новые возможности для существующих материалов: литое и флоат-стекло, прокатные изделия из металла, прессованный кирпич и др. Лучшая осведомленность о строительной механике позволила строить конструкции любой формы и пролета. Энергия стала дешевой: сначала уголь, затем нефть и, наконец, природный газ. Строительство взлетело и превратилось в рынок спроса и предложения. Это привело к массовому строительству с минимальным качеством, а в начале XX века появилось «модернистское направление» архитекторов, которые экспериментировали с альтернативными конструктивными решениями и новыми материалами. Эти эксперименты никак не учитывали накопленные знания. Архитекторы проектировали здания без учета энергопотребления, комфорта или понимания физических свойств новых внешних стен и крыш, которые они предлагали. Характерным примером было широкое использование стали, бетона и стекла — материалов, которые сложны с точки зрения тепловлажностных характеристик. Результатом стали серьёзные повреждения и преждевременные реставрации, которых можно было бы избежать, обладая лучшими знаниями о физике зданий. На рисунке 1 показан пример такого здания: дом Гийетта, спроектированный Ле Корбюзье, построенный в 1926 году и перестроенный в конце 1980-х годов с улучшенной теплоизоляцией.



Рисунок 1Дом Гийетта по проекту Ле Корбузье после реставрации

До этого потребление энергии на отопление могло достигать 20 000 литров топлива в год, если бы все комнаты отапливались до комфортной температуры. К счастью, жители адаптировались, обогревая только комнаты, используемые в дневное время.

Физика зданий необходима для создания качественных зданий, соответствующих их назначению. Эта область должна заменить трудоемкое обучение на опыте, которое не успевает за быстрым развитием технологий и изменениями в архитектурных тенденциях.

**История физики зданий**

Физика зданий возникла на пересечении трёх прикладных дисциплин: прикладной физики, инженерных систем зданий и строительства.

**Тепло, воздух и влага**

В первой половине XX века основное внимание уделялось теплопроводности. В 1930-х годах важность приобрело измерение сопротивления диффузии после того, как Тисдейл из Лаборатории лесных продуктов США опубликовал в 1937 году исследование под названием «Конденсация в стенах и чердаках». В 1952 году появилась статья Й. С. Каммерера «Расчет диффузии водяного пара в стенах» в журнале «Der Gesundheitsingenieur». В конце 1950-х годов Х. Глазер описал новый метод расчета межслойной конденсации из-за диффузии пара в стенах холодильных камер в том же журнале. Другие исследователи, среди которых К. Зейферт, применили этот метод к строительным конструкциям, хотя они использовали крайне нереалистичные климатические условия. Его книга «Wasserdampfdiffusion im Bauwesen» (Диффузия водяного пара в строительстве) привела к тому, что сегодня называют «фобией пароизоляции», и текст упустил самый важный фактор межслойной конденсации — перемещение воздуха внутри и через строительные конструкции. Начиная с 1960-х годов, всё больше исследователей занимались комбинированным переносом тепла и влаги, среди них О. Кришер, Й. С. Каммерер и Х. Кюнцель в Германии, А. Де Врис и Б. Х. Вос в Нидерландах, Л. Е. Невандер в Швеции и А. Твейт в Норвегии.

Тот факт, что транспорт воздуха является основной причиной межслойной конденсации, впервые был установлен в Канаде, где доминирует каркасное строительство. В своей публикации 1961 года А. Г. Уилсон из NRC написал: «Один из важнейших аспектов утечек воздуха в отношении эффективности канадских зданий — это степень, в которой они ответственны за серьёзные проблемы с конденсацией. К сожалению, это во многом не осознается при проектировании и строительстве многих зданий, и даже при возникновении проблем источник влаги часто неверно идентифицируется».

**Акустика зданий**

В начале XX века физики начали проявлять интерес к применению методов контроля шума в строительстве. В 1912 году Бергер защитил докторскую диссертацию в Техническом университете Мюнхена на тему «О звукопроницаемости». Сабин опубликовал свою известную формулу времени реверберации в закрытых помещениях в 1920 году. В последующие годы акустика помещений стала популярной темой, изучались разборчивость речи, оптимальные времена реверберации, время реверберации в безэховых комнатах и другие вопросы. Десять лет спустя Л. Кремер сделал прорыв в теории звукоизоляции. В своей статье «Теория звукоизоляции тонких стен при косом падении» он установил, что совпадение фаз между звуковыми волнами в воздухе и изгибающимися волнами на стене играет важную роль. Позже он детально изучил ударный шум и предложил решение в виде «плавающих» полов. Другие немецкие инженеры, такие как К. Гёзеле и М. Хекль, установили связь между акустикой зданий и строительной практикой. В США Беранек опубликовал свою книгу «Контроль шума и вибрации» в 1970 году, которая стала стандартным руководством для инженеров, занимающихся решением проблем шума.

**Освещение**

Применение освещения в зданиях и гражданских сооружениях началось позже. В 1931 году в Университете Штутгарта было завершено исследование под названием «Влияние солнечной радиации на расположение и ширину жилых улиц». Позже физики использовали теорию излучения для расчета освещенности поверхностей и контрастов яркости в окружающей среде. В конце 1960-х годов был введен коэффициент дневного света как величина для оценки естественного освещения внутри помещений. В последние годы, после энергетического кризиса 1970-х годов, возросла важность связи между искусственным освещением и первичным энергопотреблением как темы для изучения.

**Тепловой комфорт и качество воздуха в помещениях**

В XIX веке инженеры уделяли особое внимание жилищной и городской гигиене. Предшественником этих исследований был Макс фон Петтенкофер (1818–1901, рис.2), который первым провел исследование взаимосвязи между вентиляцией, концентрацией CO2 и качеством воздуха в помещениях. Пороговое значение 1500 ppm, которое до сих пор считается границей между допустимым и недопустимым уровнем, приписывается ему. Ему также приписывают концепцию «дышащих материалов» — результат ошибочного объяснения связи, которую он предполагал между воздухопроницаемостью кирпичей и камня и многочисленными жалобами на здоровье в каменных жилищах.

В XX веке тепловой комфорт и качество воздуха в помещениях стали важными темами. В интересах комфорта исследования, проведенные Яглоу при поддержке ASHVE (предшественника ASHRAE), привели к появлению понятия «оперативной температуры». Изначально его определение не учитывало радиацию. Это изменилось после того, как французский инженер А. Миссенар провел критический обзор исследований и заметил, что



Рисунок 2 Макс фон Петтенкофер

радиационная температура действительно оказывает влияние. Позднее П. О. Фангер совершил значительный прорыв с публикацией своей книги «Тепловой комфорт» в 1970 году. На основе физиологии, теплообмена между одетым телом и окружающей средой, а также случайных различий в восприятии комфорта у разных людей, он разработал стационарную тепловую модель активного, одетого человека. С тех пор его кривая «Предсказанное среднее голосование (PMV) против прогнозируемого процента недовольных (PPD)» стала основой всех стандартов комфорта по всему миру. После 1985 года адаптивная модель получила поддержку как дополнение к работе Фангера.

Что касается качества воздуха в помещениях, то была каталогизирована и оценена по степени риска для здоровья растущая масса загрязняющих веществ. С увеличением числа зданий с полной системой кондиционирования воздуха, одновременно увеличивалось количество жалоб на синдром больного здания. Это усилило необходимость в более глубоком изучении внутренней среды, хотя утверждение о «лучшем» не всегда основывалось на правильной интерпретации данных. Часто упускали из виду недовольство работой как причину имитации симптомов. И здесь П. О. Фангер оказал значительное влияние своими исследованиями по восприятию качества воздуха в помещениях, основываясь на неприятных запахах и энтальпии воздуха.

**Физика зданий и инженерные системы**

В XIX веке специалисты по инженерным системам зданий искали методы расчета тепловой и охлаждающей нагрузки. Они использовали знания, полученные в области физики, которая предложила такие понятия, как «теплопередача через плоские конструкции». Уже на раннем этапе организации, такие как ASHVE и VDI, создали технические комитеты, которые занимались вопросами теплопотерь и теплоприбыли. Активным членом ASHVE был У. Х. Карриер (1876–1950), которого в США считают «отцом» кондиционирования воздуха. Он опубликовал первую пригодную для использования психрометрическую диаграмму. В Германии Х. Ричель, профессор Технического университета Берлина и автор обширной книги «Техника отопления и вентиляции», также был одним из пионеров в этой области. Одной из его задач была потеря и прибавка тепла через вентиляцию. Он и другие узнали на собственном опыте, что хорошо спроектированные вентиляционные системы не работают должным образом, если оболочка здания не обладает герметичностью. Это усилило интерес к транспортировке воздуха.

Проблема влажности стала актуальной в период, когда системы кондиционирования воздуха (ОВКВ) стали популярны. Эта тема уже привлекала внимание, главным образом потому, что влага существенно ухудшала теплоизоляционные свойства некоторых материалов и могла вызывать проблемы со здоровьем. Звукопоглощение вошло в область ОВКВ из-за шума, который издавали ранние установки. Освещение стало актуальной темой, поскольку всё больше инженеров ОВКВ получали контракты на проектирование систем освещения. С 1973 года энергоэффективность стала важной задачей. Связь между ОВКВ и физикой зданий остаётся актуальной, и в США «наука о зданиях» часто относится к механическому инжинирингу.

**Физика зданий и строительство**

Связь со строительством усилилась, когда проектировщики новой строительной традиции столкнулись с жалобами на шум и влажность. Физика зданий стала прикладной областью, которая помогала избежать ошибок, возникавших при использовании новых решений, спроектированных и построенных по правилам существующего «современного уровня».

Всё началось в начале 1930-х годов с отслаивания и вздутия красок на изолированных каркасных стенах (теплоизоляционные материалы были тогда новыми). Это побудило уже упомянутого Тисдейла провести исследование по конденсации. Несколько лет спустя вентилируемые чердаки с изоляцией на потолке стали предметом экспериментальных работ профессора Ф. Роули из Университета Миннесоты, США. Его результаты содержали первые инструкции по использованию пароизоляции и вентиляции чердаков. В Германии пионерские работы в этой области велись на полигоне Фрейланд в Хольцкирхене, который был создан в 1951 году и использовал физику зданий как инструмент для повышения качества строительства. В 1973 году, когда энергоэффективность стала острой проблемой, а теплоизоляция — необходимостью, знания, полученные в Хольцкирхене, оказались чрезвычайно полезными для разработки высококачественных, хорошо изолированных зданий и производства стеклянных систем с улучшенными теплоизоляционными свойствами, низкой пропускной способностью солнечного света и лучшей светопропускаемостью. В 1990-х годах потребность в более высоком качестве привела к распространению подхода, основанного на оценке эксплуатационных характеристик, как это было разработано в рамках IEA-ECBCS Annex 32 по «Оценке эксплуатационных характеристик оболочки здания» и продвигалось благодаря сертификационным инструментам, внедрённым по всему миру.

С точки зрения акустики зданий, теория также была переведена на легко применимые методики для строительства полов, стен и крыш с высокой звукоизоляцией от воздушного и ударного шума. Примеры включают стены с полостями без связей, многослойные легкие стены, «плавающие» стяжки и двойное остекление с панелями разной толщины, где воздушное пространство заполнено тяжелым газом, а одно из стекол собрано как композит стекло/синтетическая пленка/стекло.

**Бенилюкс**

В Католическом университете Левена (KU Leuven), Бельгия, преподавание физики зданий началось в 1952 году, что сделало этот университет пионером в странах Бенилюкса. В Техническом университете Делфта (TU Delft) еще до Второй мировой войны профессор Цвиккер читал лекции по физике зданий, но курс с названием «Физика зданий» был запущен только в 1955 году с профессором Костеном из факультета прикладной физики. В 1963 году его сменил профессор Вервеен. В Техническом университете Эйндховена (TU/e) профессор П. Де Ланге занял кафедру физики зданий в 1969 году. Гентский университет ждал до 1999 года, чтобы назначить ассистента профессора по физике зданий.

В первые годы в Католическом университете Левена физика зданий была обязательным курсом для архитектурных инженеров и факультативным для гражданских инженеров. В середине 1970-х годов этот курс стал обязательным и для гражданских инженеров. С 1990 года, когда началась программа строительного инжиниринга, физика зданий стала одной из основных дисциплин для студентов этой программы. С этого момента была установлена тесная связь с курсами по инженерным системам зданий и проектированию на основе эксплуатационных характеристик.

Первым профессором физики зданий был А. де Граве, гражданский инженер и руководитель строительного отдела в Министерстве общественных работ. Он преподавал с 1952 по 1975 год, год его смерти. В 1957 году он опубликовал свою книгу «Bouwfysica» (Физика зданий), а затем «Oliestook in de woning» (Отопление нефтью в домах). Он был практиком, а не исследователем. Бывшие студенты до сих пор помнят его вдохновенный стиль преподавания. В 1975 году автор этой книги взял на себя его обязанности. В 1977 году мы основали лабораторию физики зданий. С самого начала исследования и консультации были сосредоточены на физических свойствах строительных и изоляционных материалов, на повышении эксплуатационных характеристик хорошо изолированных конструкций, на расчете чистого и конечного энергопотребления, а также первичного энергопотребления в зданиях, на качестве внутренней среды, на снижении воздушного и ударного шума, а также на акустике помещений. Позже были добавлены исследования в области городской физики, включая темы, связанные с ветром, дождем и загрязнением.

**Единицы и символы**

В книге используется система СИ (международно обязательная с 1977 года). Основные единицы: метр (м); килограмм (кг); секунда (с); Кельвин (К); ампер (А); кандела. Производные единицы, которые важны при изучении физики зданий, включают:

Единица силы: Ньютон (Н); 1 Н = 1 кг · м · с⁻²

Единица давления: Паскаль (Па); 1 Па = 1 Н/м² = 1 кг · м⁻¹ · с⁻²

Единица энергии: Джоуль (Дж); 1 Дж = 1 Н · м = 1 кг · м² · с⁻²

Единица мощности: Ватт (Вт); 1 Вт = 1 Дж/с = 1 кг · м² · с⁻³

Для обозначений следуют стандартам ISO (Международная организация по стандартизации). Если какая-либо величина не включена в эти стандарты, применяются рекомендации CIB-W40 (Международный совет по исследованиям, изучению и документации в строительстве, рабочая группа «Тепло- и влагоперенос в зданиях») и список, составленный Annex 24 IEA, ECBCS (Международное энергетическое агентство, Исполнительный комитет по энергосбережению в зданиях и системах общественного пользования).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Символ** | **Название** | **Единица измерения** |
| *a* | Ускорение | м/с2 |
| *a* | Тепловая диффузивность | м2/с |
| *b* | Тепловая эффусивность | Вт/(м2·K·с0,5) |
| *c* | Удельная теплоемкость | J/(кг · К) |
| *c* | Концентрация | кг/м3, г/м3 |
| *e* | Эмиссионная способность (излучательная способность) | - |
| *f* | Удельная свободная энергия | Дж/кг |
|  | Отношение температур | - |
| *g* | Удельная свободная энтальпия | Дж/кг |
| *g* | Ускорение свободного падения | м/с2 |
| *g* | Массовый расход, массовый поток | кг/(м2·с) |
| *h* | Высота | м |
| *h* | Удельная энтальпия | Дж/кг |
| *h* | Коэффициент поверхностной пленки для теплообмена | Вт/(м2·К) |
| *k* | Связанная с массой (влагой, воздухом, солью и т.д.) ) проницаемость | с |
| *l* | Длина | м |
| *l* | Удельная теплота испарения или плавления | Дж/кг |
| *m* | Масса | кг |
| *n* | Скорость вращения вентилятора | с-1, ч-1 |
| *p* | Парциальное давление | Па |
| *q* | Плотность теплового потока | Вт/м2 |
| *r* | Радиус | м |
| *s* | Удельная энтропия | Дж/(кг·К) |
| *t* | Время | с |
| *u* | Удельная скрытая теплота | Дж/кг |
| *v* | Скорость | м/с |
| *w* | Влагоемкость | кг/м3 |
| *x,y,z* | Декартовы координаты | м |
| *A* | Коэффициент сорбции воды | кг/(м2·с0,5) |
| *A* | Площадь | м2 |
| *B* | Коэффициент проникновения воды | м/с0,5 |
| *D* | Коэффициент диффузии | м2/с |
| *D* | Влагоотдача (диффузивность влаги) | м2/с |
| *E* | Облучение | Вт/м2 |
| *F* | Свободная энергия | Дж |
| *G* | Свободная энтальпия | Дж |
| *G* | Массовый поток (масса = пар, вода, воздух, соль) | кг/с |
| *H* | Энтальпия | Дж |
| *I* | Интенсивность излучения | Дж/рад |
| *K* | Коэффициент диффузии тепловой влаги | кг/(м·с·К) |
| *K* | Паропроницаемость | с/м |
| *K* | Сила | Н |
| *L* | Яркость | Вт/м2 |
| *M* | Излучательная способность | Вт/м2 |
| *P* | Мощность | Вт |
| *P* | Теплопроводность | Вт/(м2·К) |
| *P* | Общее давление | Па |
| *Q* | Теплота | Дж |
| *R* | Тепловое сопротивление | м2·К/Вт |
| *R* | Газовая постоянная | Дж/(кг·К) |
| *S* | Энтропия, степень насыщения | Дж/К, - |
| *T* | Абсолютная температура | К |
| *T* | Период (колебания или волны) | с, дни и т.д. |
| *U* | Скрытая энергия | Дж |
| *U* | Теплопередача | Вт/(м2·К) |
| *V* | Объем | м3 |
| *W* | Сопротивление воздуха | м/с |
| *X* | Отношение влаги | кг/кг |
| *Z* | Диффузионное сопротивление | м/с |
| *α* | Коэффициент теплового расширения | К-1 |
| *α* | Поглощательная способность (абсорбция) | - |
| *β* | Коэффициент поверхностной пленки для диффузии | с/м |
| *β* | Объемный коэффициент теплового расширения | К-1 |
| *η* | Динамическая вязкость | Н·с/м2 |
| *θ* | Температура | 0С |
| *λ* | Теплопроводность | Вт/(м·К) |
| *μ* | Коэффициент сопротивления паропроницаемости | - |
| *ν* | Кинематическая вязкость | м2/с |
| *ρ* | Плотность | кг/м3 |
| *ρ* | Отражательная способность | - |
| *σ* | Поверхностное натяжение | Н/м |
| *τ* | Пропускная способность | - |
| *φ* | Относительная влажность | - |
| *α,φ,θ* | Угол | рад, 0 |
| *ξ* | Удельная влагоемкость | кг/кг |
| *ψ* | Пористость | - |
| *ψ* | Объемное отношение влаги | м3/м3 |
| *Φ* | Тепловой поток | Вт |

|  |  |
| --- | --- |
| Символ | Значение |
| Указатели | |
| А | Воздух |
| с | Капиллярный, конвекция |
| e | Внешний, наружный |
| h | Гигроскопический |
| i | Внутренний |
| cr | Критический |
| CO2, SO2 | Химические обозначения газов |
| m | Влага, максимальный |
| r | Излучающий, излучение |
| sat | Насыщение |
| s | Поверхность, площадь, всасывание |
| rs | Результирующий |
| v | Водяной пар |
| w | Вода |
| φ | Относительная влажность |
| Обозначения | |
| [], выделенный шрифт | Матрица, решетка, значение комплексного числа |
| Тире | Вектор (например, ) |