**Практическое занятие 5.**

**5.1. Расчет влагонакопления в наружных ограждающих конструкциях**

Известные методы инженерного расчета или оценки влажностного состояния ограждающих конструкций учитывают перемещение влаги только в виде пара. Таковы методы, разработанные в СССР в конце 20-х годов, а также методы разработанный в ФРГ в конце 50-х годов. В современных ограждающих конструкциях из легких бетонов с повышенным уровнем теплозащиты доля влагопереноса жидкой влаги возрастает благодаря меньшим градиентам температуры и, следовательно, меньшим градиентам парциального давления водяного пара. Для учета совместного переноса пара и жидкой влаги предложено ввести функцию, названную потенциал F. Введение этой функции позволило существенно упростить уравнение влагопереноса и решить его аналитически. Потенциал F рассчитывается по характеристикам, традиционно исследуемым для строительных материалов и содержащихся в справочной литературе: коэффициенты паропроницаемости и влагопроводности. Для особо легких бетонов, которые являются новыми материалами, эти характеристики были определены и по ним рассчитаны зависимости потенциала F от влажности и температуры. Для иллюстрации возможностей метода проведены расчеты влажностного состояния стен из полистиролбетонных блоков.

**5.1. Постановка задачи**

Инженерными считаются методы расчета, которые могут быть проведены при проектировании конструкций без использования вычислительной техники. Несмотря на повсеместное использование компьютеров, необходимость в таких методах сохраняется, поскольку они отражают физические процессы и их целесообразно включать в нормативные документы.

В конце 20-х годов ХХ столетия К. Ф. Фокин предложил графоаналитический метод определения зоны конденсации в ограждающей конструкции и основанный на нем метод расчета влагонакопления при стационарных условиях тепло- и влагопереноса. Практически все инженерные расчеты и оценки влажностного состояния ограждений основаны на положениях этого метода. Это и методика, приведенная в СНиП II-3-79\* «Строительная теплотехника» и методика DIN 4108 «Warmeschutz im Hochbau», которую разработал H. Glaser в конце 50-х годов. Эти методы учитывают влагоперенос, обусловленный градиентом парциального давления (упругостью) водяного пара. Расчеты проводятся при некоторых стационарных температурно-влажностных условиях на границах ограждения. Основные уравнения математической модели рассматриваемых методов расчета для ограждающей конструкции, могут быть сформулированы следующим образом.

Уравнение влагопроводности в случае одномерного влагопереноса имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
| для 0<x<δ, | (5.1) |

где плотность потока влаги j в слое материала конструкции выражается уравнением:

|  |  |
| --- | --- |
| для 0<x<δ | (5.2) |

Влагообмен ограждения с окружающим воздухом на внутренней и наружной поверхностях соответственно описывается уравнениями граничных условий в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.3) |

На стыке двух различных материалов принимается равенство значений относительного давления водяного пара, ϕ (где ϕ=е/Е), в порах материалов и равенство потоков влаги:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.4) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.4а) |

Важным является уравнение связи физического потенциала влагопереноса е с влажностью материала w и температурой t:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.5) |

Здесь ϕ(w), доли ед., представляет собой зависимость относительной влажности воздуха в порах материала (относительного давления водяного пара), от влажности материала w, кг/кг. Эта зависимость при влажности меньшей максимальной сорбционной определяется изотермой сорбции (или десорбции) водяного пара. При любой влажности материала большей максимальной сорбционной, физический потенциал влагопереноса, e не зависит от влажности материала w, поскольку ϕ=1.

Решение уравнения (5.1) с учетом (5.2) – (5.5) при некоторых других, характерных для каждого метода условиях, и составляют суть инженерных методов расчета влажностного режима ограждений. Уравнения (5.1), (5.2) и (5.5) показывают, что влажность материалов конструкции может быть достоверно определена этими методами только при условии, что она не превышает максимальную сорбционную, когда влажность материала функционально зависит от парциального давления водяного пара в порах материала. При больших значениях влажности она не зависит от значения парциального давления водяного пара, поскольку оно становится постоянным и равным парциальному давлению насыщенного водяного пара Е. При этом не учитывается влагоперенос жидкой влаги, обусловленный влагопроводностью, который является существенным при сверхсорбционной влажности (некоторые авторы считают его существенным и при значениях влажности меньших максимальной сорбционной). Этот недостаток рассматриваемых методов является существенным и устраняется в методах расчета нестационарного влажностного режима ограждений, которые уже не являются инженерными и требуют использования вычислительной техники.

В настоящей работе излагается прием, позволяющий обобщить известные инженерные методы расчета влажностного состоянии конструкций при стационарных условиях тепло- и влагообмена на случай сверхсорбционного увлажнения материалов и учесть влагоперенос обусловленный влагопроводностью. Использование таких методов для расчета конструкций представляется перспективным, поскольку они могут быть использованы при аналитическом решении ряда задач, в том числе и выходящих за рамки теплофизических проблем.

**5.2. Определение потенциала F**

Для прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций плодотворной является идея использования потенциала влажности. При этом в получены условия существования потенциала влажности.

Для получения более общего метода расчета вводится функция, называемая далее «потенциал F». Она определяется следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.6) |

В показано, что функция F является потенциалом векторного поля плотности потока влаги в материале. Правая часть уравнения (6) состоит из двух слагаемых. Первое из которых является парциальным давлением водяного пара, а второе - предлагается назвать «эквивалентным дополнительным давлением» h, обусловленным влагопроводностью материала, которое определяется формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.7) |

Градиент эквивалентного дополнительного давления определяет поток жидкой влаги в материале численно равный потоку парообразной влаги, обусловленному таким же по величине градиентом парциального давления водяного пара. Кроме того, вводится «эквивалентное максимальное дополнительное давление», определяемое формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.8) |

Оно является аналогом парциального давления насыщенного водяного пара. Величины F, h и H измеряются в Паскалях, как и величины е и Е.

Вводится понятие «относительного дополнительного давления» ψ, которое является аналогом относительного давления водяного пара ϕ:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.9) |

Зависимость влажности материала от ψ можно рассматривать как аналог изотермы сорбции материала при сверхсорбционной влажности.

С учетом (5.5), (5.7) и (5.8) уравнение (5.6) для потенциала F можно записать в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.10) |

Подробное рассмотрение остальных свойств потенциала F из-за ограниченности объема статьи не приводится, однако следует подчеркнуть, что F(w,T) является непрерывной, дифференцируемой и монотонно возрастающей функцией по обеим переменным. Это свойство позволяет использовать функцию F(w,T) в качестве потенциала влагопереноса в интервале изменения влажности материала от 0 до wmax.

Преимуществом использования потенциала F является то, что он может быть рассчитан по известным характеристикам материалов, которые традиционно исследуются в строительной теплофизике: коэффициентам паропроницаемости, влагопроводности и изотермам сорбции (или десорбции).

**5.3. Математическая модель влагопереноса с использованием потенциала F**

Математическая модель влагопереноса в ограждающей конструкции при использовании потенциала F, получается из приведенной в разделе 1 главным образом путем замены в выражениях для потока влаги физического потенциала е на потенциал F. Уравнение (5.1) остается без изменений. Уравнение для плотности потока влаги (5.2) запишется в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.11) |

Если в (5.11) вставить выражение для потенциала F (формулы (5.6) и (5.10)), то оно преобразуется к виду:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.12) |

Уравнение (5.12) показывает, что при использовании потенциала F учитывается перенос не только пара по механизму паропроницаемости, но и перенос жидкой влаги по механизму влагопроводности. С другой стороны уравнение (11) совершенно аналогично (5.2) и не является более сложным по сравнению с (5.2), т. к. F, как и е являются сложными функциями температуры и влажности материала. Следовательно, (5.1) и (5.11) могут решаться теми же способами, что и (5.1) и (5.2). Эта аналогия и уравнение (5.12) показывают основную цель, с которой вводится потенциал F.

При отсутствии увлажнения поверхностей конструкции жидкой влагой можно считать, что:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.13) |
|  | (5.13а) |

Тогда уравнения (5.3) влагообмена конструкции с окружающим воздухом примут вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.14) |

На стыке двух различных материалов в конструкции принимается единое условие на стыке двух материалов как в сорбционной, так и в сверхсорбционной зоне:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.15) |
|  | (5.15а) |

Аналогом уравнения (5.5) для связи физического потенциала e с влажностью материала w является уравнение (5.10) для связи потенциала F с влажностью материала w.

Настоящая математическая модель не имеет ограничения модели раздела 1 на значения влажности, не превосходящие максимальной сорбционной, поскольку влажность w зависит от потенциала F во всем диапазоне ее изменения, а не только в сорбционной области. Это обстоятельство позволяет разрабатывать инженерные методы расчета распределения влажности при стационарных условиях влагообмена с окружающей средой в диапазоне как сорбционной, так и сверхсорбционной влажности материалов конструкции при учете влагопереноса не только пара, но и жидкой влаги.

4. Методика расчета влажностного состояния однослойного ограждения

Наиболее просто сформулированная математическая модель реализуется для однослойных конструкций. В этом случае решение уравнения (5.1) с подстановкой (5.11) с учетом граничных условий (5.14) при влажности на наружной границе ограждения меньшей максимальной сорбционной имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.16) |

при влажности большей максимальной сорбционной:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5.17) |

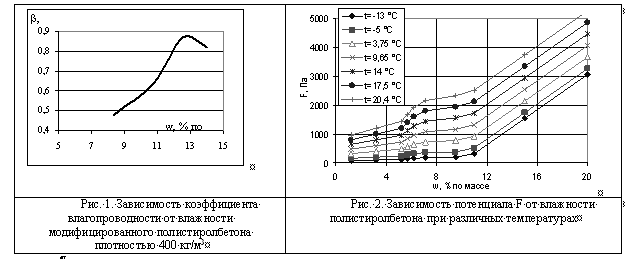
Методика расчета влажностного состояния однослойного ограждения при стационарных условиях тепло- и влагообмена заключается в расчете распределения температуры по известной формуле и распределения потенциала F по толщине конструкции по формулам (5.16) или (5.17), а затем в определении влажности по графикам зависимости потенциала F(w,t) от влажности материала при различной температуре.

5. Расчет влажностного состояния стен из полистиролбетонных блоков

Для проведения расчетов был взят полистиролбетон плотностью 400 кг/м3, полученный в лаборатории № 5 НИИЖБ (зав. лаб. В. Н. Ярмаковский). Для этого материала были определены теплофизические характеристики по общеизвестным методикам. Коэффициент паропроницаемости материала составляет 0,023 мг/(м·ч·Па). Максимальная сорбционная влажность равна 9,5 % по массе. Коэффициент влагопроводности полистиролбетона, определенный стационарным методом, по этим данным рассчитаны зависимости F(w,t), представленные на рис. 5.1.

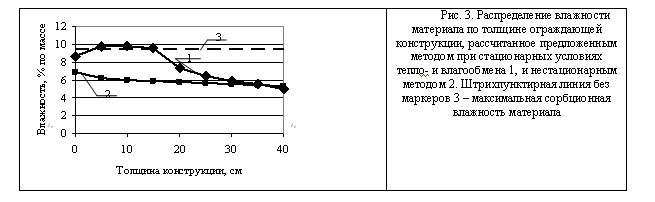
Для расчета влажностного состояния рассматривается однослойная ограждающая конструкция толщиной 0,4 м из кладки из полистиролбетонных блоков. Температура и относительная влажность воздуха принимаются, соответствующими среднемесячным значениям для января в г. Москве: tн=-10,2 оС, Ен=255 Па, ϕн=87 %. Сопротивление влагообмену на наружной поверхности принимается равным Rн=0,5 м2⋅ч⋅Па/мг, что примерно соответствует оштукатуриванию и окраске наружной поверхности стены. Параметры внутреннего воздуха принимаются равными tв=20 °С, Ев=2338 Па, ϕв=55 %. Сопротивление влагообмену на внутренней поверхности принимается равным Rв=0,2 (м2⋅ч⋅Па)/мг, что примерно соответствует оштукатуриванию внутренней поверхности стены плотным цементно-песчаным раствором слоем 20 мм. При анализе влажностного состояния ограждающей конструкции она принимается однослойной.

Результаты расчета по предложенной методике распределения влажности по толщине конструкции представлены на рис. 5.2. Для сравнения, на этом рисунке приведено распределение влажности по толщине конструкции по результатам расчета нестационарным методом.



*Рис. 5.1. Коэффициент влагопроводности полистиролбетона и рассчитанные зависимости F(w,t)*

Анализ показал, что влажностный режим конструкции находится на грани между удовлетворительным и неудовлетворительным. Плоскость максимального увлажнения находится на расстоянии 9 см от наружной поверхности, максимальная влажность составляет 10 % по массе и лишь небольшая часть конструкции находится при сверхсорбционной влажности материала. Расчет методом последовательного увлажнения при стационарных граничных условиях дает такие же результаты, а при нестационарных – отличающиеся: вся конструкция находится в зоне сорбционных влажностей материала, максимум влажности наблюдается у наружной поверхности ограждения и составляет 6,8 % по массе.



*Рис.5.2. Результаты расчета распределения влажности по толщине конструкции*

**6. Заключение**

Представленный метод может быть использован и для расчета многослойных конструкций. В настоящее время он модифицирован и для учета фильтрации воздуха через конструкцию. Полученные расчетом результаты могут служить для проверки влагонакопления в ограждающей конструкции. Их можно использовать также, например, при расчетах теплозащиты ограждающих конструкций и в других случаях, когда необходимо количественно оценить влажность материалов ограждающих конструкций.

Принятые обозначения

Е – парциальное давление (упругость) насыщенного водяного пара, Па; е – парциальное давление (упругость) водяного пара, Па; Е0 – парциальное давление насыщенного водяного пара на наружной границе ограждения, Па; F – потенциал влажности, Па; j – плотность потока влаги, кг/(м2·с); m – номер слоя конструкции, содержащего точку с координатой x; – сопротивление паропроницанию части конструкции, м2⋅ч⋅Па/мг; Rп(x) – сопротивление паропроницанию части конструкции, расположенной между наружным воздухом и плоскостью с координатой x, м2⋅ч⋅Па/мг; w – влажность материала, кг/кг; wmax – максимальная влажность капиллярного увлажнения материала, кг/кг; x – пространственная координата, м; β – коэффициент влагопроводности материала, зависящий от влажности, кг/(м⋅с⋅кг/кг), (1 кг/(м⋅с⋅кг/кг)=2,78⋅10-1 г/(м⋅ч⋅кг/кг)); δ – толщина конструкции, м; μ – коэффициент паропроницаемости соответствующего материала конструкции, кг/(м⋅с⋅Па), (1 кг/(м⋅с⋅Па)=2,78⋅102 мг/(м ч Па)).

**5.2. Определение влагонакоплений в многослойных ограждающих конструкциях на основе потенциала влажности**

Основным приоритетным направлением в современном строительстве является повышение энергосбережения и энергоэффективности зданий и инженерных сооружений и коммуникаций. Наиболее энергосберегающим способом теплоснабжения является так называемая связанная подача теплоты. В этом случае расход воды из теплосети в первую очередь идёт на обеспечение тепловой мощности горячего водоснабжения, а система отопления в случае максимального водоразбора в системе горячего водоснабжения не- дополучает необходимого количества теплоты. Восстановление тепловой мощности системы отопления происходит при незначительном водоразборе и в часы отсутствия водоразбора. При этом важную роль играет теплоустойчивость наружных ограждений, которая позволяет сгладить колебания внутренней температуры, вызванные переменным суточным режимом работы системы горячего водоснабжения. При связанной подаче теплоты значительно сокращаются расходы сетевой воды, количество необходимого топлива и стоимость электроэнергии на перекачку теплоносителя, но при этом значительно повышаются требования к теплозащите строительных конструкций зданий, т.к. необходимо учитывать не только климатические факторы, но также переменные теплопоступления от тепло- вой сети, поскольку при низких наружных тем- пературах теплопотери помещений могут не компенсироваться системой отопления, что может привести к переувлажнению материалов конструкций.

Целью работы является разработка методики определения влагонакоплений в конструкциях зданий, расположенных в различных климатических зонах. Это позволит выполнить количественную оценку влагосодержания материалов строительных конструкций при любом фазовом состоянии влаги.

Анализ современного состояния исследований Влагозащитные свойства ограждающих конструкций определяются согласно методике СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» по пре- дельно допустимому состоянию увлажнения на основе определения плоскости максимального увлажнения. При этом в балансовых уравнениях не учитывается изменение параметров микроклимата (температура и относительная влажность внутреннего воздуха) в различные периоды года. Кроме того, сами влагонакопления будут оказывать воздействие на теплоустойчивость и термическое сопротивление наружных ограждений, и микроклимат помещений будет меняться.

К. Ф. Фокиным был разработан метод рас- чета влажностного режима ограждающих конструкций, основанный на модели диффузии водяного пара за счет разности парциального давления пара с двух сторон ограждения. Этот метод позволяет определить зону возможной конденсации влаги в конструкции. Влага конденсируется в ограждающей конструкции при выполнении следующего условия:

|  |  |
| --- | --- |
| e ≥ E, | (5.18) |

где е – парциальное давление водяного пара в порах материалов;

Е – парциальное давление насыщенного водяного пара.

Достоинством теории потенциала влажности является возможность учесть не только сконденсировавшуюся влагу, но и содержание влаги в материале в любой фазе. Теория потенциала влажности была разработана В. Н. Богословским, но единой методики расчета влагонакоплений разработано не было.

Основная сложность заключается в построении годового хода потенциала влажности, зависящего от текущей наружной температуры и относительной влажности воздуха, интенсивности и продолжительности осадков, скорости ветра, интенсивности и продолжительности солнечной радиации. Кроме того, коэффициенты влагопроводности строительных материалов определялись, в основном, экспериментально, для отдельных материалов ограждений. В настоящей работе сделана попытка собрать имеющиеся исследования в единую систему и разработать методику расчета влагонакоплений в строительных конструкциях.

**5.2. Методика расчета влагонакоплений**

Физико-математическое понятие потенциала влажности  , °В , аналогично потенциалу температуропроводности,

где – коэффициент влагопроводности, кг/ (м.ч.°В);

 – градиент потенциала влажности, °В/м.

Коэффициент влагопроводности в отличие от коэффициента теплопроводности будет зависеть также от климатических условий местности, в которой расположено здание.

Коэффициент влагопроводности строительных материалов определяется по зависимости:

|  |  |
| --- | --- |
| =eint  eext   int ext  | (5.19) |

где eint, eext – соответственно упругости водяного пара с внутренней и наружной сторон ограждения, Па;

 int,  ext – соответственно потенциалы влажности воздуха с внутренней и наружной сторон ограждения, °В;

 – коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м.ч.Па).

Потенциалы влажности внутреннего и наружного воздуха можно определить по аналитическим зависимостям:

|  |  |
| --- | --- |
| lg   0, 057d  0,829 | (5.20) |

при t  10 С и любой , %;

|  |  |
| --- | --- |
| lg   0,12d  0, 049t 1, 056 | (5.21) |

при t> 10С,  80%;

|  |  |
| --- | --- |
| lg  0, 057d  0,829 | (5.22) |

при t> 10С, < 80%, 0 <d 20 г/кг.

Влагосодержание воздуха d, г/кг, можно определить по формулам,

|  |  |
| --- | --- |
|  = ktd, | (5.23) |

где угловой коэффициент kt при различных значениях температуры

|  |  |
| --- | --- |
| kt = 24,39е-0,062t. | (5.24) |

Наружные ограждения должны иметь приведённое сопротивление влагопередаче R0 , м2.ч.В/кг, не меньше нормируемого значения определяемого по формулам:

0

По аналогии с основным законом теплопроводности, удельный поток влаги через ограждение i, кг/(м2/ч), пропорционален градиенту потенциала влажности:

|  |  |
| --- | --- |
| i   , | (5.25) |

где n – нормируемый перепад потенциалов влажности, °В;

 0 – коэффициент влагообмена на внутренней поверхности ограждения, кг/(м2 . ч .В).

int

Сопротивление влагопередаче R0 ограждающей конструкции равно:

0

|  |  |
| --- | --- |
| R     , | (5.26) |

По профилю температуры t(x) определялся профиль максимального сорбцион- ного потенциала влажности (х). По наибольшему положительному отклонению  от ms определялось наиболее опасное сечение в конструкции, где

i – толщина i-го слоя ограждающей конструкции, м;

i – коэффициент влагопроводности материала риала i-го слоя, кг/(м.ч.°В);

n – число слоёв в ограждении.

Затем строился профиль относительного потенциала влажности  (х). На основе зависимостей w() и строился профиль равновесного влагосодержания материалов ограждающей конструкции w (x), (см. табл. 5.1).

## Результаты исследования

Максимальный сорбционный потенциал влажности:

*Таблица 5.1*

*Результаты расчёта влагонакоплений в наружных ограждениях*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Конструкция наружной стены | | | |
| Город | 1 – цементно-  песчанный раствор  (ρ = 1 800 кг/м³)  2, 4 – керамзитобетон  (ρ = 1 300 кг/м³)  3 – плиты  минераловатные  жесткие  (ρ = 200 кг/м³) | 1 – гипсовый обшивной лист (ρ = 800 кг/м³)  2, 4 – железобетон  (ρ = 2 500 кг/м³)  3 – плиты минераловатные жесткие  (ρ = 200 кг/м³) | 1. – цементно- песчанный раствор (ρ = 1 800 кг/м³) 2. – пенобетон (ρ = 400 кг/м³) 3 – известняк   (ρ = 1 400 кг/м³) | 1, 5 – гипсовый  обшивной лист  (ρ = 800 кг/м³)  2, 4 – кладка из  глиняного кирпича  3 – пенополистирол |
| Влагонакопления, *w*, кг/кг | | | |
| Москва |  |  |  |  |

*Окончание таблицы 5.1.*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Санкт– Петербург |  |  |  |  |
| Новосибирск |  |  |  |  |
| Краснодар |  |  |  |  |
| Владивосток |  |  |  |  |
| Якутск |  |  |  |  |

По максимальному сорбционному потенциалу влажности определялись влагонакопления в стенах строительных конструкций. Анализ профиля влагосодержания показывает, сколько влаги содержится на стыках различных материалов. Расчёт проводился для четырёх конструкций

наружных стен жилых помещений (tв = 21° С; в = 50) в шести городах Российской Федерации.

Результаты расчёта позволили сделать выводы о целесообразности применения строительных конструкций разного типа по условиям влагонакопления.

Пористые конструкции из пенобетона в большинстве городов накапливают значительно больше влаги, чем конструкции из других материалов. При этом такие конструкции обладают наибольшей теплоустойчивостью в сухом состоянии. Очевидно, что значительное влагонакопление будет снижать теплоустойчивость конструкций из пористых бетонов, что необходимо учитывать при проектировании микроклимата помещений.

Применение теории потенциала влажности в расчете переноса влаги через наружные ограждения даёт возможность одновременно учитывать перемещение жидкой и парообразной влаги под действием градиента потенциала влажности в условиях нестационарной влагопередачи. Расчет наружных ограждений на основе теории потенциала влажности позволит повысить качество проектирования, приведет к повышению надёжности и долговечности строительных конструкций и к поддержанию оптимальных параметров микроклимата.