

THE EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT OF LOW-DENSITY THERMAL INSULATING MATERIALS

I. Gnip , S. Vėjelis & V. Keršulis

To cite this article: I. Gnip , S. Vėjelis & V. Keršulis (2001) THE EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT OF LOW-DENSITY THERMAL INSULATING MATERIALS, *Statyba*, 7:5, 359-365, DOI: [10.1080/13921525.2001.10531754](https://doi.org/10.1080/13921525.2001.10531754)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/13921525.2001.10531754>



Published online: 30 Jul 2012.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 75

РАВНОВЕСНОЕ УДЕЛЬНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ЛЕГКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. Гнип, С. Веялис, В. Кершулис

Институт «Термоизоляция»

1. Введение

В качестве утеплителя строительных ограждающих конструкций широко применяются стекловолоконистые и минераловатные изделия, полистирольные пенопластовые ПСБ-С плиты, а также сыпучий теплоизоляционный материал – эковата.

Для успешного применения этих материалов и рационального проектирования ограждающих конструкций необходимо знать их теплофизические и массообменные характеристики. Для вычисления коэффициентов массопереноса в качестве исходных величин используют изотермы равновесного удельного влагосодержания [1], характеризующие сорбционные свойства материалов. Сухой материал, помещенный в среду влажного воздуха, поглощает пары воды до достижения им равновесного удельного влагосодержания W_p , определяемого параметрами окружающей среды: относительной влажностью воздуха Φ , температурой T и такими характеристиками материала, как его удельная поверхность, адсорбционная активность поверхности, количество и состав растворимых в воде веществ.

Известные из литературных источников данные об изотермах равновесного удельного влагосодержания теплоизоляционных материалов устарели, к тому же определены для мало применяемых материалов [2, 3].

Настоящая работа посвящена исследованию изотерм равновесного удельного влагосодержания легких неорганических и органических теплоизоляционных материалов, применяемых в современной строительной практике.

2. Методика исследований

Экспериментально изотермы равновесного удельного влагосодержания теплоизоляционных

материалов определялись тензиметрическим (эксихаторным) методом [4].

Сыпучий материал насыпали в бюксы слоем толщиной около 30–40 мм, а максимальный размер кусковых образцов не превышал 20 мм. Масса исследуемых образцов в зависимости от плотности материала составляла 1–3 г.

Максимально возможная ошибка определения не превышала 2% [4]. Для снижения погрешности определения из-за неоднородности теплоизоляционных материалов использовался метод отбора средней пробы [5].

Из-за разных форм связи влаги в зависимости от влажности воздуха, а также неопределенности геометрии пористой структуры теплоизоляционных материалов невозможно получить строгого аналитического описания зависимости равновесного влагосодержания от влажности воздуха [1, 6]. Поэтому средние значения равновесного влагосодержания \bar{W}_p исследованных теплоизоляционных материалов в интервале относительной влажности воздуха Φ от 0 до 0,97 на основании уравнений БЭТ (по классификации изотерм сорбции водяного пара Брунауэра, Эммета и Теллера), применяемых для описания изотерм полимолекулярной адсорбции (имеет преобладающее значение в процессе сорбции), в настоящей работе представлены двухконстантной эмпирической формулой [1, 7, 8]:

$$\bar{W}_p = \frac{b_0 \cdot \Phi}{1 - \Phi} [1 - b_1 \cdot \Phi], \quad (1)$$

где b_0 , b_1 – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств материала, определенные по экспериментальным данным методом наименьших квадратов [7, 8].

Для оценки значений $\min W_p$ и $\max W_p$ при использовании полученными зависимостями (1)

предложено применять среднее квадратическое отклонение S_{tar} (абсолютную величину средней меры уклонений опытных данных от рассчитанной кривой, постоянной для всех её участков) [8].

Влагосодержание органических материалов представляли в % по массе, так как гигроскопическое (сорбированное) влагосодержание материала пропорционально в широких пределах его плотности и, таким образом, массовое влагосодержание имеет одинаковое значение при любой плотности материала. При указании же влагосодержания в % по объему его значение возросло бы, например, при удвоенной плотности в два раза.

Влагосодержание исследуемых неорганических материалов выражали в % по объему, так как в этом случае, судя по опыту, оно приблизительно одинаково при любой плотности материала [9, 10].

3. Результаты экспериментального определения изотерм сорбции водяного пара теплоизоляционными материалами

3.1. Стекловолоконистые и минераловатные изделия

Исследованы образцы стекловолоконистых изделий, изготовленных фирмами „Флайдерер-Чудово“ (Россия) и „ISOVER“ (Финляндия), а также минера-

ловатных изделий, изготовленных предприятиями „Partek Paroc Polska“ (Польша) и „Paroc“ (Литва).

Экспериментальные данные по равновесному удельному влагосодержанию стекловолоконистых и минераловатных изделий $W_{p(i)}$ представлены на рис. 1–4. Определенные значения коэффициентов b_0 и b_1 регрессионной зависимости (1) приведены в табл. 1.

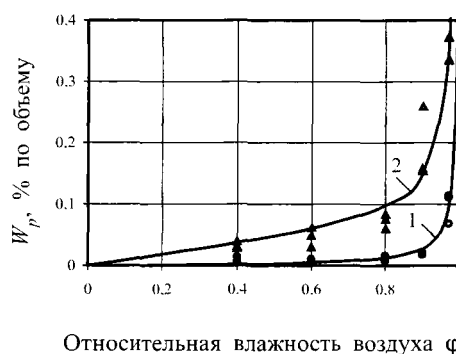


Рис. 1. Изотермы сорбции водяного пара стекловолоконистыми изделиями: 1 – маты URSA M-11, плотность – 13,1 кг/м³ („Флайдерер-Чудово“, Россия); 2 – плиты RKL-30, плотность – 79,6 кг/м³ („Isover“, Финляндия)

Fig 1. Isothermal sorption of water vapour by glass-wool products dependent on relative air humidity: 1 – mats URSA M-11, density 13,1 kg/m³ („Pfleiderer-Cziudovo“, Russia); 2 – slabs RKL-30, density 79,6 kg/m³ („Isover“, Finland)

1 таблица. Результаты статистической обработки экспериментальных данных по равновесному удельному влагосодержанию стекловолоконистых и минераловатных изделий

Table 1. Statistical treatment of equilibrium moisture experimental data results for glass and rock-wool products

| Изделие | Плотность, кг/м ³ | Значения коэффициентов уравнения (1) | | S_{tar} , % по объему |
|---|------------------------------|--------------------------------------|-------|-------------------------|
| | | b_0 | b_1 | |
| Стекловолоконистые маты URSA M-11; „Флайдерер-Чудово“, Россия | 13,1 | 0,00367 | 0,197 | 0,0110 |
| Стекловолоконистые плиты RKL-30, „ISOVER“, Финляндия | 79,6 | 0,088 | 0,902 | 0,0350 |
| Минераловатные маты MAT LAM 91 „Partek Paroc Polska“, Польша | 49,5 | 0,018 | 0,963 | 0,0034 |
| Минераловатные плиты EL [11], „Paroc“, Литва | 73,2 | 0,025 | 0,986 | 0,0058 |
| То же, VL | 117 | 0,027 | 0,986 | 0,0039 |
| То же, PDP | 159 | 0,066 | 0,996 | 0,0063 |
| Минераловатные изделия „Partek Paroc Polska“, Польша, АВ „Paroc“, Литва | 49,5 73,2 117 | 0,024 | 0,980 | 0,024 |

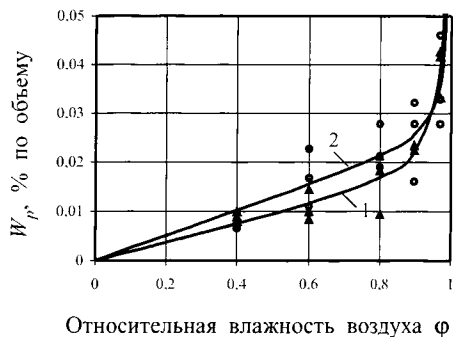


Рис. 2. Изотермы сорбции водяного пара минераловатными изделиями: 1 – маты MAT LAM 91, плотность – 49,5 кг/м³, („Partek Paroc Polska“, Польша); 2 – плиты EL [11], плотность – 73,2 кг/м³ („Paroc“, Литва)

Fig 2. Isothermal sorption of water vapour by rock-wool products dependent on relative air humidity: 1 – mats MAT LAM 91, density 49,5 kg/m³ („Partek Paroc Polska“, Poland); 2 – slabs EL [11], density 73,2 kg/m³ („Paroc“, Lithuania)

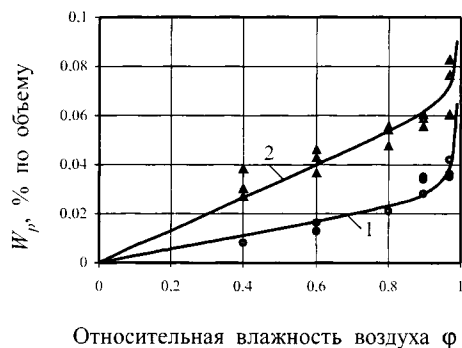


Рис. 3. Изотермы сорбции водяного пара минераловатными плитами („Paroc“ [11], Литва): 1 – VL, плотность – 117 кг/м³; 2 – PDP, плотность – 159 кг/м³

Fig 3. Isothermal sorption of water vapour by rock-wool slabs dependent on relative air humidity („Paroc“ [11], Lithuania): 1 – VL, density 117 kg/m³; 2 – PDP, density 159 kg/m³

Исследованные стекловолоконные изделия обладают большей гигроскопичностью (сорбирующей), чем минераловатные. Например, значение \bar{W}_p стекловолоконных плит RKL-30 при $\phi = 90\%$ составляет 0,15% по объему и в 5–7 раз превышает это значение для исследованных минераловатных изделий плотностью 49,5–117,0 кг/м³.

По данным эксперимента можно отметить увеличение гигроскопичности стекловолоконных изделий при большей плотности (рис. 1).

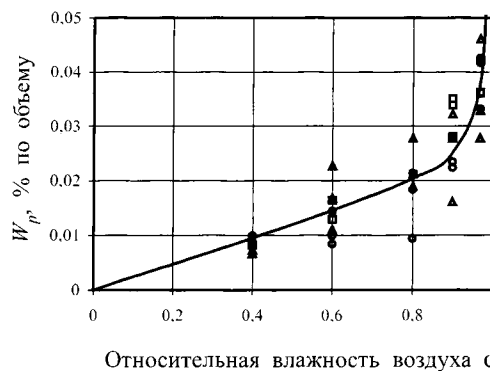


Рис. 4. Обобщенная изотерма сорбции водяного пара минераловатными изделиями, изготовленными в Литве и Польше: ○ – маты MAT LAM 91; △ – плиты EL; □ – плиты VL

Fig 4. Generalized isothermal water vapour sorption curve for rock-wool products produced in Lithuania and Poland: ○ – mats MAT LAM 91; △ – slabs EL; □ – slabs VL

Влияние плотности минераловатных изделий в интервале от 49,5 до 117,0 кг/м³ на их гигроскопичность по данным эксперимента не может быть отмечено (см. табл. 1) и при относительной влажности воздуха $\phi = 90\%$ ($\bar{W}_p + S_{tar}$) не превышает 0,032% по объему (рис. 2, 3). Для плит PDP плотностью 159 кг/м³ [11] отмечено увеличение значения \bar{W}_p , величина которого при $\phi = 90\%$ достигает 0,068% по объему (рис. 3).

На всех кривых сорбции водяного пара можно выделить две достаточно выраженные области: $0 < \phi < 0,8$ (адсорбционно-связанная влага) и $0,8 < \phi < 0,97$ (капиллярно-связанная влага). Наблюдаемый сравнительно немалый разброс экспериментальных данных $W_{p(i)}$ стекловолоконных и минераловатных изделий можно объяснить структурной неоднородностью таких материалов.

3.2. Плиты полистирольного пенопласта

Исследованы образцы плит полистирольного пенопласта ПСБ-С литовских производителей „Polasta“, „Ukmergės gelžbetonis“, Польского производства, а также плит экструзионного полистирола „Styrodur C“ (Германия).

Экспериментальные данные по равновесному удельному влагосодержанию исследованных плит представлены на рис. 5–8. Значения коэффициентов

b_0 и b_1 регрессионной зависимости (1) приведены в табл. 2.

Исследованные полистирольные пенопласты ПСБ-С обладают незначительной гигроскопичностью (сорбированной), значение W_p при $\varphi=90\%$ не превышает 2,15% по массе. С увеличением плотности пенопласта его гигроскопичность уменьшается. Значительная же часть сорбируемой влаги поглощается при $\varphi>0,8$, как и в случае неорганических волокнистых материалов. Структурная неоднородность пенопластов вызывает немалый разброс экспериментальных данных (см. рис. 5 б, 6).

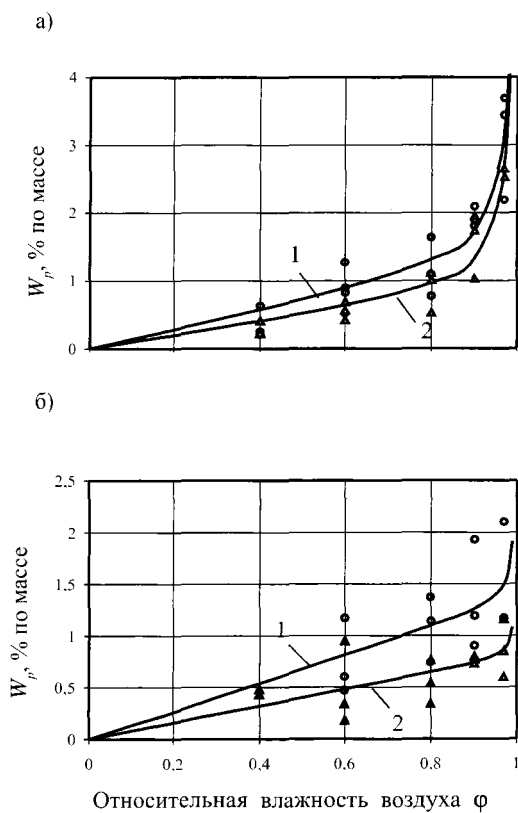


Рис. 5. Изотермы сорбции водяного пара полистирольным пенопластом ПСБ-С. а) изготовитель „Polasta“, плотность, кг/м³: ○ – 13,4 (кривая 1), Δ – 18,6 (кривая 2). б) изготовитель „Ukmergès gelžbetonis“, плотность, кг/м³: ○ – 13,2 (кривая 1), Δ – 18,3 (кривая 2)

Fig 5. Isothermal sorption of water vapour by expanded polystyrene dependent on relative air humidity. а) – producer „Polasta“, density 13,4 kg/m³ (curve 1) and 18,6 kg/m³ (curve 2) б) – producer „Ukmergès gelžbetonis“, density 13,2 kg/m³ (curve 1) and 18,3 kg/m³ (curve 2)

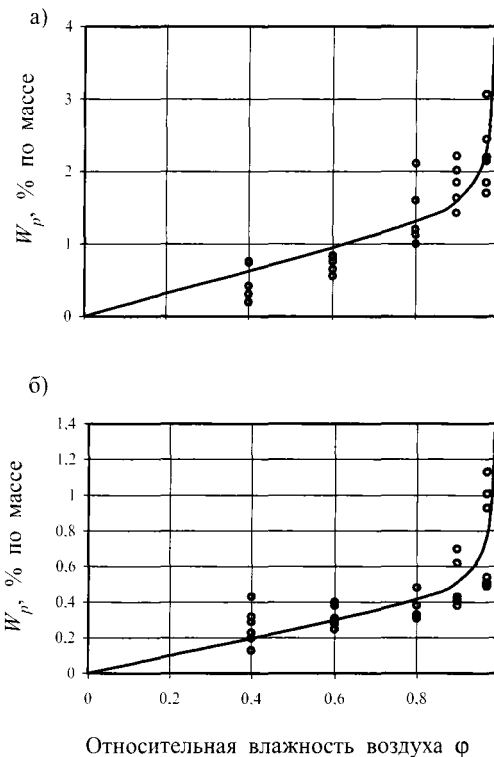


Рис. 6. Изотермы сорбции водяного пара: а) полистирольным пенопластом ПСБ-С плотностью – 12,4 кг/м³ („Styropex“, Польша); б) экструзионным полистиролом „Styrodur C“ плотностью – 34,2 кг/м³ („BASF AG“, Германия)

Fig 6. Isothermal sorption of water vapour by expanded (а) and extruded (б) polystyrene dependent on relative air humidity: а) density 12,4 kg/m³ („Styropex“, Poland); б) density 34,2 kg/m³ („BASF AG“, Germany)

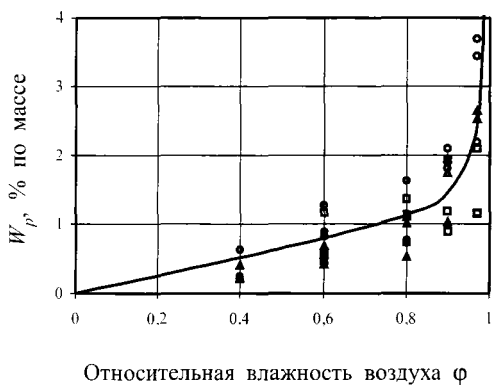


Рис. 7. Обобщенная изотерма сорбции водяного пара полистирольным пенопластом ПСБ-С: ○ – изготовитель „Polasta“, плотность – 13,4 кг/м³; Δ – то же, плотность – 18,6 кг/м³; □ – изготовитель „Ukmergès gelžbetonis“, плотность – 13,2 кг/м³

Fig 7. Generalized isothermal water vapour sorption curve for expanded polystyrene. Density: ○ – 13,4 kg/m³ („Polasta“); Δ – 18,6 kg/m³ („Polasta“); □ – 13,2 kg/m³ („Ukmergès gelžbetonis“)

2 таблица. Результаты статистической обработки экспериментальных данных по равновесному удельному влагосодержанию полистирольного пенопласта ПСБ-С

Table 2. Statistical treatment of equilibrium moisture experimental data results for expanded polystyrene

| Производитель | Плотность, кг/м ³ | Значения коэффициентов уравнения (1) | | S _{tar} , % по массе |
|---|------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------------------------------|
| | | b ₀ | b ₁ | |
| Литовско-российское АО "Polasta" | 13,4 | 1,410 | 0,959 | 0,401 |
| То же | 18,6 | 0,991 | 0,945 | 0,277 |
| АО "Ukmergės gelžbetonis" | 13,2 | 1,350 | 0,996 | 0,389 |
| То же | 18,3 | 0,798 | 0,996 | 0,217 |
| "STYROPEX", Zakład Pracy Chronionej, Olstyn (Польша) | 12,4 | 1,546 | 0,984 | 0,370 |
| Химический концерн "BASF AG" (Германия) – экструзионный полистирол "Styrodur C" | 34,2 | 0,486 | 0,981 | 0,149 |
| АО "Polasta", АО "Ukmergės gelžbetonis" | 13,4 18,6 13,2 | 1,272 | 0,970 | 0,498 |
| АО "Polasta", АО "Ukmergės gelžbetonis", "STYROPEX" (Польша) | 13,4 18,6 13,2 12,4 | 1,372 | 0,976 | 0,456 |

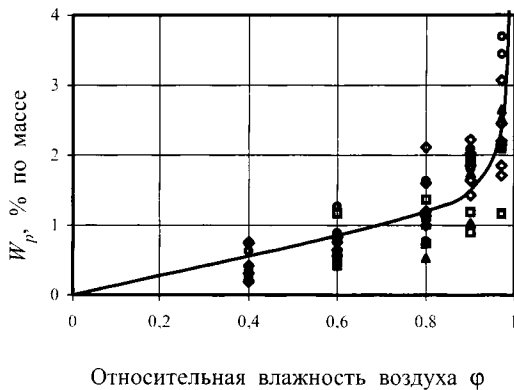


Рис. 8. Обобщенная изотерма сорбции водяного пара полистирольным пенопластом ПСБ-С, изготовленным в Литве и Польше: ○, △, □ – см. обозначения на рис. 7; ◇ – изготовитель „Styropex“, „Zakład Pracy Chronionej“, Olstyn (Польша), плотность – 12,4 кг/м³

Fig 8. Generalized isothermal water vapour sorption curve for expanded polystyrene produced in Lithuania and Poland: ○, △, □ – see Fig 7; ◇ – density 12,4 kg/m³ („Styropex“, Poland)

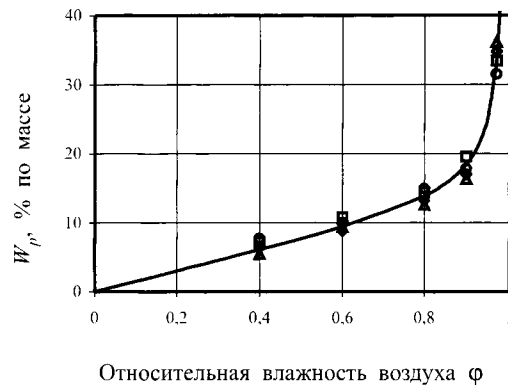


Рис. 9. Изотерма сорбции водяного пара эковатой. Плотность – 44 кг/м³: ○ – „Эковата“, Литва; △ – то же, данные исследований 1996 г; □ – „Walsekto“, Эстония. Плотность 35 кг/м³: ◇ – Selluvilla-SV, Финляндия

Fig 9. Isothermal sorption of water vapour by cellulosic fibre dependent on relative air humidity. Density 44 kg/m³: ○ – „Ekovata“, Lithuania; △ – too, data of 1996; □ – „Walsekto“, Estonia. Density 35 kg/m³: ◇ – Selluvilla-SV, Finland

3 таблица. Результаты статистической обработки экспериментальных данных по равновесному удельному влагосодержанию эковаты

Table 3. Statistical treatment of equilibrium moisture experimental data results for cellulose fibre

| Производитель | Плотность, кг/м ³ | Добавки, % по массе | | Значения коэффициентов уравнения (1) | | S_{tar} % по массе |
|--|---------------------------------|------------------------|------|---|-------|----------------------------|
| | | борная кислота | бура | b_0 | b_1 | |
| ЗАО "Эковата", Литва, исследования 1996, 2000 гг. | 44 | 12,0 | 8,0 | 14,84 | 0,96 | 1,1 |
| АО "Walsekto", Эстония | 44 | 9,2 | 9,2 | | | |
| "Selluvilla-SV", Финляндия [12] | 35 | 7,5 | 9,5 | | | |

3.3. Эковата

Исследована эковата, производимая ЗАО „Эковата“ (Литва) и АО „Walsekto“ (Эстония), а также проанализированы показатели по равновесному удельному влагосодержанию аналогичного материала Selluvilla-SV (Финляндия [12]). Экспериментальные значения равновесного удельного влагосодержания эковаты представлены на рис. 9. Значения коэффициентов b_0 и b_1 регрессионной зависимости (1) приведены в табл. 3.

Исследованная эковата обладает значительной гигроскопичностью (сорбированной), которая может достигать 35% по массе. Значительная часть сорбируемой влаги поглощается по капиллярному принципу при $\phi > 0,8$. Следует отметить сравнительно малый разброс экспериментальных значений равновесного влагосодержания эковаты различных производителей.

4. Выводы

Экспериментально определены изотермы сорбции водяного пара для группы неорганических и органических теплоизоляционных материалов – стекловолоконистых и минераловатных изделий, плит полистирольного пенопласта ПСБ-С, а также эковаты.

Из-за разных форм связи влаги в зависимости от влажности воздуха и неопределенности геометрии пористой структуры теплоизоляционных материалов, не позволяющих получить аналитического описания зависимости равновесного удельного влагосодержания от влажности воздуха, полученные опытные значения равновесного удельного влагосодержания исследованных теплоизоляционных материалов в

интервале относительной влажности воздуха ϕ от 0 до 0,97 на основании уравнений БЭТ, применяемых для описания изотерм полимолекулярной адсорбции, представлены двухконстантным регрессионным уравнением (1).

Полученные для исследованных теплоизоляционных материалов эмпирические значения коэффициентов b_0 и b_1 регрессионной зависимости (1) приведены в табл. 1–3.

Литература

1. А. В. Лыков. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Л. М. Никитина. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1968. 620 с.
3. А. У. Франчук. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: НИИСФ, 1969. 140 с.
4. ГОСТ 24816-81. Материалы строительные. Метод определения сорбционной влажности. М.: Изд-во стандартов, 1981. 6 с.
5. ГОСТ 4640-84. Вата минеральная. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1984. 6 с.
6. В. Г. Петров-Денисов, Л. А. Масленников. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. М.: Энергоатомиздат, 1983. 192 с.
7. V. Sakalauskas. Statistika su statistica. Vilnius, 1998. 228 p.
8. С. А. Айвазян. Статистическое исследование зависимостей. Применение методов корреляционного и регрессионного анализов и обработка результатов эксперимента. М.: Металлургия, 1968. 228 с.
9. И. С. Каммерер. Теплоизоляция в промышленности и строительстве / Пер. с нем. И. С. Утевского и др. М.: Стройиздат, 1965. 378 с.
10. DIN 4108:12.1985 Teil 4. Wärmeschutz im Hochbau. Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte. 18 S.

11. IST 1071174-2:1997. „Partek Paroc“ akmens vatos gaminiai, Techninės sąlygos. 21 p.
12. B. Svennerstedt. Field Data on Settling in Loose – Fill Thermal Insulation // Insulation Materials, Testing and Applications, ASTM STR 1030, D. L. Mc. Elroy and J. F. Kimpflen, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p. 231–236.

Получено 2000 09 26

LENGVŲ TERMOIZOLIACINIŲ MEDŽIAGŲ NUOSTOVUSIS DRĖGNIS

I. Gnipas, S. Vėjelis, V. Keršulis

Santrauka

Literatūrinių duomenų apie vandens garų sorbciją šiuolaikinėse lengvose termoizoliacinėse medžiagose yra nedaug. Straipsnyje ištirtos akmens ir stiklo vatos gaminių, polistireninio putplasčio plokščių ir ekovatos sorbcijos izotermos priklausomybė nuo aplinkos oro santykinio drėgnumo φ .

Kadangi drėgmė šiose medžiagose sujungta keliais būdais, tiksliai analizinė šios priklausomybės išraiška yra praktiškai neįmanoma [1, 6]. Todėl, remiantis BET lygtimis [1], ši priklausomybė φ intervalu nuo 0 iki 0,97 buvo išreikšta dvikonstante empirine lygtimi (1) [1, 7, 8].

Eksperimentiniai duomenys pateikti 1–9 pav., jų statistinio apdorojimo rezultatai – 1–3 lentelėse. Visoms sorbcijos izotermoms charakteringos dvi zonos: $0 < \varphi < 0,8$ (absorbcinis drėgnis) ir $0,8 < \varphi < 0,97$ (kapiliarinis drėgnis). Tyrinėtų stiklo vatos gaminių higroskopiskumas yra didesnis negu akmens vatos gaminių ir priklauso nuo gaminių tankio. Mažiausiai drėgmę iš aplinkos sorbuoja polistireninis putplastis, labiausiai – ekovata.

THE EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT OF LOW-DENSITY THERMAL INSULATING MATERIALS

I. Gnip, S. Vėjelis, V. Keršulis

Summary

Data about water vapour sorption by modern low-density thermal insulating materials are very scarce. The isothermal sorption of water vapour dependent on relative air hu-

midity was investigated for rock and glass wool products in this paper as well as for expanded and extruded polystyrene slabs and cellulose fibre produced in Lithuania, Poland and Estonia.

The moisture in these materials is bound by several ways, therefore it is not possible to express the equilibrium moisture W_p dependency on relative air humidity φ by an exact analytical equation [1, 6]. These dependencies were expressed by a two-constant empiric equation (1) for interval φ from 0 to 0,97 based on BET equations [1, 7, 8].

The experimental data are given in Figs 1–9, statistical treatment of this data results are given in Tables 1–3. The two fields are typical for all isothermal sorption curves: $0 < \varphi < 0,8$ moisture bound as adsorbate) and $0,8 < \varphi < 0,97$ (capillary bound moisture).

The hygroscopicity of investigated glass wool products is higher than for rock wool products and depends on their density. This value is very small for expanded polystyrene and is considerable for cellulose fibre.

.....
Ivan GNIP. Doctor. Head of Building Materials Employment Laboratory. Institute Termoizoliacija, Linkmenų g. 28, LT-2600 Vilnius, Lithuania. E-mail: termosplab@takas.lt

Doctor (1992). Author and co-author of about 67 publications. Research interests: building thermal insulation materials and products, thermal technical aspects of their employment.

.....
Sigitas VĖJELIS. Doctoral student. Institute Termoizoliacija, Linkmenų g. 28, LT-2600 Vilnius, Lithuania. E-mail: termosplab@takas.lt

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University, MSc (1999). Research interests: thermal properties of thermal insulation materials and products.

.....
Vladislovas KERŠULIS. Doctor (Senior researcher). Senior Researcher of Building Materials Employment Laboratory. Institute Termoizoliacija, Linkmenų g. 28, LT-2600 Vilnius, Lithuania. E-mail: termosplab@takas.lt

Doctor (1970). Author and co-author of about 72 publications. Research interests: thermal properties of thermal insulation materials and products.