

ББК Н711-022.53

### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ФАСАДА

**В.А. Езерский<sup>1</sup>, П.В. Монастырев<sup>2</sup>**

*Белостокский политехнический институт, Польша (1);  
Тамбовский государственный технический университет (2)*

*Рецензент В.В. Леденев*

**Ключевые слова и фразы:** количество влаги; минераловатные плиты; утеплитель; функции желательности.

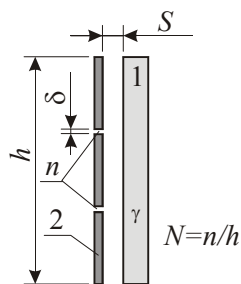
**Аннотация:** Проведены исследования влияния параметров вентилируемого фасада на изменение термического сопротивления утепленных наружных стен при воздействии ветра, дождевой воды и влаги.

В практике реконструкции жилых зданий с целью снижения их теплопотерь и улучшения архитектурного облика все чаще стали использоваться вентилируемые фасады. Данная конструкция включает в себя теплоизоляционный материал в виде прикрепляемых к стене минераловатных плит и декоративные облицовочные панели, располагаемые на отnose от утеплителя. Фиксация панелей осуществляется на специальных металлических каркасах, присоединяемых к несущей части стены. В результате получается многослойная ограждающая конструкция, в которой теплоизоляционный материал вентилируется наружным воздухом.

Вентилируемая воздушная прослойка, с одной стороны, позволяет уменьшить влажность материала стены, а с другой – может привести к продольной фильтрации воздуха через утеплитель и снижению тем самым его теплозащитных способностей. На теплоизоляционный материал через устраиваемые между облицовочными панелями открытые стыки, необходимые для циркуляции воздуха в прослойке, может попадать дождевая влага, способствующая намоканию утеплителя.

---

Езерский В.А. – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Основы строительства и строительная физика» Белостокского политехнического института (Польша); Монастырев П.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги» ТГТУ.



**Рис. 1** Исследуемые параметры:  
1 – минераловатные плиты;  
2 – облицовочные панели

Проведенные авторами исследования [1, 2] влияния параметров вентилируемого фасада на изменение термического сопротивления утепленных наружных стен при воздействии ветра, увлажнение теплоизоляционного слоя дождевой водой через стыки облицовочных панелей и увлажнение утепленных наружных стен диффундирующей парообразной влагой позволили выделить для каждой функции области наилучших значений параметров, повышающих эксплуатационные качества стен. Однако инте-

гральное использование результатов исследований применительно к конкретной конструкции оказалось затруднительно, что связано с различной степенью влияния каждого из параметров на теплозащитные и влажностные характеристики наружной стены.

С целью нахождения наилучших значений параметров вентилируемого фасада, удовлетворяющих одновременно условиям требуемой теплозащиты и условиям влажностного состояния наружных стен, выполнена многокритериальная оптимизация.

Оптимизировались следующие параметры вентилируемого фасада:

- ширина открытого стыка между облицовочными панелями  $\delta(X_1)$  (рис. 1);
- расстояние между тыльной поверхностью облицовочной панели и теплоизоляционным материалом  $S(X_2)$ ;
- отношение числа горизонтальных стыков между облицовочными панелями  $n$  к высоте  $h$  утепленной части стены здания  $N(X_3)$  (см. рис. 1).

Каждый из факторов варьировался на трех уровнях. Области определения факторов приняты следующие: фактора  $X_1 = 3 (-1), 7 (0), 11 (+1)$  мм; фактора  $X_2 = 20 (-1), 50 (0), 80 (+1)$  мм; фактора  $X_3 = 0,667 (-1), 1,333 (0), 2(+1)$ .

В качестве откликов рассматривались:

- величина снижения термического сопротивления слоя минераловатных плит при воздействии ветра  $\Delta R_k, (Y_{\Delta R}) \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ ;
- количество влаги, попадающей через стыки облицовочных панелей на  $1 \text{ м}^2$  утеплителя,  $q (Y_{dv}), \text{ м}^3$ ;
- максимальная влажность слоя утеплителя, образующаяся в результате диффузии парообразной влаги,  $w_{\max} (Y_w), \%$  по массе.

Величины снижения термического сопротивления слоя минераловатных плит при воздействии ветра  $Y_{\Delta R}$  в зависимости от указанных выше факторов приняты в соответствии с данными исследования [1]. Количество влаги, попадающей через стыки облицовочных панелей на  $1 \text{ м}^2$  утеплителя, при изменении рассматриваемых факторов  $Y_{dv}$  принято по данным исследования [2]. Значения максимальной влажности слоя утеплителя в результате диффузии водяного пара  $Y_w$  в зависимости от выбранных факторов определялись путем соответствующих расчетов с использованием программного продукта [3]. Матрица рассматриваемых факторов и значения откликов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Величины откликов  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv y}$ ,  $Y_w$  и функций желательности  $d_1, d_2, d_3, D$  в зависимости от рассматриваемых факторов  $X_1, X_2, X_3$**

№ п/п	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_{\Delta R}$	$Y_{dv y}$	$Y_w$	Значения частной функции желательности			$D$
							$d_1$	$d_2$	$d_3$	
1	-1	-1	-1	0,377	0,00003	1,065	0,6313	0,823987	0,5668	0,6656
2	-1	-1	0	0,454	0,00005	1,128	0,4305	0,822091	0,5100	0,5651
3	-1	-1	+1	0,633	0,00008	1,191	0,0319	0,819212	0,4500	0,2274
4	-1	0	-1	0,366	0,00000	0,725	0,6558	0,826797	0,7976	0,7562
5	-1	0	0	0,443	0,00000	0,757	0,4616	0,826797	0,7814	0,6681
6	-1	0	+1	0,622	0,00000	0,789	0,0425	0,826797	0,7642	0,2993
7	-1	+1	-1	0,271	0,00000	0,725	0,8188	0,826797	0,7976	0,8143
8	-1	+1	0	0,348	0,00000	0,726	0,6934	0,826797	0,7971	0,7702
9	-1	+1	+1	0,527	0,00000	0,727	0,2239	0,826797	0,7966	0,5283
10	0	-1	-1	0,414	0,00244	1,065	0,5404	0,446950	0,5668	0,5154
11	0	-1	0	0,491	0,00487	1,128	0,3238	0,033720	0,5100	0,1773
12	0	-1	+1	0,67	0,00731	1,191	0,0100	0,000001	0,4500	0,0014
13	0	0	-1	0,403	0,00151	0,725	0,5687	0,628390	0,7976	0,6581
14	0	0	0	0,48	0,00301	0,757	0,3555	0,323622	0,7814	0,4480
15	0	0	+1	0,659	0,00452	0,789	0,0146	0,063557	0,7642	0,0892
16	0	+1	-1	0,308	0,00099	0,725	0,7654	0,710641	0,7976	0,7570
17	0	+1	0	0,385	0,00197	0,726	0,6127	0,543424	0,7971	0,6426
18	0	+1	+1	0,564	0,00296	0,727	0,1351	0,334438	0,7966	0,3301
19	+1	-1	-1	0,451	0,00487	1,065	0,4390	0,033720	0,5668	0,2032
20	+1	-1	0	0,528	0,00974	1,128	0,2213	0,000000	0,5100	0,0000
21	+1	-1	+1	0,707	0,01461	1,191	0,0021	0,000000	0,4500	0,0000
22	+1	0	-1	0,44	0,00344	0,725	0,4700	0,233425	0,7976	0,4440
23	+1	0	0	0,517	0,00688	0,757	0,2507	0,000015	0,7814	0,0142
24	+1	0	+1	0,696	0,01032	0,789	0,0035	0,000000	0,7642	0,0000
25	+1	+1	-1	0,345	0,00237	0,725	0,6993	0,461789	0,7976	0,6363
26	+1	+1	0	0,422	0,00474	0,726	0,5193	0,043335	0,7971	0,2618
27	+1	+1	+1	0,601	0,00712	0,727	0,0687	0,000003	0,7966	0,0053

Для многокритериальной оптимизации процессов, характеризующихся несколькими откликами, наиболее удобно использовать обобщенную функцию желательности  $D$ , предложенную Харрингтоном [4]. Для ее построения необходимо преобразовать измеренные значения откликов  $Y$  в безразмерную шкалу желательности.

При построении шкалы желательности, которая устанавливает соотношение между значением отклика  $Y$  и соответствующим ему значением частной функции желательности  $d$ , используется метод количественных оценок с интервалом значений желательности от 0 до 1. Значение  $d=0$  (или  $D=0$ ) соответствует абсолютно неприемлемому значению данного отклика, а  $d=1$  (или  $D=1$ ) – самому лучшему значению отклика, причем

дальнейшее улучшение его или невозможно, или не представляет интереса. Промежуточные значения желательности и соответствующие им числовые отметки показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Базовые отметки шкалы желательности**

Количественная отметка на шкале желательности $d$	Желательность значения отклика
0,80 ... 1,00	Очень хорошее
0,63 ... 0,80	Хорошее
0,37 ... 0,63	Удовлетворительное
0,20 ... 0,37	Плохое
0,00 ... 0,20	Очень плохое

Для преобразования  $Y$  в  $d$  используются экспоненциальные зависимости. В случае, когда для отклика существует верхний или нижний пределы, которые являются единственными и не допускающими изменений критериями качества (отклик имеет одностороннее ограничение), то удобной формой преобразования  $Y$  в частную функцию желательности  $d$  является экспоненциальная зависимость:

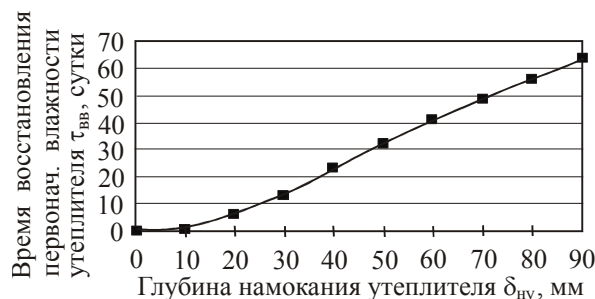
$$d = \exp[-\exp(-Y^*)], \quad (1)$$

$$\text{где } Y^* = b_0 + b_1 Y. \quad (2)$$

Коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$  можно определить, если для двух значений свойства  $Y$  задать соответствующие базовые значения желательности  $d$  предпочтительно в интервале  $0,2 < d < 0,8$ . При выборе этих значений  $d$  для  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv,y}$ ,  $Y_w$  учитывалось следующее.

Изменение термического сопротивления минераловатных плит  $Y_{\Delta R}$  под воздействием ветра носит временный характер. Данное воздействие в значительной степени ослабляет инерционность наружных стен. Установлено, что наименьшая инерционность для ограждающих конструкций жилых зданий г. Тамбова наблюдается в термомодернизированных панельных стенах, что составляет 5,749 или 6,358 единиц в зависимости от потребительского или поэтажного подхода к энергосбережению. Нами принято, что снижение инерционности ограждения под воздействием ветра на 5 % соответствует плохому значению отклика ( $d = 0,37$ ), а на 3 % – хорошему ( $d = 0,8$ ). Для этих условий найдены пороговые значения  $Y_{\Delta R}$ , считающиеся плохими ( $0,475 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ) и хорошими ( $0,285 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ).

При определении пороговых значений количества влаги, попадающей через стыки облицовочных панелей на  $1 \text{ м}^2$  утеплителя, ( $Y_{dv,y}$ ) учитывалось время, за которое влажность слоя утеплителя, подвергнувшегося увлажнению дождем, уменьшится до первоначального влажностного состояния. С помощью расчетов на ЭВМ с использованием программы «TW-VENT-PONS» [3] построен график (рис. 2) времени восстановления первоначальной влажности теплоизоляционного материала в вентилируемом фасаде в зависимости от глубины намокания его наружного слоя.



**Рис. 2** Время восстановления первоначальной влажности теплоизоляционного материала в вентилируемом фасаде в зависимости от глубины намокания его наружного слоя

График строился для термомодернизированного панельного здания в ЦЧР, утепление стен которого производилось минераловатными плитами толщиной 0,09 м. При его построении принималось, что первоначальная влажность в стене будет достигнута, если влажность слоя утеплителя  $w$ , % по массе, с относительной погрешностью 0,01 совпадет с первоначальной влажностью утеплителя. Расчеты влажностного режима стены производились для осенних месяцев, начиная с 1 сентября.

Согласно статистических данных за осенний период 2004 года в ЦЧР осадки выпадали с периодичностью 4,3 суток. По графику (см. рис. 2) установлено, что за 4,3 дня первоначальная влажность в утеплителе восстановится, если минераловатная плита намокнет на глубину не более чем 0,018 м, т.е. для намокания 1 м<sup>2</sup> утеплителя при водопоглощении по объему 1,5 % как минимум потребуется 0,00027 м<sup>3</sup> влаги. Нами было принято, что если на поверхность минераловатной плиты попадет 0,00027 м<sup>3</sup> дождевой влаги, то это хорошо ( $d = 0,8$ ), а если 0,0015 м<sup>3</sup> – удовлетворительно ( $d = 0,63$ ).

Оценка максимальной влажности утеплителя  $Y_w$  в результате диффузии водяного пара при нестационарных температурно-влажностных условиях производилась исходя из предположения, что очень плохим состоянием минераловатных плит считается то, при котором в их любом сечении влажность превышает максимальное сорбционное значение, а хорошим – когда влажность не выше сорбционного значения утеплителя при относительной влажности воздуха, соответствующей максимальному среднемесячному значению за отопительный период. По таблице данных о сорбции для условий г. Тамбова можно принять значение  $Y_w$  очень плохим ( $d = 0,2$ ), если оно равно 1,45 % и хорошим ( $d = 0,8$ ) – 0,72 %.

Принятые пороговые значения рассматриваемых функций и соответствующие им базовые отметки на шкале желательности показаны в табл. 3.

Подставим принятые значения  $d$  (см. табл. 3) в уравнение (1):

$$0,8 = \exp[-\exp(-Y_1^*)]; \quad 0,63 = \exp[-\exp(-Y_2^*)];$$

$$0,37 = \exp[-\exp(-Y_3^*)]; \quad 0,2 = \exp[-\exp(-Y_4^*)].$$

Таблица 3

**Пороговые значения  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv y}$ ,  $Y_w$ , соответствующие базовым отметкам  $d$  на шкале желательности**

Значение свойства	$Y_{\Delta R}$		$Y_{dv y}$		$Y_w$	
	0,285	0,475	0,00027	0,0015	0,72	1,45
Числовая отметка по шкале желательности $d$	0,8	0,37	0,8	0,63	0,8	0,2

После двойного логарифмирования получим:

$$Y_1^* = 1,500; \quad Y_2^* = 0,7725; \quad Y_3^* = 0,0057; \quad Y_4^* = -0,4759.$$

Далее, подставляя значения  $Y^*$  и  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv y}$ ,  $Y_w$  в уравнение (2), запишем:

$$\text{для } Y_{\Delta R} \begin{cases} b_{01} + b_{11} \cdot 0,285 = 1,5000 \\ b_{01} + b_{11} \cdot 0,475 = 0,0057 \end{cases}; \quad \text{для } Y_{dv y} \begin{cases} b_{02} + b_{12} \cdot 0,00027 = 1,5000 \\ b_{02} + b_{12} \cdot 0,0015 = 0,7725 \end{cases};$$

$$\text{для } Y_w \begin{cases} b_{03} + b_{13} \cdot 0,72 = 1,5000 \\ b_{03} + b_{13} \cdot 1,45 = -0,4759 \end{cases}.$$

Откуда получаем:  $b_{01} = 3,7415$ ,  $b_{11} = -7,8647$ ;  $b_{02} = 1,6597$ ,  $b_{12} = 591,4634$ ;  $b_{03} = 3,4488$ ,  $b_{13} = 2,7067$ .

Тогда формулы для преобразования откликов  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv y}$ ,  $Y_w$  в частные функции желательности  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  имеют вид:

$$\text{для } Y_{\Delta R} \quad d_1 = \exp[-\exp(-3,7415 + 7,8647 \cdot Y_{\Delta R})];$$

$$\text{для } Y_{dv y} \quad d_2 = \exp[-\exp(-1,6597 + 591,4634 \cdot Y_{dv y})];$$

$$\text{для } Y_w \quad d_3 = \exp[-\exp(-3,4488 + 2,7067 \cdot Y_w)].$$

На рис. 3 показаны функции желательности для рассматриваемых откликов  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv y}$ ,  $Y_w$ .

Обобщенную функцию желательности можно записать в виде

$$D_1 = \exp\left\{-\frac{1}{3}\left[\exp(-3,7415 + 7,8647 Y_{\Delta R}) + \exp(-1,6597 + 591,4634 Y_{dv y}) + \exp(-3,4488 + 2,7067 Y_w)\right]\right\}.$$

Результаты расчетов частных и обобщенной функций желательности, приведенные в табл. 1, показали, что максимального значения  $D = 0,8143$  обобщенная функция желательности достигает в 7-м опыте. Это означает, что в этой точке факторного пространства находятся оптимальные значения исследуемых факторов с учетом трех выбранных критериев оптими-

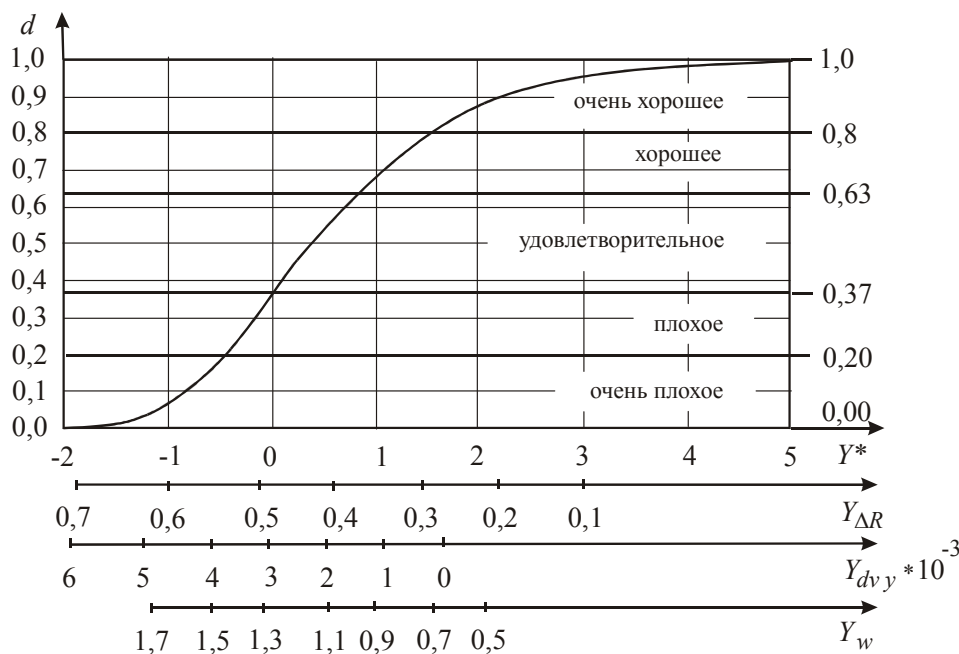


Рис. 3 Частные функции желательности для рассматриваемых откликов  $Y_{\Delta R}$ ,  $Y_{dv y}$ ,  $Y_w$

зации. При этом оптимальная ширина открытого стыка между облицовочными панелями оказалась равной  $\delta = 3$  мм; оптимальное расстояние между тыльной поверхностью облицовочной панели и теплоизоляционным материалом –  $S = 80$  мм; оптимальное отношение числа горизонтальных стыков между облицовочными панелями к высоте утепленной части стены здания –  $N = 0,667$ .

#### Список литературы

- 1 Езерский, В.А. Влияние вентилируемого фасада на теплозащитные качества утеплителя / В.А. Езерский, П.В. Монастырев // Жилищное строительство. – 2003. – №3. – С.18-20.
- 2 Езерский, В.А. Вентилируемый фасад и утеплитель / В.А. Езерский, П.В. Монастырев // Жилищное строительство. – 2005. – № 5. – С. 27–29.
- 3 Монастырев, П.В. Расчет баланса влагонакопления в вентилируемых ограждающих конструкциях зданий при нестационарных условиях (TW-VENT-PONS) / П.В. Монастырев, А.Н. Гузачев, В.А. Езерский / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610237. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 марта 2005 г.
- 4 Harrington, E.P. Industr. Quality Pontrol. – 1995, 21. – No. 10. – Pp. 494–498.

## Multi-Criteria Optimization of Ventilated Facade Parameters

V.A. Ezersky<sup>1</sup>, P.V. Monastyrev<sup>2</sup>

*Belostok Polytechnic Institute, Poland (1);  
Tambov State Technical University (2)*

**Key words and phrases:** amount of moisture; mineral wool boards; heat insulator; advisability function.

**Abstract:** Research into the impact of ventilated façade parameters on the changes in thermal resistance of heat-insulated external walls under the influence of wind, rain and moisture is completed.

---

© В.А. Езерский, П.В. Монастырев, 2006