

Сравнительный анализ методов расчета эффективности теплообмена в каркасно-щитовом домостроении

М.Н. Чекардовский, В.В. Миронов, Т.С. Жилина, И.Ю. Шалагин

Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ методов теплотехнического расчета и оценка эффективности теплообмена в каркасно-щитовом домостроении.

Ключевые слова: Каркасно-щитовое домостроение, воздухопроницаемость, эффективность теплообмена, тепловлажностный режим.

Энерго- и ресурсосбережение является одним из приоритетных направлений науки, техники и политики Российской Федерации. Основную долю потребления энергоресурсов в нашей стране составляет жилой фонд. Следует отметить, что инфильтрационные (трансмиссионные) теплотери могут составлять до 40 % от общих потерь тепла зданием. Поэтому при проектировании, реконструкции или доведении зданий к нормативным значениям энергопотребления необходимо учитывать такой важный критерий, как воздухопроницаемость ограждающих конструкций. Также необходимо учитывать возможные последствия, которые приводят к нарушению воздухообмена и, как следствие, к нарушению санитарно-гигиенических норм, а значит микроклимата в здании.

Важную роль в энергосбережении играет рациональная организация теплового и воздушного режима зданий, а также теплотехнические свойства строительных конструкций. При рассмотрении возможностей рационального использования топлива и энергии недопустимо снижение параметров микроклимата помещений.

В настоящее время выполняется интенсивное строительство многоэтажных и индивидуальных жилых домов. Многоэтажные жилые дома возводятся, как правило, по традиционной технологии с применением материалов высокой плотности и прочности.

При индивидуальном домостроении стали интенсивно применять технологию каркасного и каркасно-щитового домостроения. Дома возведенные по такой технологии имеют ряд своих преимуществ и недостатков. К основным преимуществам данной технологии относятся короткие сроки строительства и сокращенные капиталовложения по сравнению с традиционными технологиями возведения деревянных или каменных домов. К недостаткам каркасно-щитовых домов относятся повышенная воздухопроницаемость с определенными тепловлажностными режимами эксплуатации ограждающих конструкций. Поэтому выполнен сравнительный анализ методов расчета и оценки эффективности теплообмена в каркасно-щитовом домостроении.

В результате анализа известных методов теплотехнического расчета ограждающих конструкций выявлены имеющиеся различия в закономерностях передачи теплоты путем теплопроводности, конвекции и излучения. Это существенно осложняет математическое моделирование изучаемого процесса.

При оценке теплозащитных свойств ограждающих конструкций каркасного и каркасно-щитового исполнения использовался комплексный подход, позволяющий учесть большую часть составляющих в процессе теплообмена.

Известно, что через функцию ошибок Гаусса или функцию эрфектум решаются многие задачи в теории теплопроводности и в других областях физики. В литературе [1] встречается приближенная формула функции эрфектум:

$$\text{erf}(X) \approx \left[1 - \exp\left(-\frac{4X^2}{\pi}\right) \right]^{0.5} \quad (1)$$

где, $X = R_x/R_0$ – отношение термического сопротивления n-го слоя к термическому сопротивлению стены, $\pi = 3,14$.

При расчете температурных полей ограждающих конструкций применение существующих компьютерных программ некорректно. При расчете не учитывается фильтрация воздуха в материале ограждения, или задается определенной величиной, как это сделано в труде известного ученого Ушкова Ф. В. [2].

Для проверки достоверности формулы (1) использованы экспериментальные данные Ушкова Ф. В., причем $R_x/R_o = X$ в функции эрфектум. Определим температуры и тепловые потоки по сечению наружной стены из трехслойных керамзитобетонных панелей толщиной 0,32 м при инфильтрации и эксфильтрации воздуха с интенсивностью расхода $W = 9,167 \cdot 10^{-4}$ кг/м²·с, принимая $t_e = 18^\circ\text{C}$ и $t_n = -32^\circ\text{C}$.

Конструкция стены, считая по порядку слоев снаружи внутрь, следующая:

- слой керамзитобетона плотностью $\rho_1 = 1200$ кг/м³, теплопроводностью $\lambda_1 = 0,4652$ Вт/м·°C, толщиной $\delta_1 = 0,08$ м;

- слой крупнопористого керамзитобетона $\rho_2 = 600$ кг/м³, $\lambda_2 = 0,2326$ Вт/м·°C, $\delta_2 = 0,16$ м;

- слой керамзитобетона $\rho_3 = 1400$ кг/м³, $\lambda_3 = 0,5815$ Вт/м·°C, $\delta_3 = 0,08$ м.

Вначале рассчитывали сопротивление теплопередаче стены [3], м²·°C /Вт:

$$R_0 = R_{\text{в}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_{\text{н}}$$
$$= 0,043 + \frac{0,08}{0,4652} + \frac{0,16}{0,2326} + \frac{0,08}{0,5815} + 0,1144 = 1,1547$$

Тепловой поток при отсутствии фильтрации воздуха [3], Вт/м²:

$$q_0 = (t_e - t_n)/R_0 = ((18 - (-32))/1,1547 = 43,3$$

Коэффициент фильтрационного теплообмена, Вт/м²·°C:

$$K_{\text{фто}} = C_p \cdot W = 1015,8 \cdot 9,167 \cdot 10^{-4} = 0,9312$$

где C_p - удельная теплоемкость воздуха, $C_p = 1015,8$ Дж/(кг·°C).

Относительный коэффициент фильтрационного теплообмена

$$\chi = C_p \cdot W \cdot R_o = 0,9312 \cdot 1,1547 = 1,075.$$

Предварительно определяли значение $e^{C_p W R_o} = e^{1,075} = 2,93$.

В таблице 1 приведены результаты расхождения (δ_1 , %) относительных коэффициентов фильтрационного теплообмена $C_p W R_x$ и $erf_2(X)$ а также расхождения (δ_2 , %) по параметру $e^{C_p W R_x}$.

Результаты сравнения показывают, что $\delta_1 = 1,4 \div 21\%$, а $\delta_2 = 0,2 \div 12\%$.

Поэтому предлагается уточненная формула функции эрфектум:

$$erf_2(X) \approx \left(\frac{4x^2}{\pi} \right)^{0,5} \approx 1,1284X \quad (2)$$

Таблица №1

Обоснование достоверности уточненной функции эрфектум

R_x	$R_x/R_o = X$	$C_p W R_x$	$erf(x) = \left(1 - \frac{1}{e^{4x^2/\pi}}\right)^{0,5}$	$\delta_1 = \frac{erf(X) - C_p W R_x \cdot 100}{erf(X)}$	$e^{C_p W R_x}$	$erf(X)$	$\delta_2 = \frac{e^{erf(X)} - e^{C_p W R_x} \cdot 100}{e^{erf(X)}}$	$erf_2(X) = \left(\frac{4x^2}{\pi}\right)^{0,5} = 1,1284X$	$\delta_3 = \frac{erf_2(X) - C_p W R_x \cdot 100}{erf_2(X)}$	$e^{erf_2(X)}$	$\delta_4 = \frac{e^{erf_2(X)} - e^{C_p W R_x} \cdot 100}{e^{erf_2(X)}}$
$\frac{K^{\circ}C}{Вт}$	-	-	-	%	-	-	%	-	%	-	%
0	0	0	0	0	1	1	-	-	-	1	-
0,043	0,037	0,040	0,0420	4,8	1,041	1,043	0,2	0,0420	5,2	1,043	0,2
0,129	0,112	0,12	0,126	4,7	1,128	1,1342	0,46	0,1264	5,0	1,135	0,6
0,215	0,186	0,2	0,2076	3,7	1,221	1,2307	0,79	0,21	4,8	1,23	0,73
0,387	0,335	0,36	0,365	1,4	1,433	1,4405	0,52	0,378	4,2	1,46	1,85
0,559	0,484	0,520	0,5078	2,4	1,682	1,662	1,2	0,546	4,76	1,727	2,6
0,731	0,634	0,680	0,633	6,9	1,974	1,883	4,6	0,715	4,9	2,04	3,2
0,903	0,782	0,840	0,7355	12,5	2,316	2,087	12,4	0,882	4,8	2,417	4,2
0,972	0,84	0,9	0,77	14,4	2,46	2,16	13	0,948	5,1	2,582	4,7
1,04	0,9	0,970	0,8022	17,3	2,638	2,23	15,5	1,015	4,4	2,76	4,4
1,1547	1,0	1,075	0,849	21	2,93	2,34	20	1,1284	4,7	3,093	5,3

Как видно из таблицы 1 расхождения ($\delta_3 = 4,2 \div 5,2 \%$) относительных коэффициентов фильтрационного теплообмена C_pWR_x и $erf_2(X)$ а также расхождения ($\delta_4 = 0,2 \div 4,2 \%$) по $e^{C_pWR_x}$ и $e^{erf_2(X)}$

Таким образом, обоснована 20% достоверность формулы (1) и 5 % достоверность формулы (2). В результате анализа данных таблицы 1 установлено, что целесообразно использовать для дальнейших расчетов формулу (2).

В таблице 2 приведены результаты расчета температур и тепловых потоков по сечению наружной стены из керамзитобетонных панелей, имеющей сопротивление теплопередаче ограждения $R_0 = 1,1547 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ при инфильтрации и эксфильтрации воздуха с интенсивностью расхода воздуха $W = 9,167 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Таблица №2

Результаты расчета температур и тепловых потоков по сечению наружной стены с использованием уточненной функции эрфектум

$\frac{C_pWR_0}{e^{erf_2(x)}}$	$e^{erf_2(x)}$	$A_x = \frac{e^{erf_2(x)} - 1}{e^{C_pWR_0} - 1}$	$B_x = \frac{C_pWR_0}{e^{erf_2(x)}}$	$A_x \cdot B_x$	t_u	t_s	t_o	$B_x = \frac{e^{erf_2(x)}}{e^{C_pWR_0} - 1}$	$\Gamma_x = \frac{B_x}{e^{C_pWR_0} - 1}$	$q_u = C_pW \cdot (t_s - t_u) \cdot B_x$	$q_s = C_pW \cdot (t_s - t_u) \cdot \Gamma_x$
-	-	-	-	-	°C	°C	°C	-	-	Вт/м ²	Вт/м ²
1	1	0	3,093	0	-32	-32	-32	0,478	1,478	23	71,15
	1,043	0,021	2,965	0,061	-30,98	-28,96	-30,14	0,498	1,417	24	68,21
	1,135	0,064	2,725	0,176	-28,78	-23,2	-26	0,542	1,302	26,1	62,68
	1,23	0,11	2,515	0,277	-26,5	-18,15	-22,7	0,588	1,202	28,3	57,86
	1,46	0,22	2,119	0,466	-21	-8,7	-15,25	0,698	1,013	33,6	48,77
	1,727	0,347	1,791	0,622	-14,65	-0,9	-7,8	0,825	0,856	39,7	41,21
	2,04	0,497	1,516	0,753	-7,15	5,65	-0,3	0,975	0,725	46,9	34,9
	2,417	0,677	1,28	0,867	1,85	11,35	7,1	1,155	0,612	55,6	29,11
	2,582	0,756	1,198	0,906	5,8	13,3	10	1,234	0,572	59,6	27,54
	2,76	0,841	1,12	0,942	10,05	15,1	13	1,319	0,535	63,5	25,75
2,93	3,093	1	1	1	18	18	18	1,478	0,478	71,15	23

В таблице 3 приведены результаты расчета температур и тепловых потоков по сечению наружной стены из керамзитобетонных панелей по данным Ушкова Ф. В. Как видно из таблицы 2 и 3 расхождения температур и тепловых потоков $\delta = 1 \div 5 \%$, что является доказательством правомерности использования уточненной функции эрфектум.

В результате анализа расчетов температур и тепловых потоков по сечению наружной стены по данным Ушкова Ф. В. [2] и по уточненной функции эрфектум $erf_2(X)=1,1284X$ установлено, что необходимо принимать $X = R_x/R_0$, тогда функция эрфектум приобретает следующий вид $erf_2(R_x/R_0)=1,1284R_x/R_0$

Следует отметить, что значения $R_x = R_0$ при расчете распределения температур и тепловых потоков по сечению трехслойной керамзитобетонной панели, как показано в таблице 1. Для данного случая функция эрфектум приобретает следующий вид $erf_2(R_x/R_0)=1,1284$, что учтено при создании модернизированного алгоритма расчета температур и тепловых потоков по сечению ограждения. Использование функции эрфектум $erf_2(R_x/R_0)=1,1284R_x/R_0$ при $R_x = R_0$ позволяет определить относительный коэффициент фильтрационного теплообмена $C_pWR_0 = erf_2(R_x/R_0)=1,1284$ и определить интенсивность расхода воздуха, $(\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $W = erf_2(R_x/R_0)/C_pR_0 = 1,1284/C_pR_0$, где C_p - удельная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$. Результаты расчета, приведенные в таблице 3, получены по разработанному алгоритму.

Таблица №3

Результаты расчета температур и тепловых потоков по сечению наружной стены по данным Ушкова Ф. В.

$\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}$	$\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}$	$A_x = \frac{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}} - 1}{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}} - 1}$	$B_x = \frac{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}}{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}}$	$A_x \cdot B_x$	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{п}}$	$t_{\text{о}}$	$B_x = \frac{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}} - 1}{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}} - 1}$	$\Gamma_x = \frac{B_x}{\frac{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}} W R_{\text{ср}}} - 1}$	$q_{\text{вн}} = C_p W \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{вн}}) \cdot B_x$	$q_{\text{о}} = C_p W \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{вн}}) \cdot \Gamma_x$
-	-	-	-	-	°С	°С	°С	-	-	Вт/м ²	Вт/м ²
1	1	0	2,93	0	-32	-32	-32	0,52	1,52	24,2	70,71
	1,041	0,021	2,81	0,059	-30,94	-29,0	-30,13	0,54	1,46	25,12	67,92
	1,128	0,066	2,6	0,172	-28,7	-23,4	-26,4	0,585	1,35	27,21	62,8
	1,221	0,114	2,4	0,274	-26,3	-18,3	-22,7	0,633	1,245	29,42	57,92
	1,433	0,224	2,04	0,456	-20,8	-9,2	-15,25	0,743	1,06	34,54	49,31
	1,682	0,354	1,74	0,616	-14,3	-1,2	-7,8	0,87	0,905	40,47	42,1
	1,974	0,504	1,485	0,750	-6,8	5,5	-0,3	1,02	0,77	46,9	35,82
	2,216	0,682	1,265	0,860	2,1	11	7,1	1,2	0,656	55,82	30,47
	2,460	0,756	1,19	0,900	5,8	13	10	1,275	0,618	59,31	28,73
	2,638	0,846	1,11	0,940	10,3	15	13	1,365	0,576	63,5	26,75
2,93	2,93	1	1	1	18	18	18	1,52	0,52	70,71	24,2

Результаты сравнения расчетов представлены в таблице 4 и на рис. 1.

Таблица №4

Результаты значений температуры по различным методикам расчета

№ сечения	t по уточненной функции эрфектум	t по данным Ф.В. Ушкова	t по данным Elcut 5.1
	°С	°С	°С
$t_{\text{вн}}$	18	18	18
1	13	13	13,03
2	10	10	10,07
3	7,1	7,1	7,08
4	-0,3	-0,3	-0,32
5	-7,8	-7,8	-7,76
6	-15,25	-15,25	-15,2
7	-22,7	-22,7	-22,68
8	-26	-26,4	-26,38
9	-30,14	-30,13	-30,12
$t_{\text{н}}$	-32	-32	-32

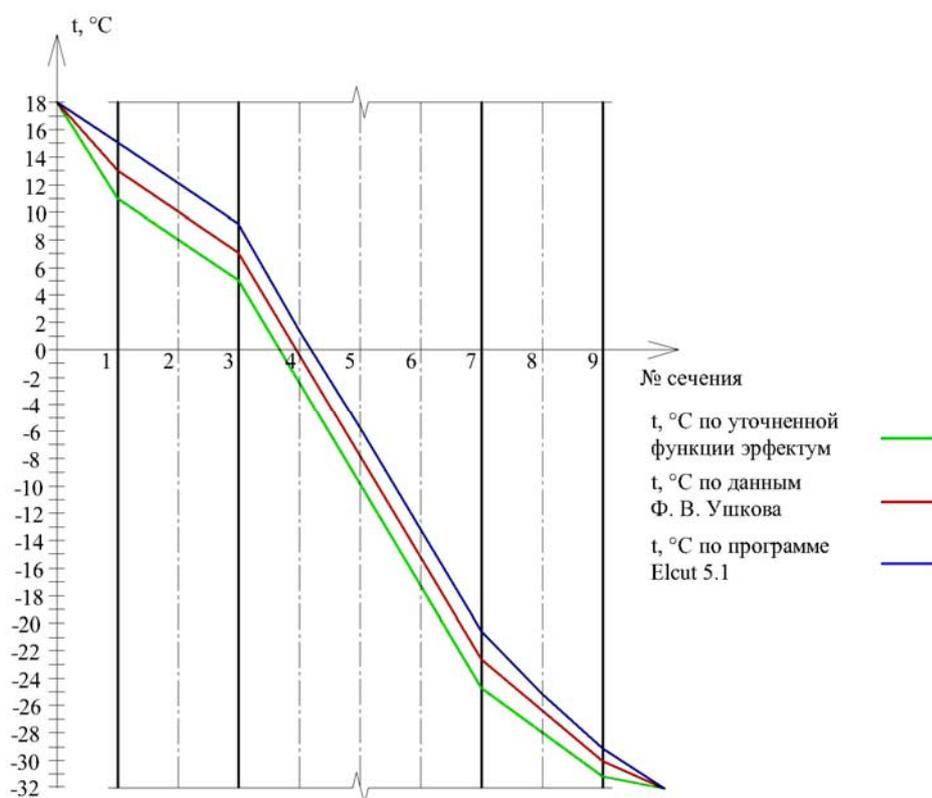


Рис. 1. – График распределения температур по сечению конструкции

Модернизирован алгоритм расчета параметров теплообмена в ограждающих конструкциях для строительства зданий по каркасно-щитовой технологии в условиях отсутствия и наличия фильтрации воздуха. Суть модернизации заключается в использовании уточненной функции ошибок Гаусса или функции эрфектум.

Алгоритм расчета имеет следующее содержание [3, 4]:

Исходные данные:

1. Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения для зимних условий приведен в своде правил: $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$
2. Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения приведен в своде правил: $\alpha_e = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$
3. Конструкция ограждения, считая по порядку слоев снаружи внутрь:
 - первый слой плотностью $\rho_1, \text{ кг}/\text{м}^3$, теплопроводностью $\lambda_1, \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}$, толщиной $\delta_1, \text{ м}$;

- второй слой ρ_2 , кг/м³, λ_2 , Вт/м·°С, δ_2 , м;

- n-слой ρ_n , кг/м³, λ_n , Вт/м·°С, δ_n , м.

4. Температуры наружного (t_n) и внутреннего воздуха ($t_в$), °С;

Расчетные уравнения

1. Термическое сопротивление теплопередаче всего ограждения от слоя наружного до внутреннего воздуха без его фильтрации, м²·°С/Вт:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_в} \quad (3)$$

2. Термическое сопротивление слоёв ограждения от наружного воздуха до рассматриваемой плоскости без фильтрации воздуха определяется отдельно по каждому слою, как показано в таблице 5 по примеру таблицы 2.1.

Таблица 5 Формулы расчета термического сопротивления слоёв

Слои	Распределение слоёв по температурам	Термическое сопротивление слоёв
1	2	3
Наружный воздух	t_n	0
Наружная поверхность	τ_n	$R_{xn} = 1/\alpha_n$
Середина 1 слоя	τ_1	$R_{x1} = R_{xn} + \delta_1/2\lambda_1$
Поверхность 2 слоя	τ_2	$R_{x2} = R_{x1} + \delta_1/2\lambda_1$
Четверть 2 слоя	τ_3	$R_{x3} = R_{x2} + \delta_2/4\lambda_2$
Середина 2 слоя	τ_4	$R_{x4} = R_{x3} + \delta_2/4\lambda_2$
3/4 2 слоя	τ_5	$R_{x5} = R_{x4} + \delta_2/4\lambda_2$
Поверхность 3 слоя	τ_6	$R_{x6} = R_{x5} + \delta_2/4\lambda_2$
Середина 3 слоя	τ_7	$R_{x7} = R_{x6} + \delta_3/2\lambda_3$
Внутренняя поверхность	$\tau_в$	$R_{xв} = R_{x7} + \delta_3/2\lambda_3$
Внутренний воздух	$t_в$	$R_x = R_0 = R_{xв} + 1/\alpha_в$

3. Функция эрфектум при условии $R_x = R_0$: $erf_2(R_x/R_0) = 1,1284$

4. Относительный коэффициент фильтрационного теплообмена всего

ограждения: $\chi = C_p W R_0 = \operatorname{erf}_2(R_x/R_0) = 1,1284$

5. Интенсивность расхода воздуха, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$: $W = 1,1284/C_p R_0$,

где $C_p \approx 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ - удельная теплоемкость воздуха.

6. Коэффициент фильтрационного теплообмена, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$: $K_{\text{фто}} = C_p \cdot W$

7. Значение соотношения: $e^{C_p W R_0}$

8. Относительный коэффициент фильтрационного теплообмена слоёв ограждения по данным таблицы 2: $C_p W R_x$

9. Значение соотношения: $e^{C_p W R_x}$

10. Температуры по сечению ограждения, $^\circ\text{C}$:

- при эксфильтрации воздуха: $t_s = t_n + (t_e - t_n) \cdot \frac{e^{C_p W R_x} - 1}{e^{C_p W R_0} - 1} \cdot \frac{e^{C_p W R_0}}{e^{C_p W R_x}}$

- при инфильтрации воздуха: $t_{ix} = t_n + (t_e - t_n) \cdot \frac{e^{C_p W R_x} - 1}{e^{C_p W R_0} - 1}$

- при отсутствии фильтрации воздуха: $t_0 = t_n + (t_e - t_n) \cdot \frac{R_x}{R_0}$

11. Величина теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

- при эксфильтрации воздуха: $q_s = \frac{C_p W (t_e - t_n)}{e^{C_p W R_0} - 1} \cdot \frac{e^{C_p W R_0}}{e^{C_p W R_x}}$

- при инфильтрации воздуха: $q_{ix} = C_p W (t_e - t_n) \cdot \frac{e^{C_p W R_x}}{e^{C_p W R_0} - 1}$

- при отсутствии фильтрации воздуха: $q_0 = \frac{t_e - t_n}{R_0}$

Выводы.

1. Авторами статьи выполнен сравнительный анализ методов расчета эффективности теплообмена в каркасно-щитовом домостроении.

2. Выполнено уточнение функции ошибок Гаусса или функции эрфектум $\operatorname{erf}(x)$ применительно к каркасно-щитовому домостроению.

3. Модернизирован алгоритм расчета параметров теплообмена в ограждающих конструкциях для строительства зданий по каркасно-щитовой

технологии в условиях отсутствия фильтрации воздуха, инфильтрации и эксфильтрации воздуха.

Литература

1. Бахмат Г.В., Кислицын А.А. и др. Исследование тепловых процессов на объектах трубопроводного транспорта. Уч. пособие. Под ред. Земенкова Ю.Д. - Тюмень: Вектор Бук, 2008. – 216 с.
 2. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. – М.: Стройиздат, 1969. – 144 с.
 3. М.Н. Чекардовский, П.Ю. Михайлов, И.Ю. Шалагин. Параметры теплообмена в наружных стеновых конструкциях каркасно-щитового типа // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Том 2. №2 – С. 39-49
 4. Шабаров А.Б., Кислицын А.А., Григорьев Б.В., Михайлов П.Ю. Тепломассоперенос в нефтегазовых и строительных технологиях. Учебное пособие Министерство образования и науки РФ, ТюмГУ, Ин-т физики и химии. - Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2014. - 331 с. ил.
 5. Шалагин И.Ю. Аспекты теплотехнического расчета легких ограждающих конструкций // Инженерный вестник Дона, 2015, №2, ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2994/.
 6. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов, М.: НИИ строительной физики, 1969 - 142 с.
 7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1982. – 416 с.
 8. Иванчук Е.В. К вопросу повышения энергетической эффективности жилых домов // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2151
-

9. Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

10. Kiefl K. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen: Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen, 1983. – 28 s.

11. Asan H. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials // Building and Environment. 2006 №41. pp. 615-620.

References

1. Bakhmat G.V., Kislitsyn A.A. i dr. Issledovanie teplovykh protsessov na ob'ektakh truboprovodnogo transporta. [Investigation of thermal processes at pipeline transport facilities]. Uch. posobie. Pod red. Zemenkova Yu.D. Tyumen': Vektor Buk, 2008. 216 p.

2. Ushkov F.V. Teploperedacha ograzhdayushchikh konstruktsiy pri fil'tratsii vozdukha [Heat transfer of enclosing structures in air filtration]. M.: Stroyizdat, 1969. 144 p.

3. M.N. Chekardovskiy, P.Yu. Mikhaylov, I.Yu. Shalagin. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika. 2016. Tom 2. №2. pp. 39-49

4. Shabarov A.B., Kislitsyn A.A., Grigor'ev B.V., Mikhaylov P.Yu. Teplomassoperenos v neftegazovykh i stroitel'nykh tekhnologiyakh. [Heat and mass transfer in oil, gas, and construction technologies]. Uchebnoe posobie Ministerstva obrazovaniya i nauki RF, TyumGU, In-t fiziki i khimii. Tyumen': Izd-vo TyumGU, 2014. 331 p.: il.

5. Shalagin I.Yu. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, ch.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2994/.



6. Franchuk A.U. Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazateley stroitel'nykh materialov [Tables of thermal performance of building materials]. M.: NII stroitel'noy fiziki, 1969. 142 p.
7. Bogoslovskiy V.N. Stroitel'naya teplofizika [Building Thermal Physics]. M.: Vysshaya shkola, 1982. 416 p.
8. Ivanchuk E.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2151
9. Yu.A. Tabunshchikov, M.M. Brodach. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy. [Mathematical modeling and optimization of the thermal performance of buildings] M.: AVOK-PRESS, 2002. 194 p.: il.
10. Kiefl K. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen: Dissertation Universitat-Gesamthochschule Essen, 1983. 28 s.
11. Asan H. Building and Environment. 2006 №41. pp. 615-620