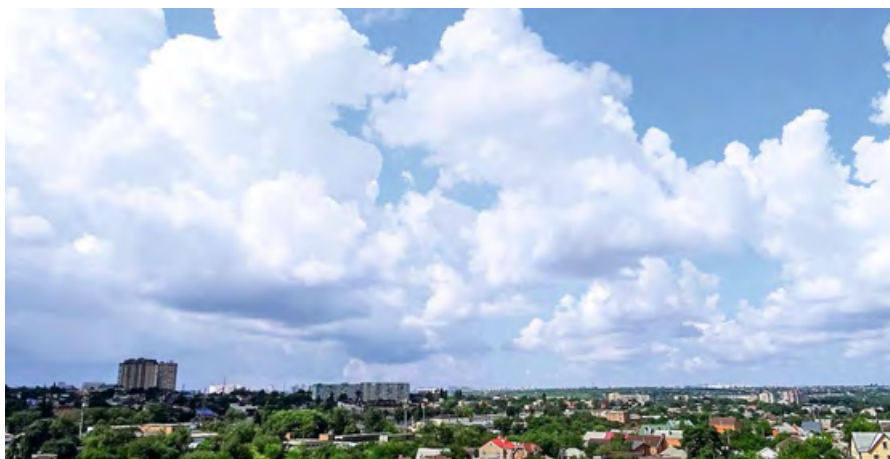




Исследование влияния облачности небосвода на тепловые потери зданий

На сегодняшний день при расчёте отопительной нагрузки зданий тепловые потери за счёт излучения не рассматриваются как отдельный вид теплопереноса, а учитываются только в совокупности с конвективной составляющей. Изучение влияния облачности небосвода на тепловые потери излучением позволит получить более детальное представление об их доле в суммарных потерях сооружений, в зависимости от разных погодных условий, найти материалы и виды внешних покрытий, которые бы обеспечивали наибольшую энергетическую эффективность.

излучения при прохождении воздушной среды влагосодержание принимается постоянным для любой исследуемой высоты облака.

Поскольку отношение теплового потока излучением, согласно проведённым расчётам, от внутренних помещений к тепловым потерям излучением от окон, стен или крыши здания составляет в среднем 10–20%, в расчёте излучения для города Анадырь была применена геометрия комнаты дома типа 111-121-1 ко всем зданиям. Расчёт распределения тепловых потерь излучением по высоте для стан-

Тепловые характеристики основных ограждающих конструкций дома 111-121

табл. 1

Поверхность	Суммарное термическое сопротивление ΣR_i , (м ² ·°C)/Вт	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°C)	Наружная температура стенки, °C
Окна	0,440	1,671	3,03
Стены	0,783	1,062	2,54
Крыша	2,820	0,336	1,97

Для оценки влияния облачности небосвода на тепловые потери излучением была разработана методика расчёта, с помощью которой был произведён оценочный упрощённый расчёт для жилого дома типовой серии 111-121 и полный расчёт для всех зданий в городе Анадырь.

С целью упрощения расчёта на данном этапе не учитывалось взаимное расположение и взаимное излучение зданий. Принимается, что теплообмен происходит исключительно между исследуемым объектом и небосводом. При расчёте потерь

дартизированного дома типа 111-121-1 (табл. 1) был произведён при температуре наружного воздуха +1,7°C для наиболее корректного результата, в связи с использованием данных распределения температуры по высоте, снятых при этой температуре. Температура внутри помещения принимается равной +20°C [1].

Применительно к расчёту для города Анадырь данные распределения температур и все неизвестные параметры были получены из местных метеорологических станций.

Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при поддержке Российского научного фонда (уникальный идентификатор гранта РНФ №16-19-20568).

Рецензия эксперта на статью получена 18.11.2019 [Expert review on the article received on November 18, 2019].

УДК 658.264. Научная специальность: 05.14.04.

Исследование влияния облачности небосвода на тепловые потери зданий

С. В. Гужов, к.т.н.; А. П. Раньо, студент магистратуры, кафедра теплообменных процессов и установок (ТМПУ), Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»)

Изучение влияния облачности небосвода на тепловые потери излучением позволит получить более детальное представление о их доле в суммарных потерях сооружениями в зависимости от разных погодных условий, найти материалы и виды внешних покрытий, которые бы обеспечивали наибольшую энергетическую эффективность.

Ключевые слова: теплообмен, излучение, тепловой баланс зданий.

УДК 658.264. Number of scientific specialty: 05.14.04.

Research influence of sky clouds on the heat loss of buildings

S. V. Guzhov, PhD; A. P. Ranko, graduated student, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)

A study of the influence of sky clouds on heat losses by radiation will provide a more detailed idea of their share in the total losses of structures depending on different weather conditions, and find materials and types of external coatings that would provide the highest energy efficiency.

Keywords: heat transfer, radiation, heat balance of buildings and structures.

1. Последовательность расчёта

Изначально необходимо иметь геометрические данные по исследуемому объекту (такие как суммарная площадь наружных стен, крыши, оконных проёмов, толщина и вид материалов изготовления и внешней отделки, количество и тип окон и площадь остекления), знать температуру, влажность наружного воздуха и владеть данными об относительной облачности и высоте расположения облаков.

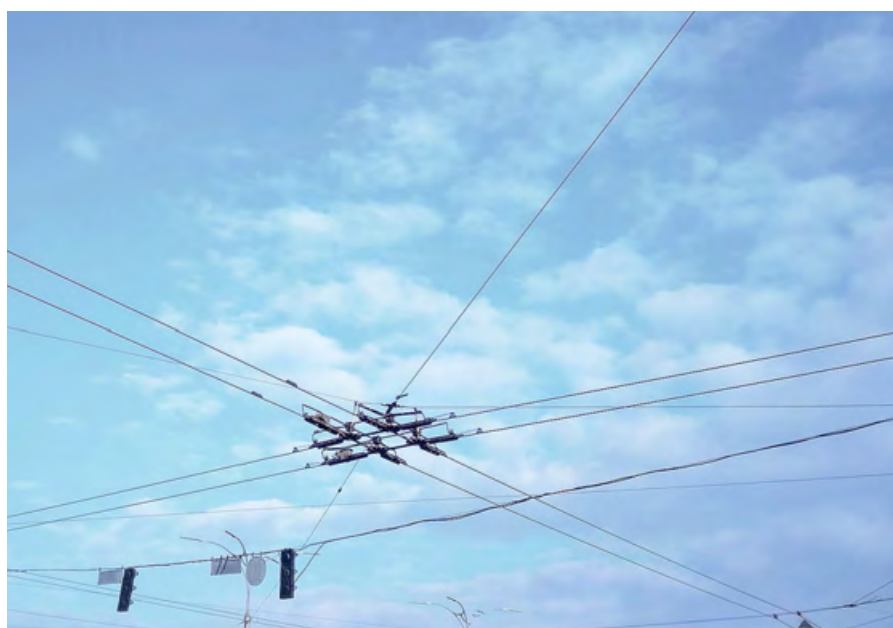
Необходимо рассчитать температуру наружных поверхностей ограждающих конструкций здания. Зная температуру наружных поверхностей ограждающих конструкций, можно записать уравнение тепловых потерь излучением согласно закону Стефана-Больцмана [2]. Суммарные тепловые потери излучением с поверхности здания могут быть найдены как сумма произведений удельных тепловых потоков на площадь поверхности, соответствующей им, и тепловых потерь излучением, проходящих через стекло [3]:

$$Q_{\text{изл}} = E_{\text{рез.ст}} F_{\text{ст}} + E_{\text{рез.ок}} F_{\text{ок}} + E_{\text{рез.кр}} F_{\text{кр}} + Q_{\text{ок}}, \text{ Вт}, \quad (1.1)$$

где $Q_{\text{ок}}$ — теплотери излучением от внутренних стен помещения через окна; $E_{\text{рез.ст}}$, $E_{\text{рез.ок}}$ и $E_{\text{рез.кр}}$ — результирующий поток между стенами, окнами и крышей здания и небосводом; $F_{\text{ст}}$, $F_{\text{ок}}$ и $F_{\text{кр}}$ — площадь поверхности стен, окон и крыши, соответственно.

2. Расчёт тепловых потерь излучением от внутренних стен, проходящим сквозь окна

Поскольку световой поток имеет ту же природу, что и излучение, можно сделать допущение, что отношение светового потока, приходящегося на окно, к световому



потoku, падающему на все стены, будет равно отношению плотности потоков излучений для тех же поверхностей. Таким образом, будет возможно описать соотношение излучения, приходящегося на окно, при взаимно перпендикулярном

и взаимно параллельном расположении стен внутренних комнат, от теплового потока, исходящего от всех стен помещения.

Количество теплоты от излучения, приходящегося на окно:

$$Q_{\text{вн.окна}} = E_{\text{рез.вн.ок}} \psi T_n \Sigma F_{\text{пом}}, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

где $E_{\text{рез.вн.ок}}$ — результирующий тепловой поток от внутренних стен к облакам согласно формуле (1.3); T — коэффициент направленного пропускания света, равный $T = 0,72$ [4]; $\Sigma F_{\text{пом}}$ — суммарная площадь всех стен помещения, за исключением той, в которую вмонтировано окно; n — количество окон в здании; ψ — отношение светового потока, приходящегося на окно, к суммарному потоку от всех стен.

При исследовании теплопереноса излучением важное значение имеют потери потока при прохождении среды. Поскольку в воздухе содержатся частицы влаги, которые поглощают часть теплового потока излучением между двумя исследуемыми объектами, необходимо учитывать потери данного рода и снижение плотности потока на различных высотах. Для этого относительная влажность воздуха принимается равной 60 %. Чтобы узнать долю содержания водяных частиц в воздухе, необходимо привести отношение к одинаковым величинам. В абсолютной объёмной доле влаги в воздухе это составит $\Psi = 1,4 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{м}^3$ (влаги/воздуха) [5].

Количество поглощённого излучения влагой, содержащейся в воздухе, можно определить, вычислив интеграл по высоте от потерь:

$$\Delta E_i = \int_0^{H_i} (E_i \Psi) dH, \quad (2.2)$$

где H_i — высота, м.

При исследовании теплопереноса излучением важное значение имеют потери потока при прохождении среды. Поскольку в воздухе содержатся частицы влаги, которые поглощают часть теплового потока излучением между двумя исследуемыми объектами, необходимо учитывать потери данного рода и снижение плотности потока на различных высотах

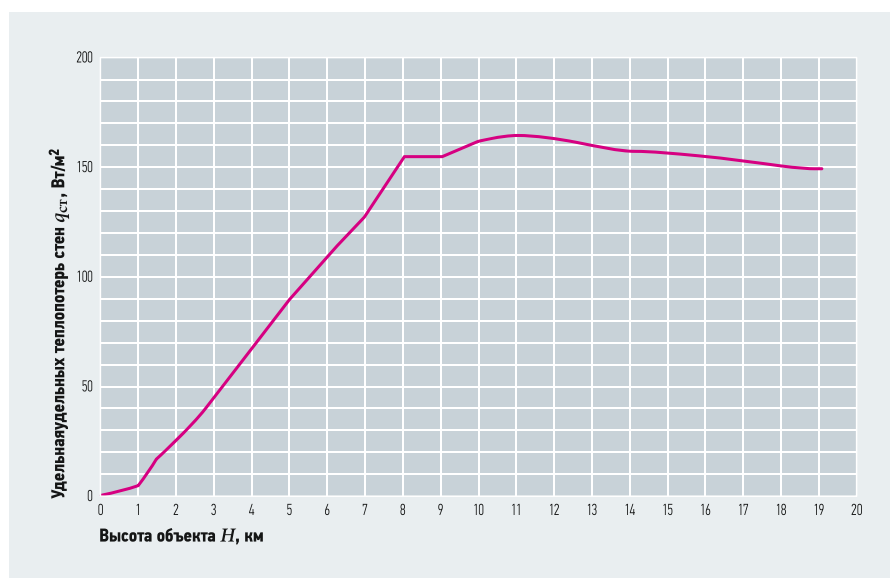


Рис. 1. Зависимость удельных теплотер стен от высоты объекта поглощения энергии

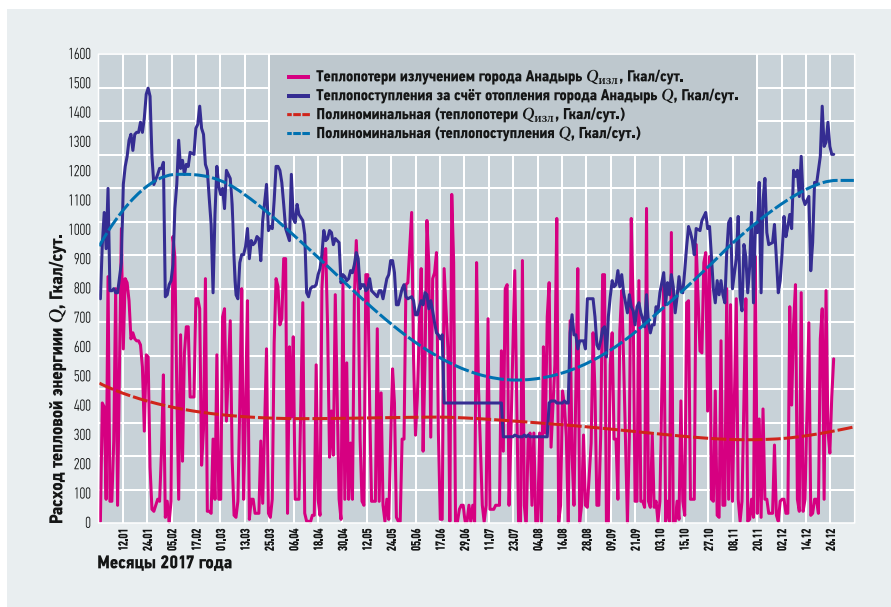


Рис. 2. Годовое распределение тепловых потерь города Анадырь

3. Расчёт суммарных тепловых потерь излучением сооружения

Суммарные тепловые потери от здания излучением будут равны:

$$Q_{изл} = q_{ст}F_{ст} + q_{ок}F_{ок} + q_{кр}F_{кр} + q_{через.ок}n\Sigma F_{пом}, \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

где $q_i = E_{рез,i} - \Delta E_i$, Вт/м², (рис. 1). (3.2)

Используя все вышеописанные зависимости, можно записать полное уравнение, описывающее тепловые потери излучением от всех излучающих поверхностей здания с учётом влияния воздушной среды и высоты облака:

$$Q_{изл} = \sigma_0 \left[\left(\epsilon_{ст} T_{ст}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) - \int_0^H \left(\epsilon_{ст} T_{ст}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) \Psi H \right] F_{ст} + \left[\left(\epsilon_{ок} T_{ок}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) - \int_0^H \left(\epsilon_{ок} T_{ок}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) \Psi H \right] F_{ок} + \left[\left(\epsilon_{кр} T_{кр}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) - \int_0^H \left(\epsilon_{кр} T_{кр}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) \Psi H \right] F_{кр} + \left[\left(\epsilon_{вн.ст} T_{вн.ст}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) - \int_0^H \left(\epsilon_{вн.ст} T_{вн.ст}^4 - \epsilon_0 T_H^4 \right) \Psi H \right] \times \psi T \Sigma F_{пом} n \Bigg\}, \text{ Вт}, \quad (3.3)$$

где $\epsilon_{ст}$, $\epsilon_{ок}$, $\epsilon_{кр}$, $\epsilon_{вн.ст}$ и ϵ_0 — степени черноты наружных стен, светопрозрачных конструкций, крыши, внутренних стен и облаков, соответственно; $T_{вн.ст}$ — температура поверхности внутренних стен, К; $T_{ст}$, $T_{ок}$ и $T_{кр}$ — температуры наружной поверхности стен, окон и крыши, соот-

ветственно, К; T_H — температура воздуха на высоте расположения облака, К; H — высота расположения облака, м; $F_{ст}$, $F_{ок}$ и $F_{кр}$ — суммарная площадь наружных стен здания (за исключением оконных проёмов), остекления и крыши здания, соответственно, м².

По данной методике был произведён расчёт тепловых потерь излучением дома типовой конструкции 111-121 с наружными стенами из железобетонных панелей толщиной 300 мм и пластиковыми окнами, а также для всех жилых зданий города Анадырь проведено сравнение с фактическими данными теплопритоков за счёт отопления для этого города (рис. 2).

Для принятых в расчёте условий высота 11 км характеризует полное поглощение излучения здания частицами влаги, находящимися в воздухе. На рис. 1 эта точка соответствует максимуму удельных тепловых потерь. Это связано с тем, что при больших высотах увеличение разности температур между объектами полностью нивелируется увеличением потерь при прохождении воздушной среды. Следует отметить, что зависимость тепловых потерь от высоты, что зависимость тепловых потерь от высоты, что зависимость тепловых потерь от высоты носит нелинейный характер (рис. 1) — на высотах до 1 км и от 8 до 11 км изменение потерь происходит менее значительно (табл. 2).

Тепловые потери излучением здания 111-12 при различных высотах облаков

табл. 2

Высота, км	t , °C	T , К	$Q_{изл}$, кВт	Высота, км	t , °C	T , К	$Q_{изл}$, кВт
0	1,7	274,85	2,524	5	-22,2	250,95	186,778
0,5	1,2	274,35	6,905	6	-29,3	243,85	228,778
1	0,6	273,75	12,200	7	-36,6	236,55	266,856
1,5	-2,2	270,95	37,476	8	-48,6	224,55	321,933
2	-4,1	269,05	54,171	9	-49,6	223,55	321,990
2,5	-6,4	266,75	73,500	10	-54,3	218,85	337,038
3	-9,1	264,05	94,959	11	-56,8	216,35	341,962
4	-15,3	257,85	140,843				

В первом случае это связано с малой разницей температур на поверхности Земли и на высоте 1 км. Во втором случае имеет менее значительное изменение температуры воздуха по высоте в силу её приближения к своему наименьшему значению в тропосфере. Максимальная высота теплообмена излучением между зданием и облаком будет увеличиваться по мере снижения влажности воздуха. При наличии перламутровых облаков в стратосфере, где температура повышается с увеличением высоты, тепловые потери от зданий будут уменьшаться при отсутствии облаков, располагающихся ниже.

Анализируя данные, полученные в ходе применения разработанной методики для жилых зданий города Анадырь, можно наблюдать, что наибольшие тепловые потери излучением соответствуют тёплой безоблачной погоде. Это связано с тем, что температура поверхности сооружений имеет наибольшее значение, а температура воздуха на большой высоте меняется незначительно, соответственно, разность температур между двумя рассматриваемыми объектами достигает максимума.

Продемонстрирован математический аппарат, детально учитывающий тепловые потери здания через механизм теплового излучения. Показано, что подобный расчёт требует предварительного глубокого анализа климата на рассматриваемой территории. Большой вклад в интенсивность теплопотерь излучением вносит как высота нижней границы облачного покрова, её прозрачность и процент облачности небосвода, так и влагосодержание в приземном слое воздуха.

Как следствие, очевидно различие результатов для городов, находящихся в сходных географических и климатических условиях, но различающихся по численности населения и мощности энергетической инфраструктуры. Показано, что проведение формульной расчёта не достигает инженерной точности ввиду существенного недостатка исходных данных и крайней трудоёмкости расчёта. ●

- ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. — М.: Стандартинформ, 2011.
- Цветков Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену: учебн. пособие. Изд. 2-е. / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. — М.: Изд-во МЭИ, 2008. 196 с.
- Смыков А.А. Особенности тепловых потерь излучением через светопрозрачные ограждающие конструкции [Электр. текст]. Форум 2017: Мат. IX Межд. научн. конф. Нижний Новгород, 2017. Российская академия естествознания. Режим доступа: scienceforum.ru. Дата обрац.: 28.11.2018.
- ГОСТ 24866–99. Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2004.
- Planetcalc. Онлайн-калькулятор [Электр. текст]. Режим доступа: planetcalc.ru. Дата обрац.: 01.12.2018.

References — see page 94.

Research influence of sky clouds on the heat loss of buildings. Pp. 66–68.

Serge V. Guzhov, PhD; **A. P. Ranko**, graduated student, the Department of Heat and Mass Transfer Processes and Installations, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI)

1. GOST [State Industry Standard of Russia No.] 30494–2011. *Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshheniyah* [Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2011. [In Russian]
2. F.F. Cvetkov, R.V. Kerimov, V.I. Velichko. *Zadachnik po teplomassoobmenu: uchebnoe posobie* [The problems book of heat and mass transfer: A training manual]. 2nd edition, rev. and exp. Moscow. *Izd-vo MPEI* [Publishing House of Moscow Power Engineering Institute]. 2008. 196 p. [In Russian]
3. A.A. Smykov. *Osobennosti teplovyh poter' izlucheniem cherez svetoprozrachnye ograzhdajushhie konstrukcii* [Features of heat loss by radiation through translucent enclosing structures]. *Forum 2017: Mat. IX Mezhd. nauchn. konf.* [Forum 2017: Proc. of the IX International Scientific Conference]. Nizhny Novgorod, 2017. *Rossiyskaja akademija estestvoznaniya* [Russian Academy of Natural Sciences]. Web-source: scienceforum.ru. Access data: November 28, 2018. [In Russian]
4. GOST [State Industry Standard of Russia No.] 24866–99. *Steklopakety kleenye stroitel'nogo naznachenija. Tehnicheskie uslovija* [Double-glazed windows glued for construction purposes. Technical conditions]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2004. [In Russian]
5. Planetcalc. *Onlajn-kalkul'jator* [Calculator online]. Web-source: planetcalc.ru. Access data: December 1, 2018. [In Russian]