

УДК 699.86

И. Л. ВАСИЛЬЕВА, Д. В. НЕМОВА, Н. И. ВАТИН

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого»

**СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
КОНСТРУКЦИИ ДВОЙНОГО ФАСАДА**

Аннотация. Растущее число высотных зданий с ограждающими конструкциями, выполненными из стекла, стремительно растет с каждым годом, поэтому задача энергосбережения становится все более актуальной. Инновационная фасадная система двойного фасада зарекомендовала себя как энергоэффективная. Она помогает значительно сократить энергетические нагрузки здания. В статье приводится систематизация сокращения энергетических нагрузок при использовании данной системы конструктивного энергосбережения в зависимости от типа климата. Также в работе представлена зависимость изменения энергетических нагрузок от ширины межконтурного пространства (0,2; 0,5; 1; 2 м) и от высоты здания (8; 168; 340 м).

Ключевые слова: двойной фасад, светопрозрачная конструкция, ограждающая конструкция, фасадная система, воздушный зазор, энергопотребление, климатические условия.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Число высотных зданий в мире стремительно растет. С каждым годом их становится на 8 % больше, такую статистику обнаружили ученые из Колумбийского университета в Нью-Йорке. А также выявлена закономерность, что средняя высота небоскреба каждый год увеличивается на один этаж (берется относительно 100 самых высоких зданий мира) [1].

Развитие и совершенствование светопрозрачных конструкций позволило превращать эти высотки в стеклянные шедевры архитектуры. Они выглядят сдержанно и выразительно, располагаются не только в новых кварталах с современной застройкой, но и становятся настоящим украшением исторических центров. Однако темп возведения зданий с ограждающими конструкциями из стекла опережает опыт, накопленный в области их проектирования и строительства. Высокая прозрачность ограждающих конструкций становится причиной больших энергетических нагрузок для здания (это касается отопления, охлаждения и вентиляции), что ведет к увеличенным эксплуатационным затратам.

Таким образом, перед учеными стоит задача найти конструкцию, которая сможет одновременно обеспечить комфортные условия нахождения в здании, будет экономичной, а также позволит сохранить эстетическую красоту. За последние несколько десятилетий в этой области был сделан качественный шаг вперед – переход от однослойной стеклянной стены к двойному стеклянному фасаду (в англоязычной литературе используется термин *Double Skin Facade, DSF*). Это малоизученная, но перспективная система конструктивного энергосбережения.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Конструкция двойного фасада имеет европейские истоки. Первопроходцем в этой области является Германия. За последние десять лет инновационная конструкция вызвала интерес у исследователей по всему миру [2–18].

Большое внимание данной теме уделили представители Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого [19–21].

В работе [22] приведена подробная классификация двойных фасадов.

Авторы статьи [23] вывели среднее значение экономии энергетических ресурсов при использовании инновационной фасадной системы, принимая во внимание большое количество экспериментов, которые были проведены в различных климатических условиях.

ЦЕЛИ

Целью работы является анализ характерных преимуществ фасадной системы двойного фасада и систематизация имеющихся данных по экспериментам с этой ограждающей конструкцией относительно разных климатов.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Конструкция двойного фасада – это комплексная система, состоящая из внешней остекленной оболочки и традиционного стеклянного фасада здания, который представляет собой внутреннюю оболочку. Эти два слоя разделены воздушной полостью, которая имеет фиксированные или контролируемые вентиляционные отверстия, и может включать или не включать затеняющие устройства (рисунок 1) [23, 24].



Рисунок 1 – Конструкция двойного фасада, DSF.

Расстояние между стеклянными поверхностями может варьироваться от нескольких сантиметров до двух метров.

Снижение тепловых нагрузок – одно из преимуществ инновационной фасадной системы. Солнечное излучение попадает в замкнутую полость, проходя через внешнюю стеклянную оболочку, которая преобразует излучение в тепло. Тепло накапливается и нагревает воздух, создавая конвективные потоки внутри полости. Такой рабочий механизм уменьшает теплопотери через внутреннюю обшивку здания. Кроме того, там, где нагретый воздух имеет удовлетворительные параметры, его можно подавать во внутренние помещения [23].

В зданиях с большой площадью наружного остекления велик риск появления неприемлемо высоких температур в помещениях в солнечные летние дни. При использовании конструкции двойного стеклянного фасада экономия на охлаждении происходит за счёт подачи свежего воздуха практически без помощи механических средств либо из-за извлечения нагретого воздуха из помещений через эффект естественной тяги (рисунок 2,а). Кроме того, даже когда внутренние помещения не имеют вентиляционных отверстий с замкнутой полостью, система двойного фасада все еще может работать как естественный вентилятор, охлаждая внутренний контур (рисунок 2б). Также конструкция фасада может быть оборудована затеняющими устройствами от лишней инсоляции – рольставни [22, 23].

Группы ученых по всему миру активно исследуют фасадную конструкцию двойного фасада на предмет сокращения энергопотребления здания. Как правило, исследования протекают в определенном регионе и в его климатических условиях, если речь идет о натурных испытаниях, либо соответствующие условия задаются для лабораторного эксперимента или численного моделирования. Этим можно

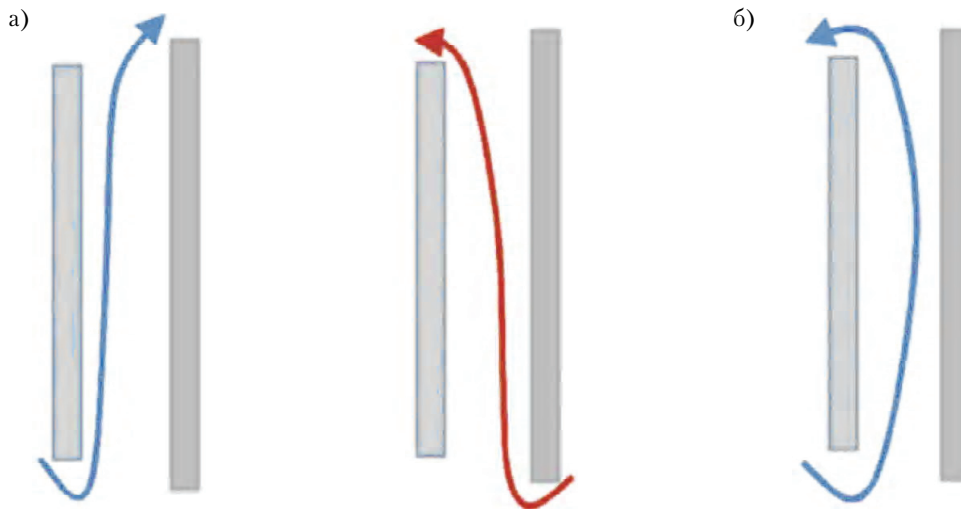


Рисунок 2 – Схема движения воздуха в межконтурном пространстве а) эффект естественной тяги б) циркуляция воздуха по наружной оболочке.

объяснить разброс результатов при проведении подобных экспериментов: в каких-то случаях конструкция проявила себя как более эффективная по сравнению с традиционным фасадом (single skin), а где-то ее применение практически не отразилось на энергетических показателях зданий (выявлены также случаи отрицательного влияния данной конструкции [10]). В работе [23] приведено осредненное значение по экономии тепловой энергии – 33 % и по экономии энергии на охлаждение здания – 28 % для большого числа экспериментов, проведенных в разных точках мира, поэтому данные значения не являются показательными для какого-то конкретного региона. Чтобы понимать, в каком климате и с какими целями предпочтительнее применять конструкцию двойного фасада, следует полученные ранее результаты ранжировать по типам климата.

Наиболее распространенная система классификации климатов была разработана немецко-российским ученым В. П. Кёппеном. В соответствии с ней существуют следующие типы климатических зон: А – тропический, В – сухой, С – умеренный, D – континентальный, Е – полярный.

Большинство экспериментов было проведено учеными в зоне с умеренным климатом. В зонах с тропическим и полярным климатом эксперименты не проводились. Распределим результаты по экономии тепловой энергии [2–13] в соответствии с климатическими зонами (рисунок 3):

Зона с умеренным климатом является наиболее благоприятной для использования системы конструктивного энергосбережения двойной фасад с целью экономии энергии на отоплении здания (среднее значение потенциальных тепловых нагрузок составляет 70,5 %).

Исследования с целью оценки потенциальной экономии на охлаждении здания в жаркий период при использовании системы двойного фасада в сухом и континентальном климатах практически отсутствуют. Проведен эксперимент [5] для сухого климата с результатом – 38 % (Тегеран, Иран); эксперимент для континентального климата [14] – 39 % (Южная провинция Чхунчхон, Южная Корея). Для умеренного климата проведено достаточное количество экспериментов (рисунок 4). Средний результат составляет – 31 %.

Конструкция двойного фасада приобрела популярность благодаря буферной зоне, созданной между внутренней и внешней стеклянными оболочками, улучшающей энергетические показатели здания и в то же время позволяющая зданию оставаться полностью прозрачным. Как показывают исследования, проведенные в Тель-Авиве, от ширины воздушной полости также зависят потенциальные возможности экономии энергетических ресурсов [22]. В таблице показаны отличия в энергетических нагрузках для здания на разных высотных уровнях при разной толщине замкнутой полости.

Результаты исследования показывают снижение энергетической нагрузки, как при нагреве, так и при охлаждении при увеличении ширины полости. Основное внимание уделяется охлаждению, поскольку тепловые нагрузки изначально низки. В правой части таблицы 1 показано процентное снижение нагрузок при изменении ширины полости с 0,2 м до 0,5 м, с 0,5 до 1,0 м и с 1,0 до 2,0 м. Наибольшее снижение происходит на первой высотной отметке (высота 8 м) при увеличении ширины полости с 0,2 до 0,5 м (11 %), в то время как снижение на более высоких уровнях 168 и 340 м не столь выражено.

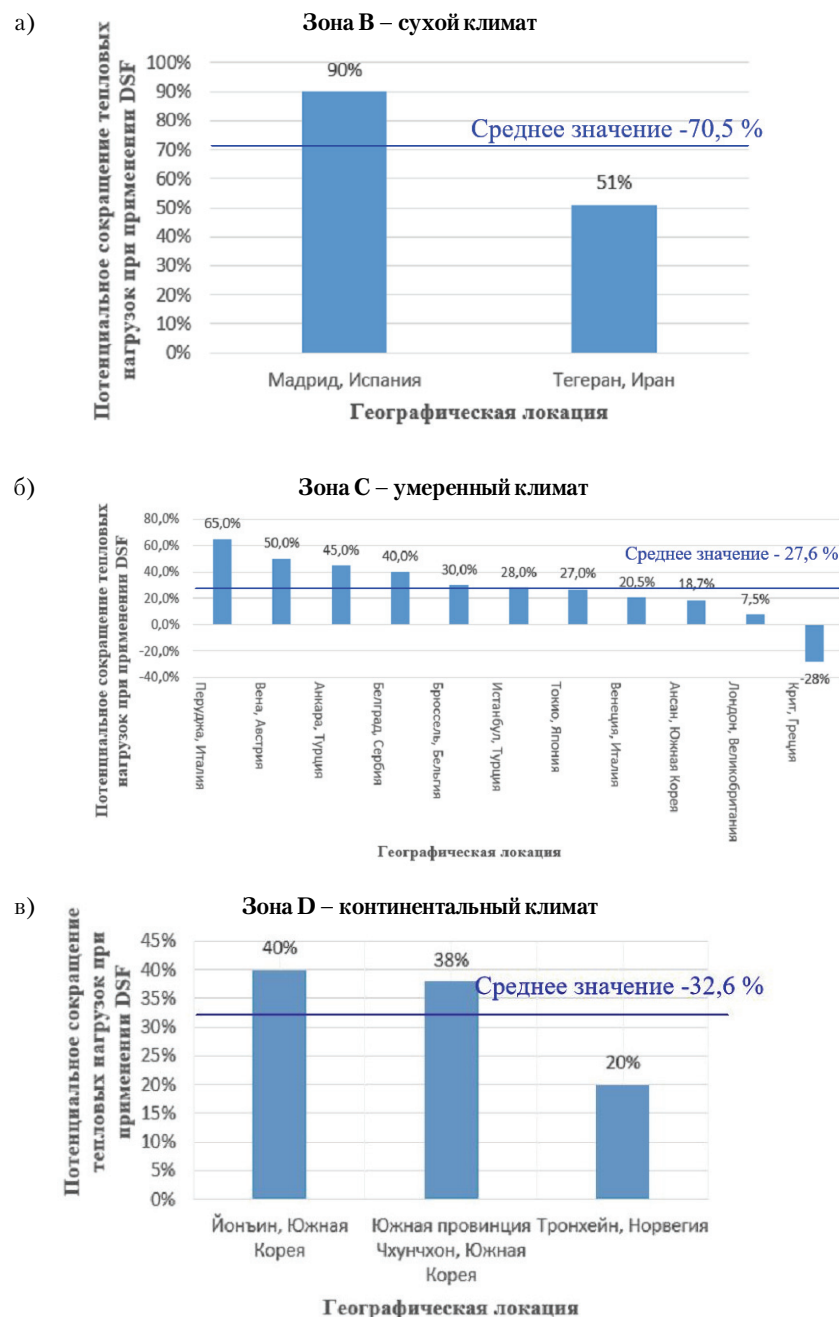


Рисунок 3 – Потенциальное сокращение тепловых нагрузок: а) в сухом климате; б) в умеренном климате; в) в континентальном климате.

С увеличением высоты энергетические нагрузки на обогрев здания уменьшаются, а на охлаждение здания увеличиваются при любой ширине межконтурного пространства.

ВЫВОДЫ

1. Систематизировав данные экспериментов, можно заключить следующее – инновационная конструкция двойного фасада лучше всего проявила себя в сухом климате. Средний показатель сокращения энергии на отопление составил 70,5 %. В умеренном климате конструкция уменьшает энергопотребление только на 27,6 % в среднем. С учетом сокращения затрат на охлаждение здания в теплый период лучше всего конструкция проявила себя в континентальном климате – 39 %. Однако важно отметить, что исследование в таком климате проводилось один раз и для получения более точных и достоверных результатов следует провести дополнительные натурные эксперименты. В умеренном

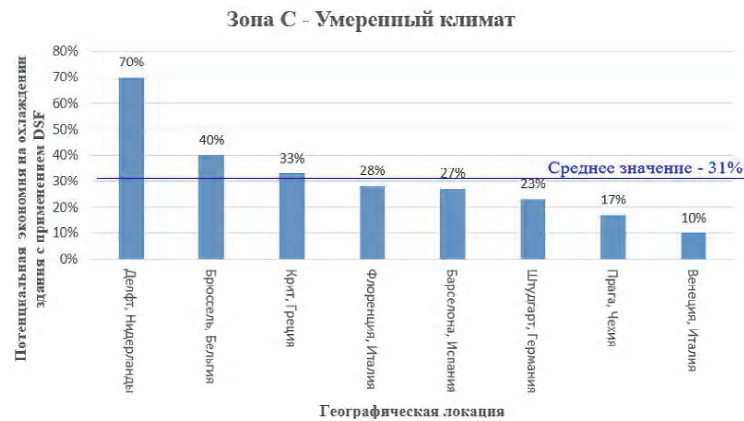


Рисунок 4 – Потенциальное сокращение энергетических затрат на охлаждение здания в жаркий период в умеренном климате.

Таблица – Сокращение энергетических нагрузок в зависимости от ширины полости и высоты здания

Толщина полости	Нагрев/охлаждение	Н = 8 м кВт·ч/м ² /год (МДж)	Н = 168 м кВт·ч/м ² /год (МДж)	Н = 340 м кВт·ч/м ² /год (МДж)	Переход	Сокращение энергетических нагрузок		
						Н = 8 м	Н = 168 м	Н = 340 м
0,2 м	Н	0,66 (2,37)	1,63 (3,86)	2,59 (9,32)				
	О	53,9 (194)	38,39 (138,2)	32,67 (117,61)	0,2 м → 0,5 м	-9,1 %	-11,6 %	-8,5 %
0,5 м	Н	0,6 (2,16)	1,44 (5,18)	2,37 (8,53)		-11 %	-5,3 %	-3,9 %
	О	47,92 (172,5)	36,34 (130,8)	31,38 (112,9)	0,5 м → 1,0 м	-15 %	-9 %	-8,4 %
1,0 м	Н	0,51 (1,84)	1,31 (4,71)	2,17 (7,81)		-4,1%	-4,7 %	-4,4 %
	О	45,93 (165,3)	34,62 (124,6)	29,99 (107,96)	1,0 м → 2,0 м	-60%	-6,1 %	-8,3 %
2,0 м	Н	0,2 (0,72)	1,23 (4,43)	1,99 (7,16)		-6,4%	-6,8 %	-6,2 %
	О	42,98 (154,7)	32,25 (116,1)	28,11 (191,2)				

*1 кВт·ч = 3,6 МДж

климате показатель сокращения энергопотребления составил 31 %. Таким образом, можно с большей степенью уверенности утверждать, что конструкция двойного фасада действительно является энергосберегающей. В ходе анализа литературы был выявлен лишь один отрицательный результат.

2. Анализ исследования влияния ширины межконтурного пространства на сокращение энергетических нагрузок показал, что более широкие полости DSF наилучшим образом подходят для жаркого климата, так как они снижают высокие охлаждающие нагрузки, требующиеся в этом климате для комфортного пребывания в помещении.

3. Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования будут являться важным вкладом в процесс внедрения данных конструкций в практику проектирования и строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование, строительство и эксплуатация высотных зданий с учетом аэродинамических аспектов [Текст] / М. К. Михайлова, В. С. Далинчук, А. В. Бушманова, Л. В. Доброгорская // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 10(49). – С. 59–74.
2. Perez-Grande, I. Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades [Текст] / I. Perez-Grande, J. Meseguer, G. Alonso // Applied Thermal Engineering. – 2005. – № 25. – P. 3163–3175.
3. Analytical solution for energy modeling of double skin facades building [Текст] / H. Ghadadian, M. Ghadimi, M. Shakouri, M. Moghadasi // Energy and Buildings. – 2016. – № 50. – P. 158–165.

4. Baldinelli, G. Double skin facades for warm climate regions: analysis of a solution with an integrated movable shading system [Текст] / G. Baldinelli // Building and Environment. – 2009. – № 44(6). – P. 1107–1118.
5. Development of simple calculation model for energy performance of double skin facades [Текст] / A. S. Andjelkovic, T. B. Cvjetkovic, D. D. Djakovic, I. H. Stojanovic // Thermal Science. – 2016. – № 16. – P. S251–S267.
6. Yılmaz, Z. Double skin façade's effects on heat losses of office buildings in Istanbul [Текст] / Z. Yılmaz, F. Çetintaş // Energy and Buildings. – 2005. – № 37(7). – P. 691–697.
7. Possibilities and limitations of natural ventilation in restored industrial archaeology buildings with a double-skin façade in Mediterranean climates [Текст] / G. Ballestini, De Carli M., N. Masiero, G. Tombola // Building and Environment. – 2005. – № 40(7). – P. 983–995.
8. Effects of double skin envelopes on natural ventilation and heating loads in office buildings [Текст] / Y-M. Kim, J-H. Lee, S-M. Kim, S. Kim // Energy and Buildings. – 2011. – № 43(9). – P. 2118–2126.
9. Zerefos, S. C. On the performance of double skin facades in different environmental conditions [Текст] / S. C. Zerefos // International Journal of Sustainable Energy. – 2007. – № 26(4). – P. 221–229.
10. Paradaki, N. A parametric study of the energy performance of double-skin façades in climatic conditions of Crete, Greece [Текст] / N. Paradaki, S. Papantoniou, D. Kolokotsa // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2014. – № 9(4). – P. 296–304.
11. Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season [Текст] / W. Choi, J. Joe, Y. Kwak, J.-H. Huh // Energy and Buildings. – 2012. – № 9(4). – P. 454–465.
12. Kim, G. Development of a double-skin facade for sustainable renovation of old residential buildings [Текст] / G. Kim, L. A. Schaefer, J. T. Kim // Indoor and Built Environment. – 2013. – № 22. – P. 180–190.
13. Høseggen, R. Building simulation as an assisting tool in decision making – case study: with or without a double-skin facade? [Текст] / R. Høseggen, B. J. Wachenfeldt, S. O. Hanssen // Energy and Buildings. – 2008. – № 40(5). – P. 821–827.
14. Stec W. J. Symbiosis of the double skin façade with the HVAC system [Текст] / W. J. Stec, van Paassen AHC // Energy and Buildings. – 2005. – № 37 (5). – P. 461–469.
15. Balocco, C. A simple model to study ventilated facades energy performance [Текст] / C. Balocco // Energy and Buildings. – 2002. – № 34 (5). – P. 469–475.
16. Numerical analysis of the thermal behaviour of glazed ventilated facades in Mediterranean climates. Part II: applications and analysis of results [Текст] / D. Faggembauu, M. Costa, M. Soria, A. Oliva // Solar Energy. – 2003. – № 75. – P. 229–239.
17. Façades and summer performance of buildings [Текст] / U. Eicker, V. Fux, U. Bauer, L. Mei [et. al.] // Energy and Buildings. – 2008. – № 40. – P. 600–611.
18. Hensen, J. Modeling and simulation of double-skin facade system [Текст] / J. Hensen, M. Bartak, F. Drkal // ASHRAE Transactions. – 2002. – № 108. – P. 1251–1259.
19. Проектирование, строительство и эксплуатация высотных зданий с учетом аэродинамических аспектов [Текст] / А. О. Курицын, Н. Ю. Павлова, И. А. Опанасенко, В. В. Болотовский [и др.] // Alfabuild. – 2018. – № 6(7). – С. 47–58.
20. The results of experimental determination of air output and velocity of flow in double skin facades [Текст] / М. Petrichenko, N. Vatin, D. Nemova, V. Olshevskiy // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – № 725–726. – P. 93–99.
21. Васильева, И. Л. Внедрение двойных стеклянных фасадов на территории Российской Федерации [Текст] / И. Л. Васильева, Д. В. Немова, Н. И. Ватин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2019. – № 9(84). – С. 51–62.
22. Studies on the optimum double-skin curtain wall design for high-rise buildings in the Mediterranean climate [Текст] / T. Saroglou, T. Theodosiou. B. Givoni, I. A. Meir // Energy and Buildings. – 2020. – № 208. – P. 1–11.
23. Energy performance of Double-Skin Facades in temperate climates: a systematic review and meta-analysis [Текст] / F. Pomponi, Poorang A. E. Piroozfar, R. Southall, P. Ashton // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 54. – P. 1525–1536.
24. Double Skin Facades: Selecting the Right Combination of Glass to Optimise their Benefits [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://igsmag.com/market-trends/innovations-in-glass/double-skin-facades-selecting-the-right-combination-of-glass-to-optimise-their-benefits/>. – Официальная страница.

Получена 01.04.2020

І. Л. ВАСИЛЬЄВА, Д. В. НЕМОВА, М. І. ВАТІН
ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЛІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
КОНСТРУКЦІЇ ПОДВІЙНОГО ФАСАДУ
ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого»

Анотація. Число висотних будівель з огорожувальними конструкціями, виконаними зі скла, стрімко зростає з кожним роком, тому завдання енергозбереження стає все більш актуальним. Інноваційна

фасадна система подвійного фасаду зарекомендувала себе як енергоефективна. Вона допомагає значно скоротити енергетичні навантаження будівлі. У статті наводиться систематизація скорочення енергетичних навантажень при використанні даної системи конструктивного енергозбереження залежно від типу клімату. Також в роботі представлена залежність зміни енергетичних навантажень від ширини міжконтурного простору (0,2; 0,5; 1; 2 м) і від висоти будівлі (8; 168; 340 м).

Ключові слова: подвійний фасад, світлопрозора конструкція, огорожувальна конструкція, фасадна система, повітряний зазор, енергоспоживання, кліматичні умови.

IRINA VASILYEVA, DARYA NEMOVA, NIKOLAY VATIN REDUCING ENERGY CONSUMPTION OF BUILDINGS WITH A DOUBLE-SKIN FACADE DESIGN

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract. The growing number of high-rise buildings with enclosing structures made of glass is growing rapidly every year, so the task of energy conservation is becoming more and more urgent. The innovative double-skin facade system has proven to be energy-efficient. It helps to significantly reduce the energy load of the building. The article presents a systematization of reducing energy loads when using this system, depending on the type of climate. The paper also presents the dependence of changes in energy loads on the width of the inter-circuit space (0.2, 0.5, 1, 2 m) and on the height of the building (8, 168, 340 m).

Key words: double-skin facade, translucent structure, enclosing structure, facade system, air gap, energy consumption, climate conditions.

Васильева Ирина Леонидовна – соискатель высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: исследование мировых тенденций повышения энергоэффективности зданий и сооружений с применением инновационных материалов и конструкций.

Немова Дарья Викторовна – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: исследование процессов тепло- и массопереноса в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов.

Ватин Николай Иванович – доктор технических наук, профессор высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: энергоэффективные и энергосберегающие технологии, разработка научных основ расхода жидкости (воздушных потоков) корреляционными методами.

Васильєва Ірина Леонідівна – здобувач вищої школи промислово-цивільного та дорожнього будівництва ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: дослідження світових тенденцій підвищення енергоефективності будівель і споруд із застосуванням інноваційних матеріалів і конструкцій.

Немова Дар'я Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент вищої школи промислово-цивільного та дорожнього будівництва ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: дослідження процесів тепло- і масопереносу в повітряному прошарку навесних вентильованих фасадів.

Ватін Микола Іванович – доктор технічних наук, професор Вищої школи промислово-цивільного і дорожнього будівництва ФДАОУ ВО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: енергоефективні та енергозберігаючі технології, розробка наукових основ витрати рідини (повітряних потоків) кореляційними методами.

Vasilyeva Irina – graduate student, High School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Scientifics interests: research of global trends in energy efficiency of buildings and structures using innovative materials and structures.

Nemova Darya – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Scientifics interests: research of heat and mass transfer processes in the air layer of ventilated facades.

Vatin Nikolay – D. Sc. (Eng.), Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Scientific interests: energy-efficient and energy-saving technologies, development of scientific bases of liquid flow (air flow) by correlation methods.