

Динамический анализ влияния загрязнения воздуха на уровень естественной освещённости в офисе открытой планировки в Лондоне

Ц. ДУ, С. ШАРПЛС

Школа архитектуры Ливерпульского университета, Великобритания
E-mail: jiangtao.du@liverpool.ac.uk

Аннотация

Осаждение загрязнителей воздуха на остеклении может существенно повлиять на пропускание естественного света через оконные проёмы в зданиях в городских районах. Это исследование представляет собой имитационный анализ влияния загрязнения воздуха и коэффициента пропускания остекления на проникновение естественного света в помещения офиса открытой планировки в Лондоне. Во-первых, были разработаны и оценены прямые связи между коэффициентом пропускания остекления и условиями естественного освещения. Во-вторых, было разработано несколько простых алгоритмов для оценки потери естественного света из-за осаждения загрязняющих веществ на внешней поверхности вертикального остекления. Наконец, были разработаны некоторые выводы и проектные стратегии для сопровождения планирования фасадов на ранней стадии проектирования городского строительного проекта.

Ключевые слова: проникновение естественного света, загрязнение воздуха, динамическое моделирование, офисы открытой планировки, Великобритания.

1. Введение

Естественное освещение (от небосвода или солнца) было признано одним из наиболее важных решений экологических проблем в офисных зданиях, таких как энергосбережение [1, 2], повышение производительности труда [3, 4], улучшение здоровья и комфорта человека [5, 6, 7].

В крупных городах осаждение переносимых воздухом загрязняющих веществ на поверхности зданий может заметно повлиять на проникновение естественного света в здания [8, 9, 10]. Для элементов остекления влияние осаждения загрязнений воздуха на пропускание естественного света обычно количественно определяется с помощью применения поправочного коэффициента загрязнения остекления [11, 12]. Для точного проектирования естественного освещения в загрязнённом городском районе важно иметь соответствующие, релевантные участку значения поправочного коэффициента загрязнения остекления [12]. В период с 1999 по 2003 год в Великобритании и Сингапуре было проведено несколько полевых исследований [8, 9, 13] для измерения снижения пропускания естественного света остеклением из-за осаждения загрязняющих веществ в городских зданиях. Британские исследователи Трегенза и др. [8] наблюдали среднее снижение коэффициента пропускания от 4 % до 8 % для коммерческих зданий в чистых средах, в то время как Шарплс и др. [9] обнаружили, что потери в диффузном пропуска-

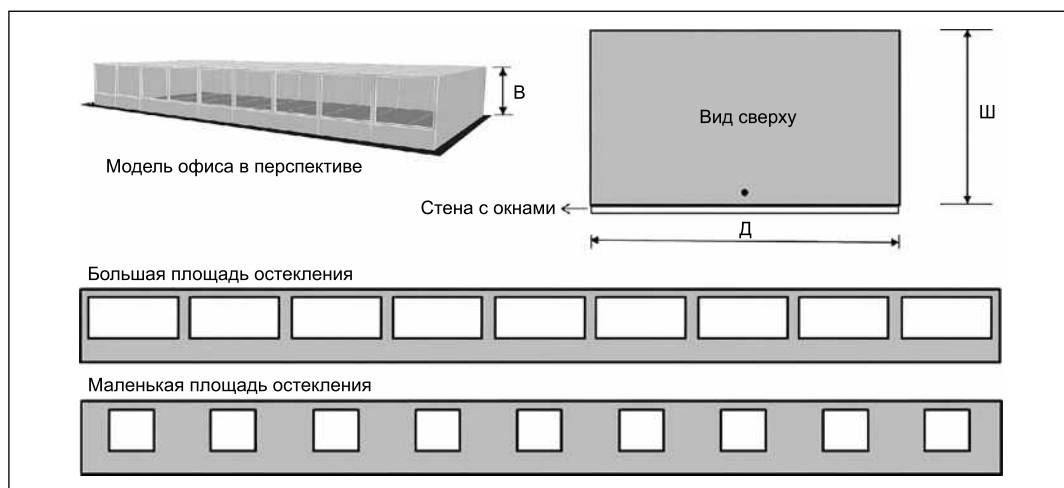
нии для вертикального окна обычно не превышают 10 %. Эти результаты могут быть использованы в архитектурных расчётах естественного освещения для регионов, экологически близких к умеренному морскому климату Великобритании. В другом исследовании, проведённом в городе с высокой плотностью населения Сингапуре, который имеет тропический влажный климат, было обнаружено общее снижение коэффициента пропускания в диапазоне от 9 % до 36 % для вертикальных и горизонтальных окон [13]. В общем, Трегенза и др. [8] пришли к выводу, что поправочный коэффициент загрязнения остекления связан с твёрдыми частицами во внешней атмосфере, осадками и формой здания. В двух исследованиях [13, 14] далее подчёркивался тот факт, что внешние атмосферные загрязнители должны в первую очередь учитываться при оценке потерь пропускания естественного света через остекление фасада.

Однако упомянутый выше поправочный коэффициент загрязнения обычно измерялся с помощью простого подхода (например, люксметра), который не учитывал природу и состав загрязняющих веществ в городской атмосфере [13]. Поэтому был изучен механизм загрязнения остекления. Согласно Уотту и Гамильтону [10], загрязнение стекла принимается как «визуальная помеха, возникающая в результате потемнения открытых поверхностей в результате осаждения атмосферных частиц». В более раннем исследовании [15] указывалось, что основным источником загрязнения поверхности остекления в городах является твёрдые частицы углерода (ЧУ). Глобальная модель загрязнения современного остекления была разработана в Париже в простых условиях воздействия (отсутствия дождя) [16, 17]. Было обнаружено, что четыре параметра загрязнения изменяются с увеличением времени воздействия, включая общую массу осажённых частиц (путём взвешивания), массу общего углерода (методом термокулометрии), массу водорастворимых ионов (методом ионной хроматографии на воде для промывки поверхности стекла) и дымку (методом спектрофотометрии) [17]. Основываясь на измеренных данных из шести европейских городов, Фавес и др. [18] построили новые модели для прогнозирования влияния загрязнения на оптические свойства архитектурного остекления в терминах двух типичных загрязняющих веществ: ЧУ и ионов (растворимых неорганических частиц). Эти исследования дали бы возможность количественно оценить поправочный коэффициент загрязнения более точным способом.

Из литературного обзора можно сделать вывод, что существует лишь несколько исследований, посвящённых прямой связи между ситуацией загрязнения воздуха/осаждением грязи на остеклении и окончательным снижением проникновения естественного света в здания [8, 9, 13]. Кроме того, могут потребоваться некоторые простые

¹ Перевод с англ. Т.В. Мешковой

Рис. 1. Модель офиса



стратегии проектирования [12] для сопровождения практического проектирования применения естественного света, учитывающего негативное воздействие загрязнения окружающей среды городским воздухом. Таким образом, данная статья представляет собой моделирование естественного освещения в офисном здании открытой планировки и преследует две цели: исследовать связь между коэффициентом пропускания вертикального остекления и наличием естественного света в помещении и построить алгоритмы оценки снижения проникновения естественного света в соответствии с типовыми загрязнителями в европейских городских районах. Достигнутые результаты могут быть полезны для разработки методических рекомендаций по проектированию фасадов на ранней стадии.

2. Моделирование

2.1. Расположение, модель офиса и размеры остекления

В данном исследовании было смоделировано многоэтажное офисное здание в одном из районов Лондона (рис. 1). Это место имеет типичный умеренный морской климат. Офис имеет открытую планировку ($D \times Ш \times В$: $21,6 \times 10 \times 3$ м³) и вертикальные боковые окна на единственном фасаде. Были изучены два размера остекления: одно с отношением большой площади остекления к площади стены (ООС) 60 % и другое с малым ООС 30 %. Общее значение коэффициента пропускания (КП) остекления, использованного при моделировании, было уменьшено с 0,85 до 0,3 с интервалом 0,05 шага для моделирования диапазона изменений пропускания, вызванных загрязнением воздуха. Предполагалось, что остекление непосредственно подвергается воздействию городского воздуха (то есть никаких препятствий, никаких защитных эффектов от углублений или затеняющих элементов). Коэффициенты отражения поверхности офисного помещения составляли 0,8 (потолок), 0,6 (стена) и 0,3 (пол).

2.2. Моделирование естественного освещения

В качестве инструмента моделирования естественного света на основе климата [19] в этом исследовании был принят программный комплекс *DAYSIM* [20]. Были использованы четыре параметра естественного света: средний ко-

эффициент естественной освещённости (КЕО) [21, 11], автономность естественной освещённости (АЕО), постоянная автономность естественной освещённости (АЕОп) и полезная естественная освещённости (ПЕО) [22, 23]. Средний коэффициент естественной освещённости – это обычная метрика, которая в основном используется в условиях облачного неба МКО, и которая может отображать базовый уровень достаточности естественного света. Как динамическая метрика при различных условиях неба, автономность естественной освещённости является показателем того, соответствует ли естественная освещённость требуемой освещённости рабочей плоскости. Данные о постоянной автономности естественной освещённости включают не только естественную освещённость выше стандартного уровня, но и ту часть в каждом временном интервале, когда естественная освещённость ниже требуемого уровня освещённости. Для офисного здания, смоделированного в данном исследовании, была выбрана минимальная освещённость рабочей плоскости 500 лк. Параметр полезной естественной освещённости (ПЕО) также может быть использован для оценки естественного света в различных климатических условиях. Три типа ПЕО определяются в соответствии с диапазонами естественной освещённости: 0–100 лк (слишком тёмный), 100–2000 лк (полезный свет) и более 2000 лк (слишком яркий).

В качестве рабочей расчётной плоскости при моделировании использовалась горизонтальная поверхность на высоте 0,8 м от пола. Расчётная сетка с 880 точками была равномерно распределена по плоскости. В этом исследовании было получено среднее значение для всех расчётных плоскостей для представления доступности естественного света в офисе. Для каждой модели офиса (большое или малое ООС) для создания алгоритмов использовались смоделированные средние значения КЕО, АЕО, АЕОп, ПЕО, связанные с переменным коэффициентом пропускания остекления.

3. Модель загрязнения стекла

Модель загрязнения стекла изучалась в течение 15-летнего периода [17]. На основе измерений в шести европейских городах (Афины, Краков, Лондон, Прага, Монтелибретти и Труа) были разработаны два уравнения для оценки влияния загрязнителей воздуха на оптические свойства стекла (поглощение и рассеяние света) [18]:

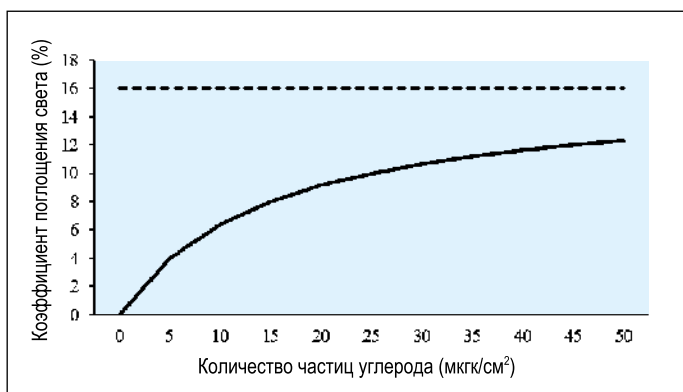


Рис. 2. Зависимость поглощения света от количества частиц элементарного углерода

$$X = 0,16 \cdot ЧУ / (ЧУ + 15), \quad (1)$$

$$Y = 0,28ions / (ions + 64), \quad (2)$$

где X – коэффициент поглощения света (%), $ЧУ$ – количество частиц элементарного углерода ($мкг/см^2$) на внешней поверхности остекления, Y – диффузный коэффициент пропускания, а ионы ($ions$) – количество растворимых неорганических частиц ($мкг/см^2$) на внешней поверхности остекления. На рис. 2 и рис. 3 представлены графики уравнений (1) и (2). Из графиков видно изменение поглощения света и диффузного пропускания вследствие осаждения загрязняющих веществ.

На рис. 2 показано, как увеличение количества $ЧУ$ будет явно увеличивать поглощение света (сплошная кривая). Однако измерения Фавеса и др. [18] показали, что можно обнаружить насыщение осаждения $ЧУ$. Это приведёт к тому, что верхний предел коэффициента поглощения света составит около 16 % (пунктирная линия на рис. 2). Аналогично, с увеличением количества ионов происходит увеличение диффузного коэффициента пропускания света (сплошная кривая на рис. 3). Верхний предел диффузного коэффициента пропускания составляет около 20 % (пунктирная линия на рис. 3), что связано с насыщением осаждения ионов [18].

Как отмечалось в ряде исследований [13, 17, 18], осаждение $ЧУ$ является основным фактором, способным существенно снизить визуальный коэффициент пропускания остекления городских зданий. Этот эффект загрязнения

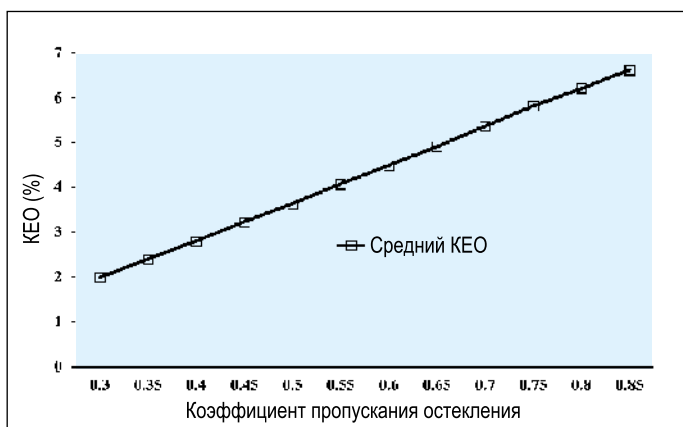


Рис. 4. Зависимость среднего значения КЕО (большая площадь остекления) от коэффициента пропускания остекления

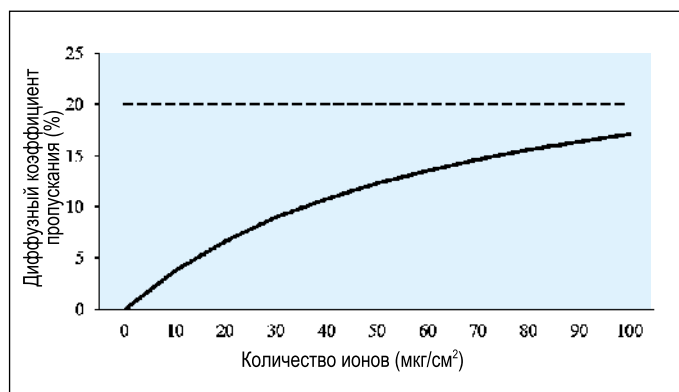


Рис. 3. Зависимость диффузного коэффициента пропускания от количества растворимых неорганических частиц (ионов)

согласно (1) обычно обнаруживался на внешней поверхности остекления [18]. Тем не менее, согласно измерениям [18], влияние ионов на диффузный коэффициент пропускания использовался только для индикации помутнения стекла (визуальной прозрачности), в то время как никаких результатов, касающихся общего визуального пропускания, не сообщалось. Поэтому в данном исследовании в качестве базового алгоритма для установления связи между внешним загрязнением воздуха и наличием естественного света было принято только уравнение (1).

4. Результаты и обсуждение

4.1. Коэффициент пропускания остекления и естественный свет

Сначала были проанализированы результаты моделирования офиса с большим размером остекления (ООС 60 %). На рис. 4 показано влияние коэффициента пропускания остекления на средний коэффициент естественной освещённости (КЕО) в сильно остеклённом офисе. При ООС 60 % коэффициент пропускания (КП) 0,3 может обеспечить хороший уровень естественной освещённости (КЕО = 2 %). Увеличение КП остекления позволит значительно увеличить КЕО. Например, если взять КП = 0,3 в качестве эталона, то при удвоении до 0,6 относительное увеличение КЕО составит 126 %. Линейное уравне-

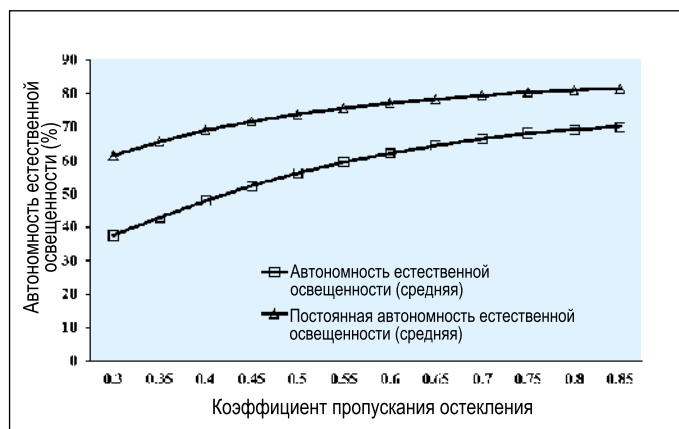


Рис. 5. Зависимость средней автономности естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для большой площади остекления)

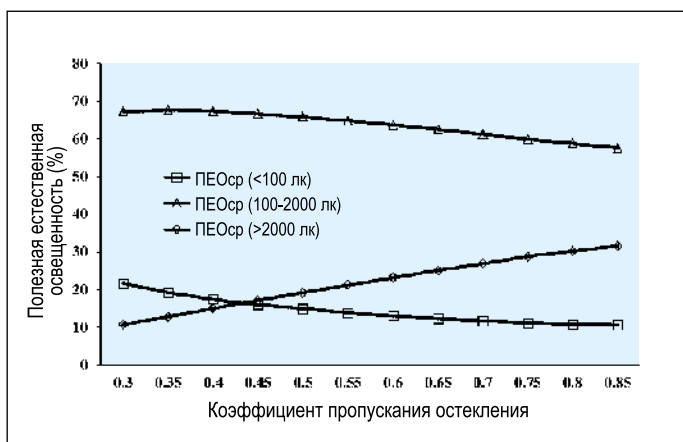


Рис. 6. Зависимость средней полезной естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для большой площади остекления)

ние может быть получено с помощью регрессии для выражения простого изменяющегося тренда:

$$KEO = 8,48 \cdot T - 0,583, (R^2 = 0,999), \quad (3)$$

где T – коэффициент пропускания остекления.

На рис. 5 представлены вариации средней автономности естественной освещённости и средней постоянной автономности естественной освещённости для различных коэффициентов пропускания остекления. В отличие от линейного изменения КЕО, два значения АЕО имеют полиномиальную тенденцию изменения. По-видимому, увеличение КП приведёт к увеличению АЕО или АЕОп. Это нормально, что значение АЕОп выше, чем значение АЕО при каждом КП. Однако разница между АЕО и АЕОп имеет тенденцию уменьшаться с увеличением КП. Абсолютная разница между АЕОп и АЕО, в среднем, составляет около 16 %. Это связано с тем, что естественная освещённость ниже 500 лк все ещё будет включена в расчёт постоянной АЕО с дополнительной величиной (Райнхарт и др. 2006). Графики на рис. 5 могут быть описаны с помощью следующих уравнений:

$$AEO = 41,23 \cdot T^3 - 165,20 \cdot T^2 + 205,17 \cdot T - 10,22, \quad (4)$$

$(F - test, p < 0,001),$

$$AEO_n = 88,31 \cdot T^3 - 217,34 \cdot T^2 + 192,10 \cdot T + 21,17, \quad (5)$$

$(F - test, p < 0,001).$

На рис. 6 показано, как три средних значения ПЕО изменяются в трёх различных тенденциях при различных значениях КП остекления в офисе открытой планировки. При увеличении КП уровни ПЕО (100–2000 лк) и ПЕО (<100 лк), как правило, немного уменьшаются, а ПЕО (>2000 лк), незначительно увеличивается. Очевидно, что ПЕО (100–2000 лк) достигает наибольшего значения для каждого КП. При КП = 0,45 ПЕО (<100 лк) и ПЕО (>2000 лк) имеют одинаковое значение. ПЕО (<100 лк) имеет более низкое значение, чем ПЕО (>2000 лк), когда КП < 0,45, в то время как обратная тенденция появляется при КП > 0,45. Средние значения ПЕО этих трёх типов составляют около 15 % (<100 лк), 64 % (100–2000 лк) и 21 % (>2000 лк). В офисе с большой площадью остекления

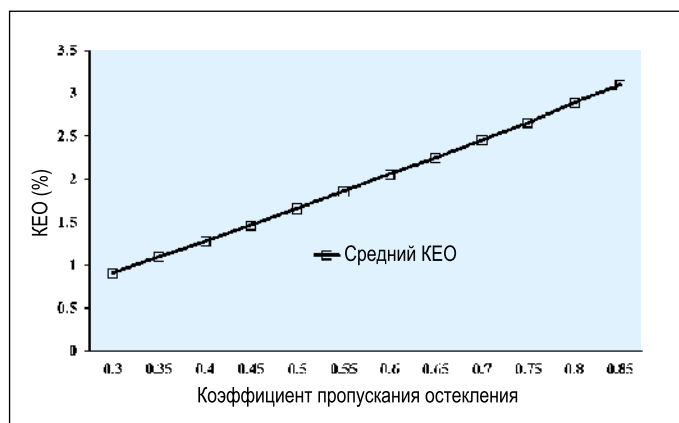


Рис. 7. Зависимость среднего значения КЕО от коэффициента пропускания остекления (маленькая площадь остекления)

вления обычно естественное освещение может создавать уровни освещённости в диапазоне 100–2000 лк. Кроме того, большой размер остекления приводит к превышению верхнего предела диапазона. Таким образом, освещённость в «тёмном» диапазоне (<100 лк) присутствует меньше всего. Более низкий коэффициент пропускания стекла (<0,45) приведёт к более низкой естественной освещённости (<100 лк). На основе кривых ПЕО на рис. 6 были получены следующие три уравнения для большой площади остекления:

$$PEO(<100 \text{ лк}) = -46,59 \cdot T^3 + 115,80 \cdot T^2 - 103,51 \cdot T + 43,49, \quad (6)$$

$(F - test, p < 0,001),$

$$PEO(100 - 2000 \text{ лк}) = 71,10 \cdot T^3 - 144,92 \cdot T^2 + 72,88 \cdot T + 56,57, \quad (7)$$

$(F - test, p < 0,001),$

$$PEO(>2000 \text{ лк}) = -24,0 \cdot T^3 + 27,99 \cdot T^2 + 31,45 \cdot T - 0,46, \quad (8)$$

$(F - test, p < 0,001).$

На втором этапе анализа были рассмотрены результаты моделирования офиса с небольшой площадью остекления (ООС 30 %). Как и на рис. 4, была обнаружена линейная зависимость между коэффициентом пропускания остекления и средним коэффициентом естественной освещённости, что и подтверждается рис. 7 (малый размер стеклопакета ООС 30 %). Линейный тренд можно выразить следующим уравнением:

$$KEO = 3,97 \cdot T - 0,308, (R^2 = 0,999). \quad (9)$$

С увеличением КП увеличивается КЕО. Принимая КП = 0,3 в качестве эталона, значения КП 0,6 и 0,8 соответствуют КЕО 126 % и 218 %. По сравнению со случаем анализа большой площади остекления (рис. 4) значения КЕО офиса с малой площадью остекления возрастают медленней. Обычно уменьшение размера остекления с ООС 60 % до ООС 30 % приводит к 50 % снижению величины КЕО по всей рабочей плоскости.

На рис. 8 показано изменение средней автономности естественной освещённости и постоянной автономности ес-

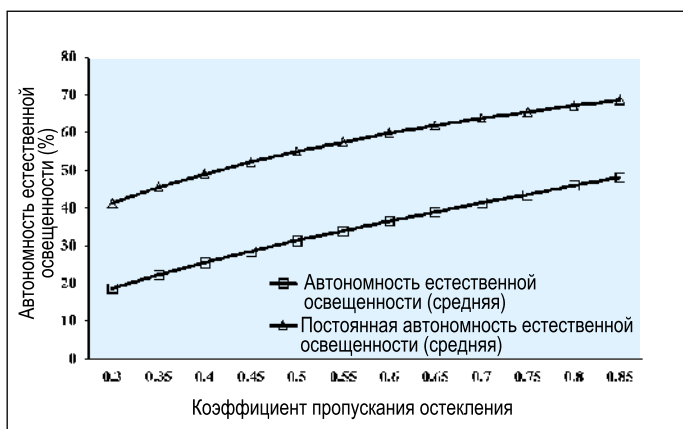


Рис. 8. Зависимость средней автономности естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для маленькой площади остекления)

тественной освещённости при различных коэффициентах пропускания остекления. Увеличение КП значительно увеличивает значения АЕО и АЕОп. В отличие от ситуации с большой площадью остекления (рис. 5), малая площадь остекления на рис. 8 приводит к двум параллельным кривым АЕО и АЕОп. Для каждого коэффициента пропускания абсолютная разница между АЕО и АЕОп составляет около 21 %. Так результаты рис. 8 можно описать с помощью следующих уравнений:

$$AEO = 37,09 \cdot T^3 - 88,67 \cdot T^2 + 115,81 \cdot T - 8,98, \quad (F - test, p < 0,001), \quad (10)$$

$$AEO_n = 50,70 \cdot T^3 - 136,9 \cdot T^2 + 152,75 \cdot T + 6,57, \quad (F - test, p < 0,001). \quad (11)$$

На рис. 9 приведены три средних значения ПЕО для офиса с малым остеклением, которые имеют различные вариации с точки зрения различных коэффициентов пропускания остекления. Когда КП < 0,45, увеличение коэффициента пропускания остекления всё ещё может увеличить значения ПЕО (100–2000 лк). Однако при КП > 0,45 увеличение коэффициента пропускания остекления существенно не повлияет на ПЕО (100–2000 лк). Аналогично результатам для большой площади остекления (рис. 6), более высокий КП приведёт к появлению низких значений ПЕО (<100 лк) и высоких значений ПЕО (>2000 лк). Разница между ПЕО (<100 лк) и ПЕО (>2000 лк) имеет тенденцию уменьшаться с увеличением коэффициента пропускания остекления. Средние значения ПЕО в этих трёх диапазонах составляют 26 % (<100 лк), 65 % (100–2000 лк) и 9 % (>2000 лк). Интересно, что можно обнаружить, что большое остекление (рис. 6) и малое остекление (рис. 9) достигают одинаковой полезной естественной освещённости (100–2000 лк). В отличие от большой площади остекления, офис с малой площадью остекления получает большее значение ПЕО (<100 лк) и меньшее значение ПЕО (>2000 лк). Эти результаты могут быть объяснены размером остекления: ООС 30 % соответствует минимальным требованиям размера окна согласно рекомендациям Британского института стандартов (2008), которые могут обеспечить достаточный уровень естественной освещённости в диапазоне 100–2000 лк и менее высокий уровень естественной освещённости >2000 лк в офисном здании.

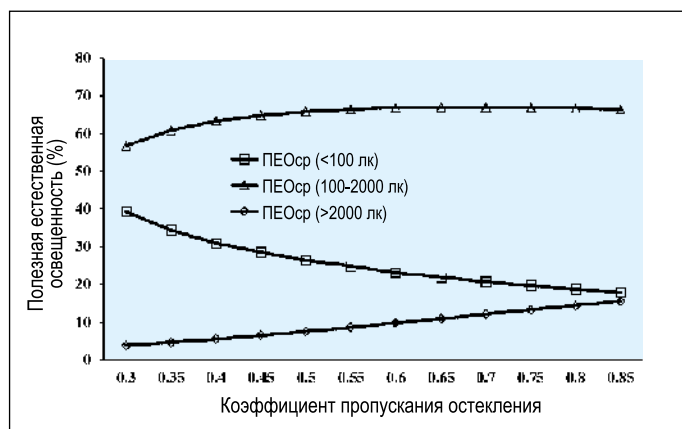


Рис. 9. Зависимость средней полезной естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для маленькой площади остекления)

Таким образом, графики на рис. 9 можно представить в виде следующих уравнений:

$$PEO(< 100 \text{ лк}) = -135,80 \cdot T^3 + 294,69 \times T^2 - 232,55 \cdot T + 85,91, \quad (F - test, p < 0,001), \quad (12)$$

$$PEO(100 - 2000 \text{ лк}) = 151,63 \cdot T^3 - 328,13 \times T^2 + 232,75 \cdot T + 12,78, \quad (F - test, p < 0,001), \quad (13)$$

$$PEO(> 2000 \text{ лк}) = -16,61 \cdot T^3 + 34,67 \times T^2 - 0,74 \cdot T + 1,37, \quad (F - test, p < 0,001). \quad (14)$$

4.2. Зависимость естественного освещения от наличия загрязняющих частиц на остеклении

На внешней поверхности остекления поглощение света за счёт наличия слоя частиц углерода можно рассчитать с помощью (1). Коэффициент пропускания света $T_{\text{ЧУ}}$ можно рассчитать по формуле:

$$T_{\text{ЧУ}} = 1 - X - R, \quad (15)$$

где R — коэффициент отражения слоя твёрдых частиц углерода, X — коэффициент поглощения света. Согласно исследованию Фавеса и др. [18], количество отражённого света от слоя ЧУ было незначительным ($R \approx 0$). Таким образом, коэффициент пропускания света $T_{\text{ЧУ}}$ просто определяется уравнением поглощения света:

$$T_{\text{ЧУ}} = 1 - X. \quad (16)$$

Это выражение (16) может быть использовано в качестве динамического коэффициента коррекции загрязнения для пропускания окон в городских зданиях.

На основе уравнений (16) и (3) – (14) было разработано несколько алгоритмов оценки негативного влияния слоя ЧУ на проникновение естественного света в помещение. Для большой площади остекления разница доступности

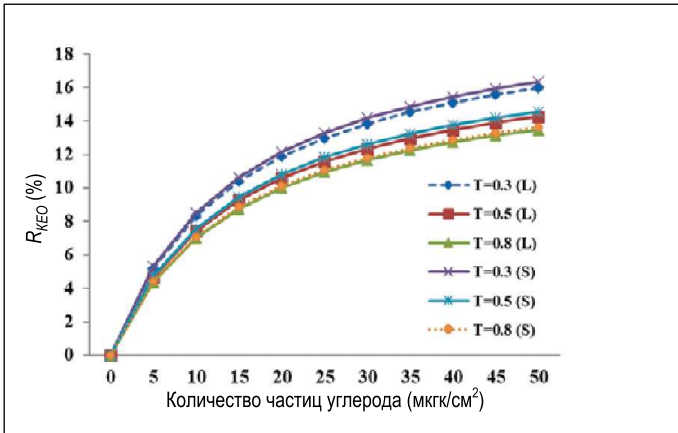


Рис. 10. Относительное снижение КЕО с увеличением количества частиц элементарного углерода на внешней поверхности остекления для трёх типовых коэффициентах пропускания (0,3, 0,5 и 0,8)

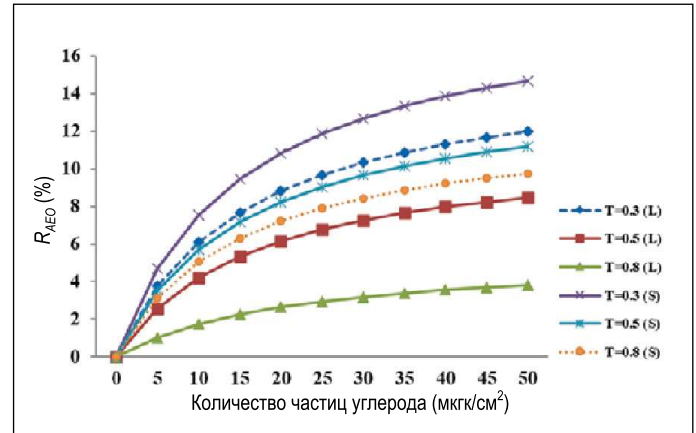


Рис. 11. Относительное снижение АЕО с увеличением количества частиц элементарного углерода на внешней поверхности остекления для трёх типовых коэффициентах пропускания (0,3, 0,5 и 0,8)

естественного света между чистым и загрязнённым остеклением рассчитывается по формуле:

$$\Delta KEO = 8,48 \cdot T \cdot X, \quad (17)$$

$$\Delta AEO = 41,23 \cdot T^3 \cdot A - 165,20 \cdot T^2 \cdot B + 205,17 \cdot T \cdot C, \quad (18)$$

$$\Delta AEO_n = 88,31 \cdot T^3 \cdot A - 217,34 \cdot T^2 \cdot B + 192,10 \cdot T \cdot C, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta ПЕО(<100\text{лк}) = & -46,59 \cdot T^3 \cdot A + \\ & + 115,8 \cdot T^2 \cdot B - 103,51 \cdot T \cdot C, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta ПЕО(100 - 2000\text{лк}) = & 71,10 \cdot T^3 \cdot A - \\ & - 144,92 \cdot T^2 \cdot B + 72,88 \cdot T \cdot C, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta ПЕО(>2000\text{лк}) = & -24,0 \cdot T^3 \cdot A + \\ & + 27,99 \cdot T^2 \cdot B + 31,45 \cdot T \cdot C, \end{aligned} \quad (22)$$

Для маленькой площади остекления разница доступности естественного света между чистым и загрязнённым остеклением могут быть описаны следующими формулами:

$$\Delta KEO = 3,97 \cdot T \cdot X, \quad (23)$$

$$\Delta AEO = 37,09 \cdot T^3 \cdot A - 88,67 \cdot T^2 \cdot B + 115,81 \cdot T \cdot C, \quad (24)$$

$$\Delta AEO_n = 50,70 \cdot T^3 \cdot A - 136,92 \cdot T^2 \cdot B + 152,75 \cdot T \cdot C, \quad (25)$$

$$R_{ПЕО} = \frac{\Delta ПЕО}{ПЕО} \times 100\%, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Delta ПЕО(100 - 2000\text{лк}) = & 151,63 \cdot T^3 \times \\ & \times A - 328,13 \cdot T^2 \cdot B + 232,75 \cdot T \cdot C, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Delta ПЕО(>2000\text{лк}) = & -16,6 \cdot T^3 \times \\ & \times A + 34,67 \cdot T^2 \cdot B - 0,74 \cdot T \cdot C, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \Delta KEO = KEO(T) - KEO(T \cdot T_{\text{чв}}) = \\ = KEO(T) - KEO(T \cdot (1 - X)), \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Delta AEO = AEO(T) - AEO(T \cdot T_{\text{чв}}) = \\ AEO(T) - AEO(T \cdot (1 - X)), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \Delta ПЕО = ПЕО(T) - ПЕО(T \cdot T_{\text{чв}}) = \\ ПЕО(T) - ПЕО(T \cdot (1 - X)), \end{aligned} \quad (31)$$

где коэффициенты A , B и C определяются следующим образом:

$$A = 1 - (1 - X)^3, \quad (32)$$

$$B = 1 - (1 - X)^2, \quad (33)$$

$$C = 1 - (1 - X) = X. \quad (34)$$

С точки зрения этих алгоритмов, потеря доступности естественного света может быть оценена для конкретного остекления после измерения ситуации загрязнения слоя ЧУ.

4.3. Применение

В этом разделе представлено применение алгоритмов (17) – (28). Типовые коэффициенты пропускания остекления 0,3, 0,5 и 0,8 были выбраны в качестве репрезентативных для систем остекления с низким, средним и высоким коэффициентами пропускания соответственно. Применение алгоритмов рассматривается только для КЕО, АЕО и ПЕО (100–2000 лк).

На рис. 10 приведены графики снижения среднего КЕО в относительных единицах из-за осадений ЧУ в соответствии со значениями КП 0,3, 0,5 и 0,8. Для расчёта было использовано следующее уравнение:

$$R_{KEO} = \frac{\Delta KEO}{KEO} \times 100 \%. \quad (35)$$

Уменьшение КЕО изменяется полиномиально, то есть увеличение осадения ЧУ явно уменьшило бы КЕО на рабочей плоскости, особенно в диапазоне 0–10 мгк/м². При низком уровне осадения ЧУ (<5 мгк/м²) чётких различий в снижении КЕО между различными размерами остекления и коэффициентами пропускания обнаружить не удастся. Однако снижение КЕО начинает расходиться при значении 5 мгк/м², и эта расходимость имеет тенденцию к увеличению с увеличением осадения ЧУ.

Как правило, размер остекления существенно не влияет на относительное снижение КЕО из-за ЧУ. Коэффициент пропускания стеклопакета является основным фактором, влияющим на его снижение. Чем ниже КП, тем выше относительное снижение КЕО. Для мест с преобладанием облачного неба наличие естественного света в помещении очень чувствительно к осаждению грязи на остеклении. Очень важно регулярно чистить оконную поверхность городских зданий. Если предположить, что уровень насыщения осаждения ЧУ составляет 30 мкгк/м², то максимальное относительное снижение КЕО составит менее 16 % [18].

На рис. 11 показано относительное снижение автономности естественной освещённости, вызванное осаждением ЧУ, в соответствии со значениями КП остекления 0,3, 0,5 и 0,8. Значения были рассчитаны следующим образом:

$$R_{AEO} = \frac{\Delta AEO}{AEO} \times 100 \% \quad (36)$$

Относительные значения АЕО увеличиваются с увеличением количества ЧУ на внешней поверхности остекления. В отличие от наблюдений КЕО на рис. 10, как размер остекления, так и коэффициент пропускания могут оказывать явное влияние на снижение АЕО. При большом остеклении с КП=0,8 наблюдается наименьшее снижение АЕО ($R_{AEO} < 5\%$), в то время как наибольшее снижение АЕО соответствует маленькой площади остекления с КП=0,3 ($R_{AEO} > 5\%$). Интересно, что большая площадь остекления с КП=0,3 обеспечивает более резкое снижение АЕО, чем маленькая площадь остекления с КП 0,5 и 0,8. Это может свидетельствовать о том, что коэффициент пропускания света играет более важную роль в снижении АЕО, чем размер остекления. Средние значения каждой кривой составляют 10,3 % (маленькая площадь остекления, КП=0,3), 8,38 % (большая площадь остекления, КП=0,3), 7,84 % (маленькая площадь остекления, КП=0,5), 6,85 % (маленькая площадь остекления, КП=0,8), 5,88 % (большая площадь остекления, КП=0,5) и 2,57 % (большая площадь остекления, КП=0,8). Аналогично, максимальное относительное снижение АЕО было бы менее 14 %, если бы уровень насыщения осаждения ЧУ равен 30 мкгк/м². Можно отметить, что большой размер остекления в сочетании с более высоким коэффициентом пропускания остекления обеспечит достаточные условия естественного освещения даже при сильном загрязнении наружного воздуха и без регулярной очистки и технического обслуживания.

На рис. 12 наглядно с помощью графиков представлено влияние увеличения осаждения ЧУ на внешней поверхности остекления на относительное снижение полезной естественной освещённости в диапазоне 100–2000 лк. Значения были рассчитаны следующим образом:

$$R_{PEO} = \frac{\Delta PEO}{PEO} \times 100 \% \quad (37)$$

По-видимому, вариации относительного снижения ПЕО (100–2000 люкс) можно разделить на две группы с точки зрения отрицательных/положительных значений ПЕО. При $R_{PEO} > 0$ три кривые (ООС 30 %, КП=0,3, ООС 30 %, КП=0,5, ООС 60 %, КП=0,3) показывают возрастающее относительное снижение ПЕО с увеличением количества ЧУ. Это указывает на то, что ЧУ оказывает негативное влияние на уровень ПЕО. Маленькая площадь остекле-

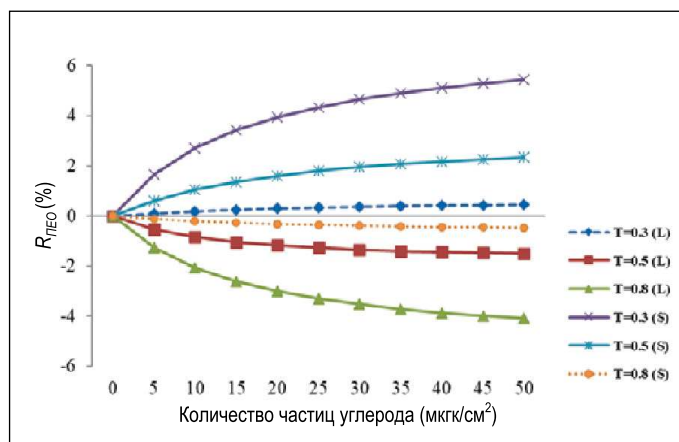


Рис. 12. Относительное снижение ПЕО (100–2000 лк) с увеличением количества частиц элементарного углерода на внешней поверхности остекления для трёх типовых коэффициентах пропускания (0,3, 0,5 и 0,8)

ния с КП=0,3 имеет самые высокие значения, в то время как самые низкие значения достигаются большой площадью остекления с КП=0,3. Значения ООС 30 % с КП=0,5 находятся посередине. Эти результаты означают, что маленькая площадь остекления в сочетании с низким коэффициентом пропускания очень чувствительна к осаждению загрязняющих веществ для достижения необходимого уровня ПЕО. С другой стороны, при увеличении осаждения ЧУ для трёх кривых при $R_{PEO} < 0$ обнаруживается тенденция к уменьшению (ООС 60 %, КП=0,8, ООС 60 %, КП=0,5; ООС 30 %, КП=0,8). Это выражает противоположное мнение о том, что осаждение ЧУ может положительно повлиять на доступность полезной дневной освещённости. Кроме того, большая плоскость остекления с КП=0,8 позволяет получить самые низкие значения R_{PEO} , что означает наилучшее условия для ПЕО. Самые высокие значения найдены для маленькой площади остекления с КП=0,8. В общем случае верхние диапазоны абсолютных значений R_{PEO} для представленных графиков составляют 1 % (ООС 60 %, КП=0,3; ООС 30 %, КП=0,8), 3 % (ООС 30 % и ООС 60 %, КП=0,5) и 6 % (ООС 60 %, КП=0,8, ООС 30 %, КП=0,3). За исключением крайних случаев (маленькая площадь остекления и низкий коэффициент пропускания, большая площадь остекления и высокий коэффициент пропускания), осаждение ЧУ существенно не повлияет на наличие полезной естественной освещённости. Согласно определению ПЕО, широкий диапазон освещённости (100–2000 лк) вполне может объяснить полученные результаты. Частое техническое обслуживание очистки может потребоваться только для зданий с небольшой площадью остекления (ООС 30 %).

Согласно предыдущему анализу и обсуждениям, различные показатели естественного света, такие как КЕО, АЕО и ПЕО, приведут к некоторым расхождениям в оценке воздействия загрязнения на результирующие условия естественного освещения в офисе.

5. Заключение

В этом исследовании был представлен имитационный анализ доступности естественного света и загрязнения воздуха в типовом офисе открытой планировки в город-

ском районе Великобритании. Некоторые выводы, которые можно сделать из этого исследования, включают:

1. возможно, потребуется провести исследование прямой связи между коэффициентом пропускания остекления и наличием естественного света в помещениях офисных зданий, чтобы упростить процесс проектирования на ранней стадии,

2. установлено несколько простых алгоритмов оценки влияния коэффициента пропускания остекления на доступность естественного света для создания уровня освещённости на рабочей плоскости офисных зданий. Кроме того, были разработаны дополнительные алгоритмы прогнозирования снижения доступности естественного света из-за одного типового загрязнителя воздуха (элементарных частиц углерода). Эти алгоритмы могут быть использованы для эффективного сопровождения проектирования фасада,

3. было бы крайне важно провести динамический анализ с использованием климатического моделирования естественного света для достижения практической и всеобъемлющей оценки эффективности естественного освещения в офисном здании открытой планировки, поскольку традиционный метод расчёта КЕО может обеспечить только фундаментальную оценку без учёта местоположения и климата. Однако следует отметить, что различные показатели естественного света приведут к тому, что окончательные оценки будут демонстрировать некоторые расхождения,

4. для метрики, использующей средний КЕО, доступность естественного света в помещении значительно чувствительна к коэффициенту пропускания остекления, на который на прямую зависит от загрязнения окружающей среды. Однако размер остекления не окажет существенного влияния на условия естественного освещения, если будет достигнуто минимальное значение ООС 30 %,

5. согласно метрике, использующей АЕО, как коэффициент пропускания остекления, так и размер остекления могут оказывать влияние на доступность естественного света в помещении. Однако коэффициент пропускания остекления должен быть первым фактором, который следует учитывать при проектировании естественного освещения. Явное негативное воздействие загрязнения воздуха можно было бы обнаружить только для систем остекления со средним/низким коэффициентом пропускания. Большая площадь остекления в сочетании с высоким коэффициентом пропускания, возможно, обеспечит достаточный уровень естественной освещённости при наличии загрязнения воздуха,

6. в соответствии с наличием естественного света в помещении и метрикой, использующей ПЕО, позитивная тенденция может наблюдаться при загрязнении воздуха для систем остекления с большой площадью остекления (например, 80 %) и высоким коэффициентом пропускания, или отрицательная тенденция, при маленькой площади остекления (например, 30 %) и низком коэффициенте пропускания.

Ограничения и будущая работа: эти выводы, очевидно, ограничены простой офисной моделью и одним типовым загрязнителем воздуха (ЧУ), а также конкретным местоположением и климатом. Следует исследовать офисные модели с различными фасадными системами и ориентациями, а также в более сложных условиях загрязнения

воздуха, чтобы найти общие результаты коррекции коэффициента загрязнения остекления в помещениях с наличием естественного света. Эти вопросы будут изучены в дальнейшей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. IEA (SHC Task 21/ ECBCS Annex 29) (2000). Daylight in buildings: a source book on daylighting system and components. Report of Lawrence Berkeley National Laboratory. Available from: <https://facades.lbl.gov/daylight-buildings-source-book-daylighting-systems> [Accessed 10 July 2019].

2. Boyce P, Hunte C, Howlett O (2003). The benefits of daylight through windows. Report of Lighting Research Centre. USA. Available from: www.lrc.rpi.edu/programs/daylighting/pdf/DaylightBenefits [Accessed 9 Nov 2011].

3. Chen X, Zhang X, Du J (2019a). Exploring the effects of daylight and glazing types on self-reported satisfactions and performances: a pilot investigation in an office. // *Architectural Science Review*, V64, #4, pp. 388–352.

4. Chen X, Zhang X, Du J (2019b). Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing. // *Building and Environment*, V153, pp. 168–185.

5. Boubekri M, Cheung IN, Reid KJ, Wang CH, Zee PC (2014). Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study. // *Journal of Clinical Sleep Medicine*, V10, #6, pp. 603–611.

5.1. Borisuit A, Linhart F, Scartezini J-L, Munch M (2015). Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood. // *Lighting Research & Technology*, V47, pp. 1–18.

6. Figueiro MG, Rea MS (2016). Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood. // *Lighting Research & Technology*, V48, #3, pp. 352–364.

7. Tregenza PA, Stewart L, Sharples S (1999). Reduction of glazing transmittance by atmospheric pollutants. // *Lighting Research & Technology*, V31, pp. 135–138.

8. Sharples S, Stewart L, Tregenza PA (2001). Glazing daylight transmittances: a field survey of windows in urban areas. // *Building and Environment*, V36, pp. 503–509.

9. Watt J, Hamilton R (2003). The soiling of buildings by air pollution. In: Brimblecombe, P. (Ed), *Air Pollution Reviews. The Effects of Air Pollution on the Built Environment*. Vol. 2. Imperial College Press, London, UK. pp. 289–334.

10. BSI (British Standards Institution) (2008). BS8206–2:2008. Lighting for buildings. Code of practice for daylighting.

11. SLL (The Society of Light and Lighting) (2014). Lighting for the built environment: LG10: Daylighting – a guide for designers. Norwich. UK.

11.1. Ullah MB, Kurniawan JT, Poh, LK, Wai TK., Tregenza P A (2003). Attenuation of diffuse daylight due to dust deposition on glazing in a tropical urban environment. // *Lighting Research & Technology*, V35, pp. 19–29.

12. Mastekbayeva GA, Kumar S (2000). Effect of dust on the transmittance of low-density polythene glazing in a Tropical climate. // *Solar Energy*, V68, pp. 135–41.

13. *Lanting RW* (1986). Black smoke and soiling. In: Lee, S.D., Schneider, T., Grant, L.D., Verkerk, P.J. (Eds.), *Aerosols*. // Lewis Publisher, Chelsea, Michigan, USA, pp. 923–932.

14. *Lombardo T, Chabas A, Lefevre RA, Verita M, Geotti-Bianchini F* (2005a). Weathering of a float glass exposed outdoor in urban area. // *Glass Technology*, V46, pp. 271–276.

15. *Lombardo T, Ionescu A, Lefevre RA, Chabas A, Ausset P, Cachier H* (2005b). Soiling of silica-soda-lime float glass in urban environment: measurements and modelling. // *Atmospheric Environment*, V39, pp. 989–997.

16. *Favez O, Cachier H, Chabas A, Ausset P, Lefevre R* (2006). Crossed optical and chemical evaluations of modern glass soiling in various European urban environments. // *Atmospheric Environment*, V40, pp. 7192–7204.

17. *Mardaljevic J* (2006). Examples of climate-based daylight modelling. // *CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future*, London, UK.

18. *Reinhart CF, Herkel S* (2002). The simulation of annual daylight illuminance distributions – a state-of-art comparison of six Radiance-based method. // *Energy and Buildings*, V32, pp. 167–187.

19. *Philips GM, Littlefair PJ* (1988). Average daylight factor under rooflights. // *CIBSE National Lighting Conference*, Cambridge, UK.

20. *Nabil A, Mardaljevic J* (2006). Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. // *Energy and Buildings*, V38, #7, pp. 905–913.

21. *Reinhart CF, Mardaljevic J, Rogers Z* (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. // *LEUKOS*, V3, pp. 7–31.



Цзянтао Ду (Jiangtao Du), Ph.D. (2011) в настоящее время является профессором Школы архитектуры Ливерпульского университета, Великобритания. Он является дизайнером освещения и дипломированным инженером в международной профессиональной инженерной ассоциации, базирующейся в Лондоне (CIBSE) и членом общества света и освещения SLL. Его научные интересы включают свет и здоровье, проектирование естественного освещения и световое загрязнение. Его текущие исследования сосредоточены на изучении того, как вид, цвет и условия освещения влияют на здоровье и состояние человека в рабочих и жилых помещениях



Стив Шарплз (Steve Sharples), Ph.D. Возглавляет кафедру устойчивого экологического дизайна в Школе архитектуры Ливерпульского университета, Великобритания. Он является дипломированным инженером в международной профессиональной инженерной ассоциации, базирующейся в Лондоне (CIBSE) и членом общества света и освещения SLL. Область научных интересов включает влияние окружающей среды на производительность зданий в контексте изменения климата, низкого углерода и экологического дизайна. Он работал в широком спектре предметных областей, включая энергетику, тепловой комфорт, вентиляцию, естественное освещение, шум, изменение климата и экологический дизайн

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ В 2021 ГОДУ (I квартал)

Дата	Название мероприятия	Место проведения
20–22.01	Нерсон Japan – LED & Laser Diode Technology Expo Международная выставка с конференцией по светодиодам и лазерным диодам	Токио, Япония lightsearch.com
26–29.01	DairyTech. Молочная и мясная индустрия – 2021 19-я Международная выставка оборудования и технологий для животноводства, молочного и мясного производств	Москва, РФ exponet.ru
09–11.02	Strategies in Light 2021 Международная конференция с выставкой по светодиодам и освещению светодиодами	Санта-Клара (Калиф.), США manufacturer.lighting/expo/
02–05.03	Интерлакокраска – 2021 25-я Юбилейная международная специализированная выставка	Москва, РФ exponet.ru
30.03–02.04	Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2021 15-я Международная специализированная выставка оптической, лазерной и оптоэлектронной техники	Москва, РФ exponet.ru