Ключові слова: будинки критих басейнів, внутрішній теплоізоляційний контур (ВТК), швидкість повітряного потоку, вентильований прошарок, аеродинамічний аналіз.

MATHEMATICAL MODELING OF THE AIR VELOCITY IN THE AIR LAYER WITH NATURAL VENTILATION IN BUILDINGS OF INDOOR SWIMMING POOLS WITH AN INTERNAL THERMAL INSULATION CIRCUIT

Victoria Mazur [1], Elena Novitskaya [2], Anna Krupenchenko [3]

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.
E mail: [1] mazur241103@gmail.com, [2] gubenaya@mail.ru, [3] krupenchenko_a@mail.ru

Received 09 September 2021; accepted 10 September 2021.

Abstract. The article discusses the formation of an air flow in a ventilated air gap during natural ventilation of indoor swimming pool buildings with an internal thermal insulation loop using the SOLIDWORKS Flow Simulation tool for three dimensional modeling of low speed flows, integrated into the SOLIDWORKS 3D CAD software package. The values of the speed of air movement in the ventilated air layer in the buildings of indoor swimming pools with the device of an internal heat insulating circuit have been obtained. Based on the data obtained, the investigated facade was divided into zones: corner and central. The equations of linear multiple regression are obtained taking into account the zoning of the investigated facade of the bathroom room to predict the air flow rate in the ventilated air layer in indoor swimming pool buildings when arranging an internal thermal insulating loop.

Keywords: indoor pool buildings, internal thermal insulation loop, air flow rate, ventilated layer, aerodynamic analysis.

Основной материал

При проектировании и эксплуатации зданий крытых бассейнов, помимо выполнения целого ряда нормативных требований к ограждающим конструкциям [1–6] и необходимости обеспечения особого микроклимата в помещении ванного зала, необходимо также учитывать множество других факторов [7].

Одним из главных факторов, влияющим на микроклимат в помещении бассейна, а также влияющим на теплотехнические характеристики ограждающих конструкций, является ветровое воздействие на здание, которое способствует проникновению холодного воздуха в помещения бассейна, тем самым существенно понижая температурные показатели внутри помещения ванного зала зданий крытых бассейнов. Это ведет к увеличению потребления теплоносителей и удорожанию эксплуатации зданий бассейнов, так как для поддержания требуемых нормативных температурно влажностных показателей внутри помещения ванного зала требуются дополнительные затраты топливно энергетических ресурсов.

Для решения выявленных проблем разработан внутренний теплоизоляционный контур (ВТК) [8]. Внутренний теплоизоляционный контур состоит из паро гидроизоляционного слоя, теплоизоляционного слоя и наружного защитного слоя. В качестве материала, используемого для ВТК, приняты сэндвич панели. ВТК выполняется путем устройства конструкции на несущую конструкцию стены (в качестве примера рассмотрена кирпичная стена толщиной 510 мм). Также для соблюдения всех требований, предъявляемых к ограждающим конструкциям зданий крытых бассейнов [1], предусмотрена вентилируемая воздушная прослойка, расположенная

между несущей конструкцией стены и внутренним теплоизоляционным контуром (рис. 1). В вентилируемую прослойку воздух проходит через нижние вентиляционные отверстия в стене.

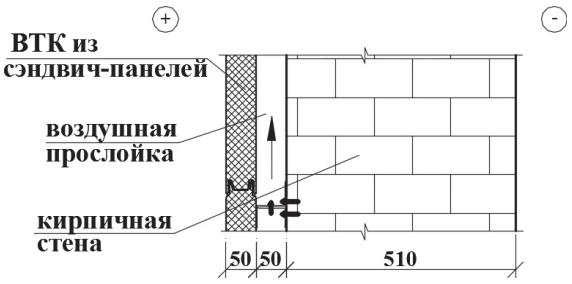

Рисунок 1. Устройство внутреннего теплоизоляционного контура.

Для определения аэродинамических характеристик ограждающей конструкции с устройством ВТК в помещении ванного зала и достижения скорости воздуха в слабо/сильно вентилируемой воздушной прослойке в пределах 0,1...0,4 м/с [9, 10] выполнена продувка образца здания крытого бассейна при помощи инструмента SOLIDWORKS Flow Simulation для трехмерного моделирования низкоскоростных потоков, интегрированного в программный комплекс SOLIDWORKS 3D CAD [11].

В расчетной области программного комплекса SOLIDWORKS построен образец здания крытого бассейна с вентиляционными отверстиями на фасаде (рис. 2). Внутри помещения ванного зала предусмотрено устройство внутреннего теплоизоляционного контура (ВТК). В части здания, где находится непосредственно ванный зал, запроектированы зенитные фонари и предусмотрены вентиляционные отверстия в конструкции стены и аналогичные вентиляционные отверстия в конструкции покрытия, с шагом 1 м. Вентиляционные отверстия выполнены на расстоянии 1 м от поверхности земли с учетом возможного намета снеговых мешков и 1 м от боковой стенки зенитного фонаря.

На первом этапе аэродинамического моделирования в среде SOLIDWORKS Flow Simulation была рассчитана внешняя задача в глобальных настройках расчетной модели и заданы необходимые параметры для расчетной области.

Природно климатические значения (температура наружного воздуха и средняя скорость ветра) приняты для г. Донецка Донецкой области, согласно документа [12]. Температура наружного воздуха принята для холодного месяца (январь) со значением –5,2 °С. Скорость ветра для расчета в SOLIDWORKS Flow Simulation принята для месяца январь и составляет 5,3 м/с.

На данном этапе расчета, были получены результаты внешнего обтекания воздушным потоком здания крытого бассейна. Проведен анализ и выявлены значения скорости и относительного давления в пределах рассматриваемых точек на фасаде (вентиляционных отверстиях). Определение значений скорости в вентиляционных отверстиях при внешнем обтекании необходимы для расчета во внутренней среде,

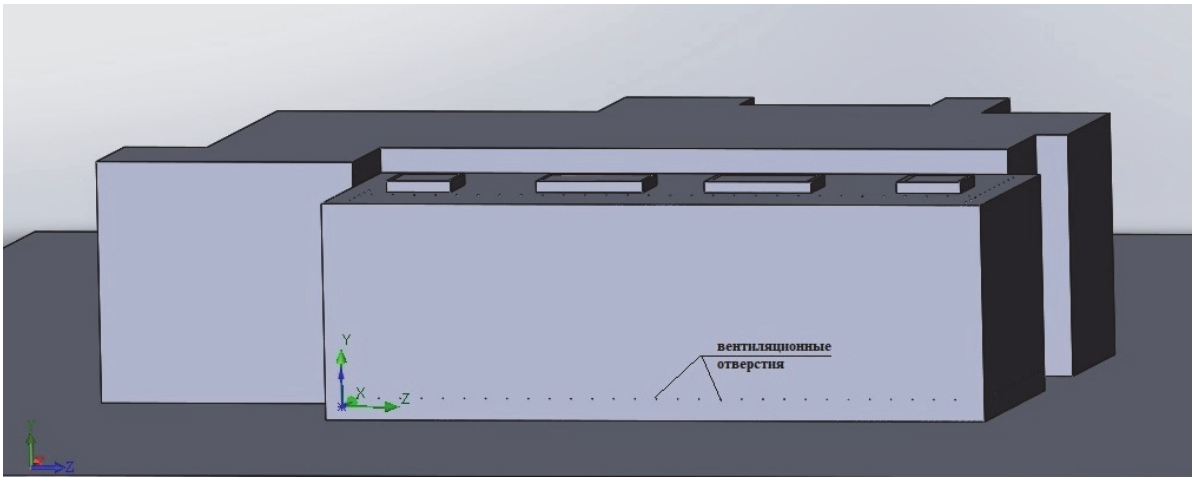

Рисунок 2. Образец здания крытого бассейна в программном комплексе SOLIDWORKS.

формирования воздушного потока в воздушной прослойке при естественной вентиляции с устройством внутреннего теплоизоляционного контура в помещении ванного зала зданий крытых бассейнов. По данным результатов внешнего обтекания установлено, что в точках, расположенных ближе к краевым границам поверхности наветренного фасада здания бассейна, скорость ветра увеличивается до 3,67 м/с (рис. 3).

Стоит отметить, что в карнизной части фасада отмечается увеличение скорости до 4,84 м/с. Однако в некоторых местах вдоль исследуемого фасада образуются ветровые застойные зоны. Поэтому фасад здания крытого бассейна, где находится помещение ванного зала, разбили на зоны: угловая и центральная зоны. Для помещения ванного зала зданий крытых бассейнов около 30 м длина угловой зоны составляет по 5 м с двух сторон фасада. Центральная часть имеет длину 20 м (рис. 4).

Далее, для получения трехфакторной линейной множественной регрессии, на основании полученных данных внешнего обтекания, были выполнены 8 опытов (наблюдений) во внутренней

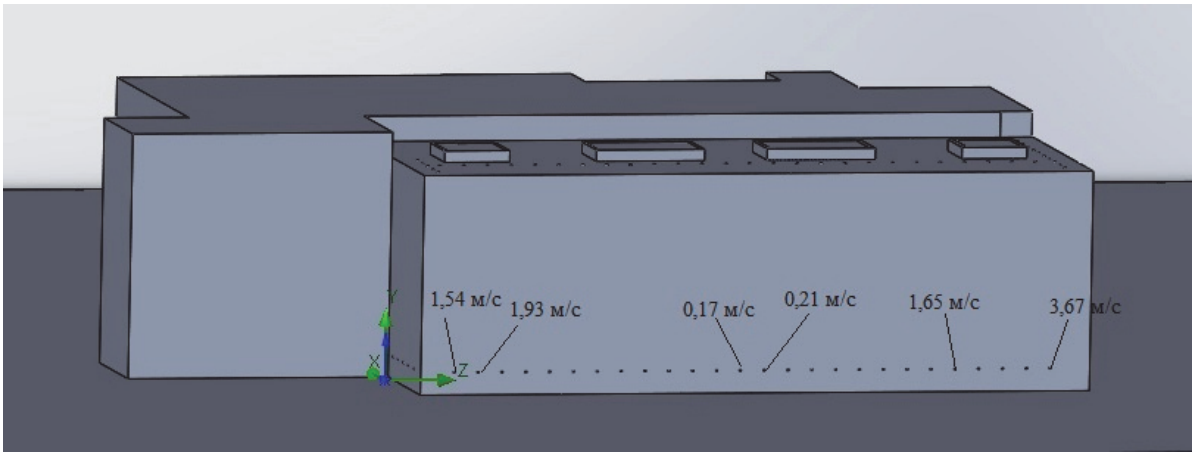

Рисунок 3. Полученные данные внешнего обтекания воздушным потоком здания крытого бассейна в программном комплексе SOLIDWORKS.

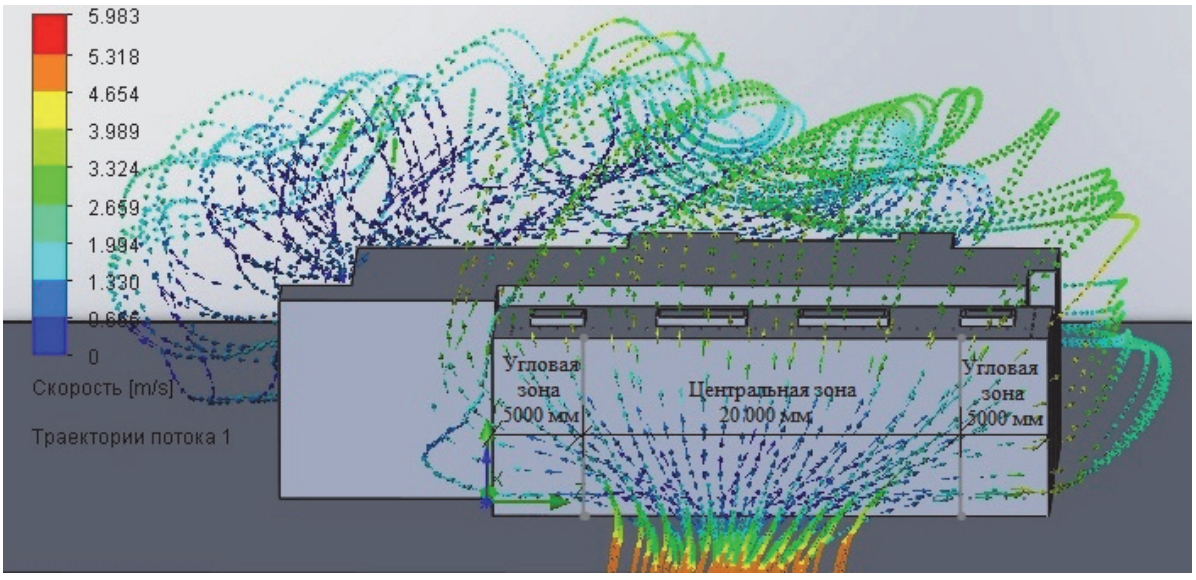

Рисунок 4. Разбивка на угловую и центральную зоны в программном комплексе SOLIDWORKS.

среде программного комплекса SOLIDWORKS Flow Simulation. В результате дальнейшего моделирования с учетом зонирования исследуемого фасада определили скорости и траекторию воздушного потока в вентилируемой воздушной прослойке (рис. 5).

Для определения параметров линейной множественной регрессии отобраны следующие факторы: X_1 – площадь вентиляционных отверстий; X_2 – толщина вентилируемой прослойки; X_3 – высота здания бассейна. В качестве исследуемого показателя «Y» в линейной множественной регрессии принята скорость воздушного потока в вентилируемой воздушной прослойке внутреннего теплоизоляционного контура ($\mathbf{V_{вп}}$). Исследования проводились на основании 8 экспериментов для получения адекватной модели регрессии при изменении факторов на двух уровнях варьирования: минимальных и максимальных (min, max).

Минимальные и максимальные значения для принятых факторов приведены в таблице 1.

По полученным данным во внутренней среде программного комплекса SOLIDWORKS, на основании показателей корреляционной матрицы и регрессионного анализа было установлено, что фактор X_3 (высота здания бассейна, мм) является статистически незначимым фактором. Поэтому для дальнейших расчетов проведены дополнительно 4 эксперимента (наблюдения) с увеличенной площадью вентиляционного отверстия и принята двухфакторная модель, без учета фактора X_3.

Для получения двухфакторной модели регрессии приняты следующие факторы и min, max уровни их варьирования:

– *для угловой зоны*: X_1 – площадь вентиляционного отверстия, м^2; минимальное значение «–» 0,0078 м^2; максимальное значение «+» 0,0325 м^2; X_2 – толщина вентилируемой прослойки, мм; минимальное значение «–» 0,03 м; максимальное значение «+» 0,1 м;

– *для центральной зоны*: X_1 – площадь вентиляционного отверстия, м^2, минимальное значение «–» 0,006 м^2; максимальное значение «+» 0,01625 м^2; X_2 – толщина вентилируемой прослойки, минимальное значение «–» 0,03 м; максимальное значение «+» 0,1 м.

а) б)

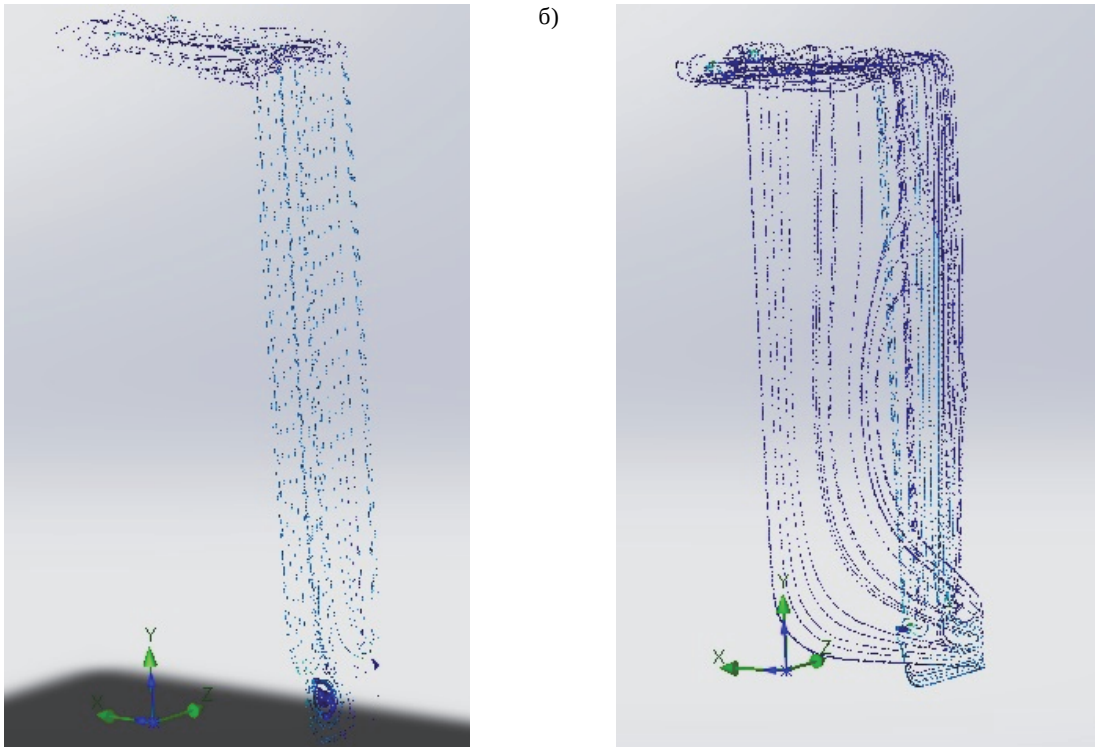

Рисунок 5. Определение скорости и направления воздушного потока во внутренней среде программного комплекса SOLIDWORKS: а) для центральной зоны; б) для угловой зоны.

Таблица 1. Минимальные и максимальные значения принятых факторов

Уровни варьирования	Факторы		
	X_1, мм^2	X_2, мм	X_3, мм
«–» min	2 500	30	10 000
«+» max	22 500	100	5 000

Таблица 2. Скорость воздушного потока в воздушной прослойке для угловой зоны

№ опыта	Кодированные величины		Факторы		$Y=V_{ВП}$, скорость воздушного потока в воздушной прослойке, м/с
	X_1	X_2	$S_{отв}$	$t_{вп}$	
1	+	+	0,0325	0,1	0,165
2	+	–	0,0325	0,03	0,194
3	–	–	0,0078	0,03	0,068
4	–	+	0,0078	0,1	0,043

Таблица 3. Скорость воздушного потока в воздушной прослойке для центральной зоны

№ опыта	Кодированные величины		Факторы		$Y=V_{ВП}$, скорость воздушного потока в воздушной прослойке, м/с
	X_1	X_2	$S_{отв}$	$t_{вп}$	
1	+	+	0,01625	0,1	0,167
2	+	-–	0,01625	0,03	0,198
3	-–	-–	0,006	0,03	0,085
4	-–	+	0,006	0,1	0,053

Обработка данных и полученные результаты для прогнозирования скорости воздушного потока в воздушной прослойке при устройстве внутреннего теплоизоляционного контура показаны в таблице 2 для угловой зоны, и в таблице 3 для центральной зоны соответственно.

На основании полученных данных в процессе исследований получены уравнения линейной множественной регрессии для прогнозирования скорости воздушного потока в воздушной прослойке $V_{ВП}$ при устройстве внутреннего теплоизоляционного контура с учетом зонирования исследуемого фасада в натуральных величинах:
– уравнение для угловой зоны фасада ванного зала:

$$V_{ВП} = Yрасчет = 0,04+5,02 \cdot S_{отв} - 0,39 \cdot t_{вп}, \quad (1)$$

– уравнение для центральной зоны фасада ванного зала:

$$V_{ВП} = Yрасчет = 0,03+11,07 \cdot S_{отв} - 0,45 \cdot t_{вп}, \quad (2)$$

где $S_{отв}$ – площадь вентиляционных отверстий, мм^2;

$t_{вп}$ – толщина вентилируемой прослойки, мм.

Стоит отметить, что в процессе многочисленных экспериментов установлено, что прямоугольное сечение вентиляционных отверстий увеличивает скорость воздушного потока в вентилируемой воздушной прослойке по сравнению с квадратным сечением вентиляционных отверстий.

Выводы

Полученная модель линейной множественной регрессии позволяет прогнозировать скорость воздушного потока в воздушной прослойке ВТК при заданных параметрах, что позволяет скорректировать размеры вентиляционных отверстий и толщину воздушной прослойки при устройстве ВТК для зданий крытых бассейнов.

Установлено, что для достижения движения воздушного потока в вентилируемой воздушной прослойке со скоростью в пределах 0,1...0,4 м/с для угловой зоны требуются вентиляционные отверстия площадью от 78 до 325 см^2, выполненные с шагом 1 м, для центральной зоны требуются вентиляционные отверстия меньшей площадью от 60 до 162,5 см^2 выполненные, с шагом 1 м.

Литература

1. СП 31 113 2004. Бассейны для плавания = Swimming pools : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказами ректора Санкт Петербургской государственной академии физической культуры им. П. Ф. Лесгафта от 9 февраля 2005 г. № 25 и директора ФГУП «Институт общественных зданий» от 23 апреля 2004 г. № 11 : введен впервые : дата введения 2004 04 30 / разработан Санкт Петербургской государственной академией физической культуры им. П. Ф. Лесгафта (СПб. ГАФК) Росспорта и ФГУП «Научно проектный институт учебно воспитательных, торгово бытовых и досуговых зданий» (Институт общественных зданий). – Москва : Госстрой России, 2005. – 76 с. – Текст : непосредственный.
2. ДБН В.2.6 31:2006. Теплова ізоляція будівель : затверджено та введено в дію Наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово комунального господарства України від 09.09.2006 р. № 301 : на зміну СНиП II 3 79 : надано чинності 2007 04 01 / розроблено Державним науково дослідним інститутом будівельних конструкцій. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 71 с. – Текст : непосредственный.
3. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий = Thermal performance of the building : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 265 : на замену СНиП 23 02 2003 : дата введения 2013 07 01 / подготовлен Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики. – Москва : Минрегион России, 2012. – 95 с. – Текст : непосредственный.
4. Хлистун, Ю. В. Архитектурно строительное проектирование. Проектирование тепловой защиты зданий, строений, сооружений / Ю. В. Хлистун. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2015. – 402 с. – ISBN: 978 5 905916 17 5. – Текст : непосредственный.
5. Каратаев, О. Р. Плавательные бассейны. Проектирование, строительство, оборудование и эксплуатация : монография / О. Р. Каратаев, И. Е. Евграфов. – Казань : Изд во КНИТУ, 2016. – 176 с. – ISBN 978 5 7882 2042 0. – Текст : непосредственный.
6. Бирюзова, Е. А. Повышение энергоэффективности зданий и сооружений : учебное пособие /

Reference

1. SP 31 113 2004. Swimming pools. – Moscow : Federal Agency for Construction, Housing and Communal Services, 2005. – 76 p. – Text : direct. (in Russian)
2. DBN V.2.6 31:2006. Thermal insulation of buildings. – Kiev : Ministry for the Development of Communities and Territories of Ukraine, 2006. – 71 p. – Text : direct. (in Ukrainian)
3. SP 50.13330.2012. Thermal performance of the building. – Moscow : Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2012. – 95 p. – Text : direct. (in Russian)
4. Khlistun, Yu. V. Architectural and construction design. Design of thermal protection of buildings, structures, structures. – Saratov : IPR Media, 2015. – 402 p. – ISBN: 978 5 905916 17 5. – Text : direct. (in Russian)
5. Karatayev, O. R.; Yevgrafov, I. Ye.; Ministry of Education and Science of Russia; Kazan National Research Technological University. Swimming pools. Design, construction, equipment and operation : monograph. – Kazan : Publishing house KNRTU, 2016. – 176 p. – ISBN 978 5 7882 2042 0. – Text : direct. (in Russian)
6. Biryuzova, Ye. A.; Viktorova, O. L.; Grechishkin, A. V. Improving the energy efficiency of buildings and structures : a tutorial. – Penza : Penza State University of Architecture and Construction, EBS ASV, 2012. – 176 p. – ISBN 978 5 9282 0787 8. – Text : direct. (in Russian)
7. Mazur, V. A.; Novitskaya, Ye. I. Factors affecting the operational characteristics of the enclosing structures of indoor swimming pool buildings. – Text : direct. – In: *Resource efficient technologies in the construction complex of the region: collection of scientific papers based on the materials of the VI International scientific practical conference* : in 2 volumes. – Saratov : Publishing house of the Saratov State Technical University, 2018. – Volume 1. – P. 479–482. (in Russian)
8. Mazur, V. A.; Novitskaya, Ye. I. Internal thermal insulation circuit for indoor swimming pool buildings. – Text : direct. – In : *Ways of development of the construction complex and tasks for the Donetsk People's Republic : a collection of abstracts of the Republican scientific and practical round table* (with international participation). – Makeevka : DNACEA, 2020. – P. 25–27. (in Russian)

Е. А. Бирюзова, О. Л. Викторова, А. В. Гречишкин. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ЭБС АСВ, 2012. – 176 с. – ISBN 978 5 9282 0787 8. – Текст : непосредственный.

7. Мазур, В. А. Факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики ограждающих конструкций зданий крытых бассейнов / В. А. Мазур, Е. И. Новицкая. – Текст : непосредственный // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона : сборник научных трудов по материалам VI Международной научно практической конференции : в 2 томах, 16–23 апреля 2018 г. – Саратов : Изд во СГТУ, 2018. – Том 1. – С. 479–482.
8. Мазур, В. А. Внутренний теплоизоляционный контур для зданий крытых бассейнов / В. А. Мазур, Е. И. Новицкая. – Текст : непосредственный // Пути развития строительного комплекса и задачи для Донецкой Народной Республики : сборник тезисов докладов Республиканского научно практического круглого стола (с международным участием), 19 декабря 2019 г. – Макеевка : ДОННАСА, 2020. – С. 25–27.
9. Гагарин, В. Г. Скорость движения воздуха в прослойке навесной фасадной системы при естественной вентиляции / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, К. И. Лушин. – Текст : непосредственный // Научно технический и производственный журнал Жилищное строительство. – 2013. – № 10. – С. 14–17.
10. ГОСТ Р 57356 2016 / EN ISO 6946:2007. Конструкции ограждающие строительные и их элементы. Метод расчета сопротивления теплопередаче и коэффициента теплопередачи = Non load bearing building constructions and building elements. Calculation method of thermal resistance and thermal transmittance : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2016 г. № 2026 ст : введен впервые : дата введения 2017 07 01 / подготовлен Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва : Стандартинформ, 2017. – 23 с. – Текст : непосредственный.
11. SOLIDWORKS Flow Simulation 2019 Overview. Текст: электронный // SOLIDWORKS : официальный сайт. – 2021. – URL: https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks flow simulation (дата обращения: 22.09.2021).
12. ДСТУ Н Б В.1.1 27:2010. Будівельна кліматологія : видання офіційне: прийнято та надано чинності Наказом Мінрегіонбуду України від 16.12.2010 р. № 511 : на зміну СНиП 2.01.01 82 і таблиці 2 ДСТУ Н Б А.2.2 5:2007 : надано чинності з 2011 11 01 / розроблено ДП «Державний

9. Gagarin, V. G.; Kozlov, V. V.; Lushin, K. I. Air velocity in the interlayer of the hinged facade system with natural ventilation. – Text : direct. – In: *Scientific technical and industrial journal Housing construction*. – 2013. – № 10. – P. 14–17. (in Russian)
10. GOST R 57356 2016 / EN ISO 6946:2007. Non load bearing building constructions and building elements. Calculation method of thermal resistance and thermal transmittance. – Moscow : Standardinform, 2017. – 23 p. – Text : direct. (in Russian)
11. SOLIDWORKS Flow Simulation 2019 Overview. – Text : electronic. – In: SOLIDWORKS : official website. – 2021. – URL: https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks flow simulation (date of the application: 22.09.2021).
12. DSTU N B V.1.1 27:2010. Building climatology. – Kiev: Ministry for the Development of Communities and Territories of Ukraine, 2011. – 123 p. – Text : direct. (in Ukrainian)

науково дослідний інститут будівельних кон
струкцій». – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. –
123 с. – Текст : непосредственный.

Мазур Виктория Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные инте ресы: совершенствование конструктивно технологических решений по устройству и капитальному ремонту ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Новицкая Елена Ивановна – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Дон басская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: устройство и реконструк ция ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Крупенченко Анна Викторовна – старший преподаватель кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасской национальной академии строительства и архитектуры». Научные интересы: техноло гия и организация работ при реконструкции зданий и сооружений.

Мазур Вікторія Олександрівна – кандидат технічних наук , доцент кафедри технології і організації будів ництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: удоскона лення конструктивно технологічних рішень по влаштуванню і капітальному ремонту огороджувальних кон струкцій будівель і споруд.

Новицька Олена Іванівна – асистент кафедри технології і організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: улаштування та реконструкція огороджу вальних конструкцій будівель та споруд.

Крупенченко Ганна Вікторівна – старший викладач кафедри технології і організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: технологія і організація робіт при реконструкції будівель та споруд.

Mazur Victoria – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Technology and Organization of Building Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: improvement of structural and technological solutions for the arrangement and overhaul of building envelopes of buildings and structures.

Novitskaya Elena – Assistant, Technology and Organization of Building Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: installation and reconstruction of building envelopes of buildings and structures.

Krupenchenko Anna – Senior Lecturer, Technology and Organization of Building Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology and organization of work during the reconstruction of buildings and structures.