

Известия вузов. Строительство. 2022. № 6. С. 70–80.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (6): 70–80.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 697.92.001.24

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-70-80

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕОРИИ ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ПЕРЕМЕННОГО ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Сергей Владимирович Чуйкин, Александр Васильевич Лобода

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Целью исследования является разработка структурно-логического алгоритма математического моделирования воздушных потоков в помещении сложной конфигурации на основе принципов теории функции комплексного переменного. В рамках исследования разработана методика математического моделирования вентиляционных потоков в помещении сложной конфигурации, отличающаяся от существующих применением формулы Кристоффеля–Шварца. Это позволяет получить аналитическое решение задачи построения скоростных полей в помещениях сложной конфигурации при различном количестве приточных и вытяжных устройств.

Ключевые слова: вытесняющая вентиляция, конформные отображения, поле скоростей, линии тока, функция комплексного переменного

Для цитирования: Чуйкин С.В., Лобода А.В. О применении теории функции комплексного переменного при моделировании воздушных потоков вытесняющей вентиляции // Известия вузов. Строительство. 2022. № 6. С. 70–80. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-70-80.

Original article

ON THE APPLICATION OF THE THEORY OF THE FUNCTION OF A COMPLEX VARIABLE IN THE MODELING OF AIR FLOWS OF DISPLACING VENTILATION

Sergey V. Chuykin, Alexander V. Loboda

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The aim of the study is to develop a structural and logical algorithm for mathematical modeling of air flows in a room of complex configuration based on the principles of the theory of the function of a complex variable. Within the framework of the study, a method of mathematical modeling of ventilation flows in a room of complex configuration has been developed, based on the theory of the function of a complex variable, and differing from existing ones by using the Christoffel–Schwartz formula. This makes it possible to obtain an analytical solution to the problem of constructing high-speed fields in rooms of complex configuration with a different number of supply and exhaust devices.

Keywords: displacement ventilation, conformal mappings, velocity field, current lines, complex variable function

For citation: Chuykin S.V., Loboda A.V. On the application of the theory of the function of a complex variable in the modeling of air flows of displacing ventilation. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (6): 70–80. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-70-80.

1. Введение. В соответствии с законами гидрогазодинамики существуют два основных режима движения газообразной среды: ламинарный и турбулентный. Применительно к прикладным задачам вентиляции помещений принято выделять два способа организации воздухораспределения, обусловленных режимом течения воздушных потоков. Наибольшее распространение получил способ, называемый перемешивающей вентиляцией [1, 2]. Он характеризуется значительной турбулентностью и вихреобразованием. За счет этого его определяющей особенностью является интенсивный теплообмен приточного воздуха с выделяющимися вредностями (теплотой, углекислым газом, влагой и т.п.), что в свою очередь выступает основным недостатком при обеспечении санитарно-эпидемиологических требований к современным системам вентиляции. Данная проблема приобрела особую актуальность после начала распространения опасных вирусных заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. Высокая степень перемешивания воздуха в обслуживаемой зоне может привести к более широкому распространению вредностей в воздухе помещения.

Избежать интенсивного перемешивания вредных веществ позволяет второй способ организации воздухораспределения, получивший название вытесняющей вентиляции, которая широко применяется в медицинских учреждениях (операционных) и производствах (чистые помещения). Данный способ представляет собой организацию своего рода поршня, который выдавливает вредные вещества в направлении воздухозаборных устройств. При этом скорость подачи приточного воздуха сравнима с подвижностью воздуха в помещении, а следовательно, не образуются значительных завихрений и застойных зон, и движение газовой смеси близко к ламинарному [3–7].

Подобная схема воздухораспределения позволяет применять более точные аналитические методы моделирования параметрических полей воздушных потоков, что дает возможность избежать сложных компьютерных вычислений, основывающихся на решении систем дифференциальных уравнений с частными производными. Примером подобных аналитических методов служит моделирование вентиляционных потоков, основывающееся на принципах теории функции комплексного переменного (ТФКП) [8–11]. В настоящее время отсутствует четкая методика моделирования полей скорости воздушных потоков и направления их движения, базирующаяся на ТФКП. В этой связи основной целью данной статьи является разработка структурно-логического алгоритма математического моделирования воздушных потоков в помещении сложной конфигурации на основе принципов ТФКП.

2. Материалы и методы исследования. В работах [5, 9, 10] указывалось, что главным допущением в случае применения ТФКП при моделировании воздушных потоков в помещении является переход от системы дифференциальных уравнений гидрогазодинамики к более простой системе урав-

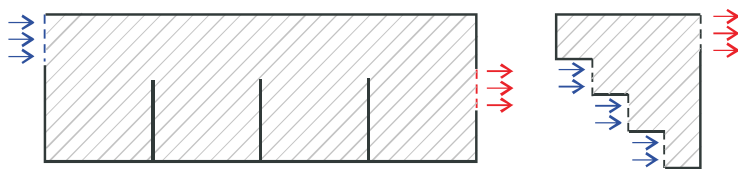


Рис. 1. Пример схем воздухораспределения в помещениях

Fig. 1. Example of indoor air distribution schemes

нений Коши–Римана, что означает необходимость выполнения условия несжимаемости движущейся газовой среды и ее безвихревое течение. Согласно работам [12–14] применение рассматриваемой теории подразумевает решение нескольких задач: выявление условий существования отображения, а также его уникальности; установление классов областей, отображение которых осуществляется с помощью простейших функций; на базе основных свойств аналитических функций производится изучение отображения в зависимости от вида областей; разрабатываются приближенные методы отображений. С учетом вышесказанного, необходимо разработать методику моделирования потоков воздуха в помещении сложной конфигурации при вытесняющей вентиляции.

2.1. Последовательность моделирования воздушных потоков. Поскольку решение задач построения параметрических полей воздуха на основе теории функции комплексного переменного производится в двумерной постановке, рассматриваемые области представляют собой плоские фигуры различной формы (прямоугольники, ромбы, трапеции, многоугольники и т.п.). Приточные и воздухозаборные устройства целесообразно располагать таким образом, чтобы они подсказывали «естественную» конфигурацию линий тока. Таким образом, на первом этапе моделирования необходимо определить схему воздухораспределения, т.е. расположение приточных и вытяжных устройств. На рис. 1 изображены примеры схем воздухораспределения помещения с преградами и без них. Синими стрелками обозначен приток, красным – удаление воздуха.

Кроме того, так как в помещении должен выполняться воздушный баланс, особую важность имеет количество точек подачи и удаления воздуха. Следовательно, режим течения газовой среды при подаче расчетного объема притока с помощью нескольких воздухораспределителей с большим рабочим сечением (например, перфорированный воздухораспределитель) и удалении его из одной ограниченной в размерах зоны помещения будет значительно отличаться, если воздухозаборных точек будет несколько.

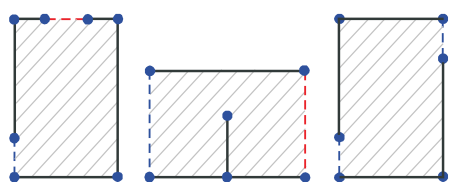


Рис. 2. Контрольные точки исследуемой области

Fig. 2. Control points of the studied area

После определения схемы воздухораспределения необходимо осуществить анализ предполагаемой расчетной области помещения. При анализе нужно описать форму помещения, его размеры, наличие или отсутствие преград в виде стен, оборудования и т.п., а также определить координаты характеризующих точек. Так, на рис. 2 показаны характерные точки для трех помещений.

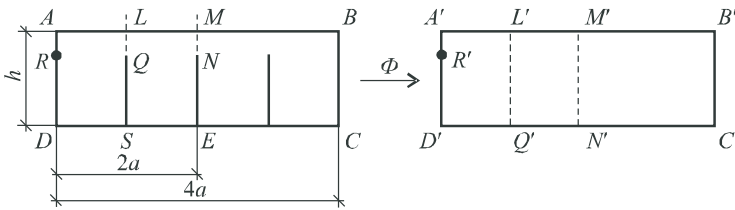


Рис. 3. Преобразование Φ помещения с преградами

Fig. 3. Transformation Φ of a room with obstacles

В первом и третьем случае данные точки располагаются в углах помещений, а также в местах установки приточных и вытяжных устройств. Во втором случае, кроме упомянутых, добавляются точки размещения преграды в виде стены, которая будет огибаться воздушным потоком. На рис. 2 пунктирными линиями обозначены приточные и вытяжные устройства. Необходимо отметить, что количество и расположение контролируемых точек будет зависеть как от геометрической формы расчетной области, так и от ее размеров.

На третьем этапе осуществляется построение простейшего вида расчетной области. Это необходимо для упрощения расчетов, например, для помещения с преградами, изображенного на рис. 1, упрощение будет сводиться к известному в ТФКП принципу симметрии. Тогда достаточно построить отображение Φ_1 половины исходного прямоугольника с отверстием MN на какой-либо прямоугольник неизвестных размеров с отрезком $M'N'$, занимающим всю стену (рис. 3) [8, 9]. Линии тока являются образами горизонтальных линий в простейших областях при обсуждаемых отображениях.

Если помещение представляет собой более сложную фигуру, имеющую ряд выступов, как показано на рис. 1, необходимо более сложное преобразование. В работе [10] предлагается разбить данную область на элементарные прямоугольники с одним приточным и вытяжным устройствами и рассматривать их по отдельности, а полученные решения объединить. Однако разделение помещения на части носит искусственный характер, в связи с чем точность расчетной модели в местах склейки решений нуждается в проверке. Избежать данного недостатка можно путем рассмотрения сложной фигуры целиком, но с более сложным преобразованием (рис. 4). Необходимо таким образом «сжать» выступающие части помещения, чтобы они представляли собой элементарные точки, которые не влияют на принципиальную картину течения воздуха.

После технических преобразований следуют основные этапы, которые можно привести к следующей последовательности для некоторых элементарных примеров:

1) преобразование прямоугольника реальных размеров в прямоугольник, для которого существует решение при заданном параметре, т.е. перед применением отображения необходимо произвести расширение исходной фигуры;

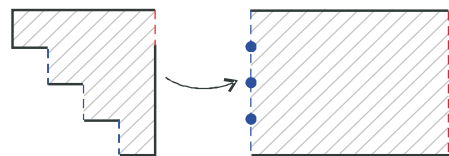


Рис. 4. Преобразование ступенчатого помещения к простейшему виду

Fig. 4. Transformation of a stepped room to the simplest form

2) преобразование прямоугольника в полуплоскость под действием эллиптического синуса;

3) преобразование полуплоскости в полуплоскость под действием дробно-линейного отображения.

Таким образом, например, для случая симметричного помещения с перегородками (см. рис. 3), пользуясь принципом симметрии при наличии отображения Φ_1 , требуемое в исходной задаче отображение Φ совпадает с Φ_1 на левой половине начальной фигуры с тремя перегородками, а на правую половину продолжается симметричным образом [8, 9]. Описание подобного отображения опирается на свойства эллиптического интеграла первого рода [5, 8–11]

$$F(z, \alpha) = \int_0^z \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-\alpha^2 t^2)}} \quad (0 < \alpha < 1) \quad (1)$$

и обратной к нему функции, называемой эллиптическим синусом. При рассмотрении этих функций в качестве промежуточной области используется верхняя полуплоскость, в которой и задается функция (1).

В свою очередь, построение отображения Φ_1 можно свести к поиску еще более простого, пользуясь тем же принципом симметрии. В этом случае необходимо рассмотреть вспомогательную задачу, которая заключается в построении отображения Φ_2 прямоугольника $ALSD$ с отрезком LQ на какой-либо прямоугольник с отрезком $L'Q'$. Φ_2 необходимо строить как суперпозицию трех отображений

$$\Phi = F(w, \beta)wF^{-1}(z, \alpha), \quad (2)$$

где $F(w, \beta)$ – отображение, осуществляемое интегралом (1) с некоторым параметром β , $w = g(\zeta)$ – некоторый дробно-линейный автоморфизм (отображение на себя) верхней полуплоскости, $\zeta = F^{-1}(z, \alpha)$ – эллиптический синус с известным параметром α .

Дробно-линейное отображение из формулы (2) можно записать в виде

$$w = g(\zeta) = \frac{A\zeta + B}{\zeta + D}, \quad (3)$$

где A, B, D – некоторые вещественные коэффициенты.

В итоге Φ_1 , решающее исходную задачу, также строится как суперпозиция трех отображений. Упомянутые в уравнениях (1)–(3) коэффициенты определяются для каждого помещения при его преобразовании.

Для ступенчатого помещения (тип которого изображен на рис. 4) вместо эллиптического синуса необходимо выбрать формулу Кристоффеля–Шварца [13]:

$$Z = C \int_0^{\xi} (t - \xi_0)^{\alpha_0 - 1} (t - \xi_1)^{\alpha_1 - 1} \mathbf{K} (t - \xi_5)^{\alpha_5 - 1} dt + C_1, \quad (4)$$

$$\alpha_0 = \mathbf{K} = \alpha_4 = \frac{1}{2}, \quad \alpha_5 = \frac{3}{2}.$$

Замечание 1. Константы C, C_1 и точки $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_5$ подбираются из соображений удобства и наглядности вычислений (в нашем примере положены $C = i$ и $C_1 = 0$).

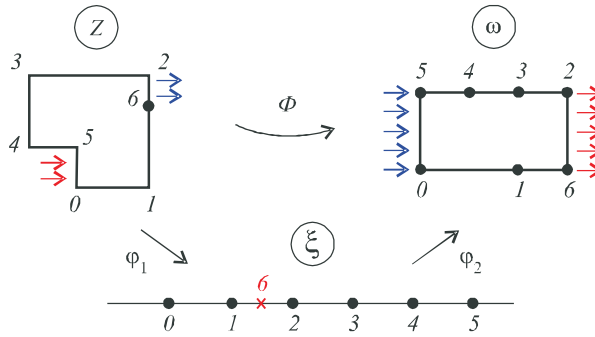


Рис. 5. Схема преобразования многоугольника

Fig. 5. Transformation of a stepped room to the simplest form

Замечание 2. Интеграл (4) можно считать, разбирая его на сумму интегралов по отдельным промежуткам. При этом каждый из частичных интегралов является несобственным, что несколько усложняет вычисления.

Таким образом, отображение многоугольника можно представить в виде (рис. 5): а) отображение $\varphi_2(\xi)$ с помощью эллиптического интеграла; б) отображение $\varphi_1^{-1}(\xi)$ верхней полуплоскости на многоугольную фигуру, описываемое формулой Кристоффеля–Шварца.

На завершающем этапе осуществляется моделирование параметрических полей вентиляционных потоков, включающее построение линий тока и определение скорости в произвольной точке выбранной области согласно принципу об известном отображении сложной фигуры на ее упрощенный образ. Тогда касательные к линиям тока (определяющие скорость течения) вычисляются простым дифференцированием по комплексной переменной

$$\frac{dw}{dz} = v_x + iv_y, \quad (5)$$

где v_x – проекция скорости на ось OX ;

v_y – проекция скорости на ось OY ;

w – комплексный потенциал некоторого течения.

Скалярная величина скорости воздушного потока определяется равенством

$$v = |v_x + iv_y| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (6)$$

Поскольку при построении линий тока, определяющих скорость течения среды в помещении, используется описанное ранее отображение, скорость воздуха является произведением производных каждого шага преобразования.

2.2. Структурно-логическая схема моделирования. Согласно приведенной выше последовательности расчета, можно составить структурно-логическую схему применения ТФКП при моделировании воздушных потоков в помещении (рис. 6).

3. Результаты и обсуждение. Для помещения, представленного на рис. 3, при визуализации воздушных потоков в рассматриваемой задаче достаточно построить линии, являющиеся образами горизонтальных сечений

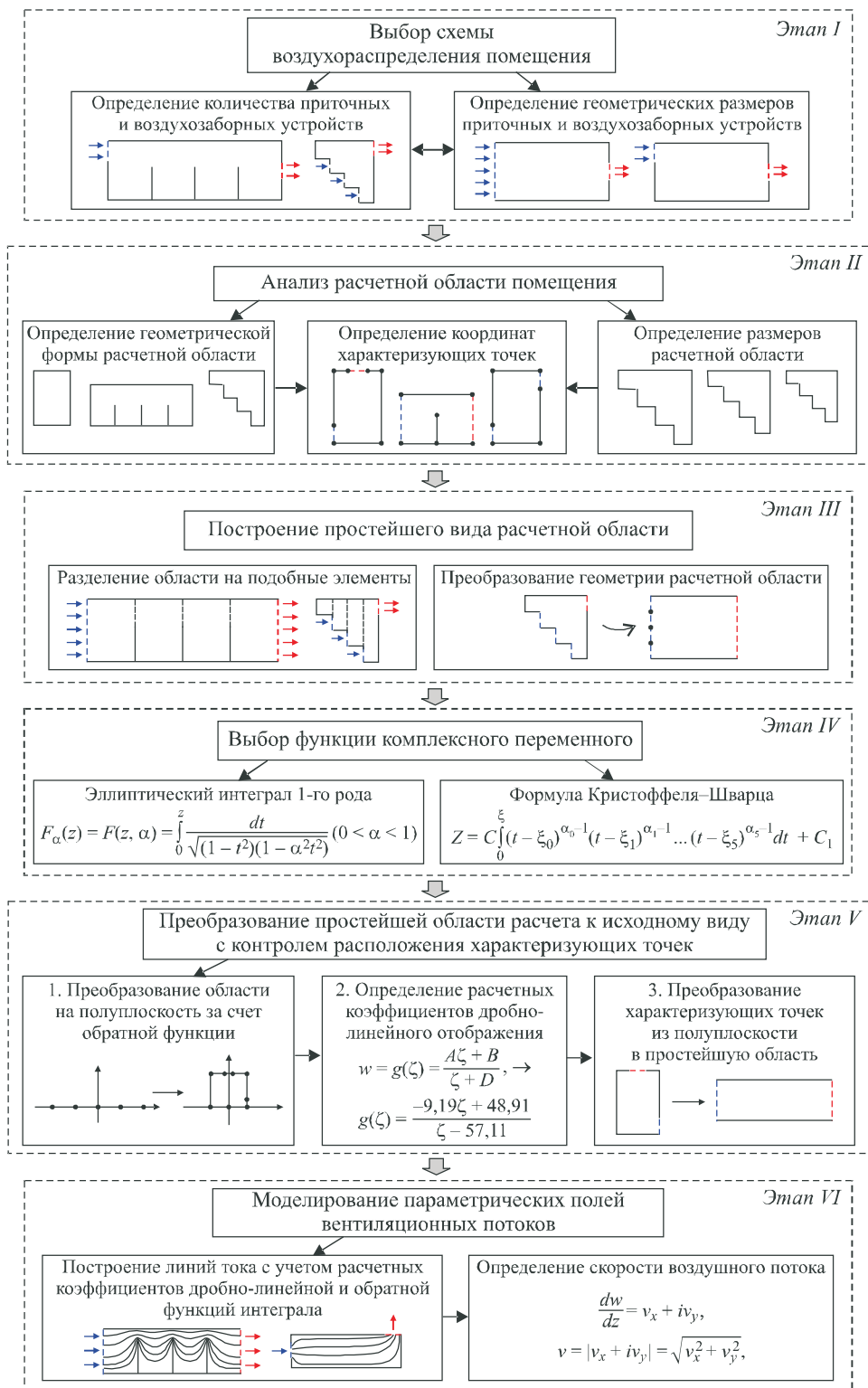


Рис. 6. Структурно-логическая схема моделирования потоков воздуха

Fig. 6. Structural and logical scheme of modeling air flows

прямоугольника под действием отображения Φ_2^{-1} . В свою очередь, после растяжения получившейся фигуры к этим линиям применяется еще одно отображение, переводящее фигуру в прямоугольник с перегородкой. На заключительном этапе построения линий тока достаточно произвести симметричное их отображение относительно оси симметрии.

Обратим внимание на следующий момент, важный для дальнейшего изложения. Горизонтальные линии рассматриваются поточечно, выделяя на каждой из них 21 точку. При этом образы 9 из них попадают в левую половину новой прямоугольной фигуры, а 12 остальных – в правую. Такое перераспределение точек на изучаемой линии важно потому, что следующее отображение, применяемое к средней фигуре, описано выше явными формулами лишь на левой половине этой фигуры. Отображение ее правой части определяется соображениями симметрии.

Окончательная схема линий тока воздуха для рассматриваемого помещения с преградами после расчета в программной среде Maple примет вид, представленный на рис. 7.

Необходимо отметить, что в связи с увеличением значений скорости воздушных потоков повышается степень турбулизации и вихреобразования, и модель, основанная на ТФКП, не гарантирует точного описания происходящих изменений и ограничивается некоторым интервалом критерия подобия Рейнольдса. Таким образом, определение скорости воздушного потока в произвольной точке пространства сводится к поиску производной в этой точке на каждом шаге преобразования, и модель для рассматриваемого примера примет вид:

– для первой четверти помещения

$$v_1 = \frac{11,593}{\sqrt{\sqrt{\frac{(t_1^2 - 1)(87,8t_1^2 - 100)(t_3^2 - 1)(13,69t_3^2 - 100)}{(0,1t_1 + 0,3311)^4(t_2^2 - 1)(4,84t_2^2 - 6,25)(0,1t_3 + 0,919)^4(t_4^2 - 1)(0,09t_4^2 - 25)}}}}; \quad (7)$$

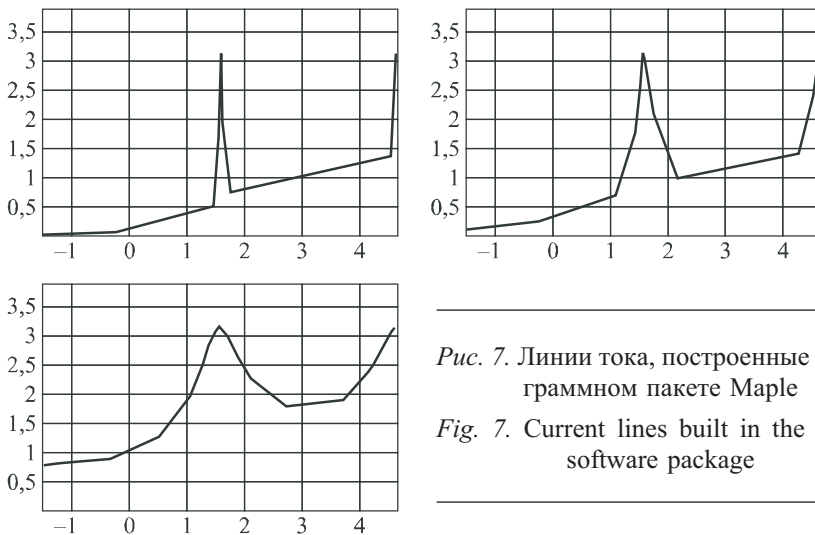


Рис. 7. Линии тока, построенные в программном пакете Maple

Fig. 7. Current lines built in the Maple software package

– для второй четверти помещения

$$v_{II} = \frac{2,799}{\sqrt{\frac{(t_1^2 - 1)(87,8t_1^2 - 100)(t_3^2 - 1)(13,69t_3^2 - 100)}{(0,1t_1 + 0,3311)^4(t_2^2 - 1)(4,84t_2^2 - 6,25)(2t_3 + 18,71)^4(t_4^2 - 1)(0,09t_4^2 - 25)}}}, \quad (8)$$

где комплексные переменные t_1 , t_2 , t_3 и t_4 соответствуют положению отображаемой точки на отдельных шагах преобразования.

4. Выводы. Разработана структурно-логическая схема математического моделирования воздушных потоков в помещении сложной конфигурации на основе принципов теории функции комплексного переменного, которая дает точное аналитическое решение задачи определения полей скорости вентиляционных потоков. Важной характеристикой предложенной методики является возможность применения формул Кристоффеля–Шварца (и в частности, эллиптического синуса) на отдельных этапах преобразования расчетной области, что позволяет учитывать влияние переменного количества приточных и вытяжных устройств на развитие линий тока и показателей скорости воздуха в произвольных точках помещения.

Список источников

1. *Скляр К.А., Черемисин А.В., Павлюков С.П.* Двухмерное стационарное движение воздушного потока в помещениях с перегородками // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 1. С. 118–123.
2. *Волков А.А., Марголина И.С., Бородкин А.А.* Особенности распределения воздуха в системах вентиляции зрительных залов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2010. № 2. С. 54–60.
3. *Гусенцова Я.А.* Дополнение Хантли при определении области рационального использования вытесняющей вентиляции // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2013. № 5. С. 81–84.
4. *Нагорная А.Н., Морозова Н.С.* Проблемы организации воздухораспределения при вытесняющей вентиляции с переменным расходом воздуха на примере зрительного зала театра // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13, № 2. С. 65–68.
5. *Loboda A.V., Kuznetsov S.N.* The use of the method of conformal mappings to determine velocity fields of air flows in ventilation problems // Scientific herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. 2011. No. 4. P. 18–26.
6. *Kuznetsov S.N.* A selection of ventilation mode in premises with moving sources of harmful substances // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2017. Vol. 33, no. 1. P. 15–22.
7. *Попов В.М., Бараков А.В., Кузнецов С.Н.* Аварийная вентиляция чистых помещений // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 2. С. 70–77.
8. *Chuykin S.V., Loboda A.V.* Determination of velocity fields of air streams in ventilated rooms with conformal mappings // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2013. Vol. 19, no. 3. P. 39–51.

9. Melkumov V.N., Kolodyazhnyi S.A., Chuykin S.V. Modelling air flows in premises using conformal mapping // Middle East Journal of Scientific Research. 2014. Vol. 22, no. 1. P. 79–81.
10. Мелькумов В.Н., Лобода А.В., Чуйкин С.В. Математическое моделирование воздушных потоков в помещениях больших объемов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 11–18.
11. Melkumov V.N., Chuykin S.V., Sklyarov K.A., Kolosov A.I. Conformal mapping in mathematical modelling of air flows in premises // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9, no. 18.
12. Иванов В.И., Попов В.Ю. Конформные отображения и их приложения. М.: Едиториал УРСС, 2002. 324 с.
13. Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ: В 2 ч. Ч. 1. 4-е изд., стер. М.: Лань, 2004. 336 с.
14. Авхадиев Ф.Г. Конформные отображения и краевые задачи. Киев: Математика, 1996. 216 с.

References

1. Sklyarov K.A., Cheremisin A.V., Pavlyukov S.P. Two-dimensional stationary air flow movement in rooms with partitions. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2008; (1): 118–123. (In Russ.).
2. Volkov A.A., Margolina I.S., Borodkin A.A. Features of air distribution in auditorium ventilation systems. *AVOK: Ventilyatsiya, otopleniye, konditsionirovaniye vozdukh, teplosnabzheniye i stroitel'naya teplofizika = AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermophysics*. 2010; (2): 54–60. (In Russ.).
3. Gusentsova Ya.A. Huntley's complement in determining the area of rational use of displacement ventilation. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG = Energy. Izvestia of Higher Educational Institutions and energy associations of the CIS*. 2013; (5): 81–84. (In Russ.).
4. Nagornaya A.N., Morozova N.S. Problems of organization of air distribution with displacement ventilation with variable air flow on the example of the theater auditorium. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*. 2013; 13(2): 65–68. (In Russ.).
5. Loboda A.V., Kuznetsov S.N. The use of the method of conformal mappings to determine velocity fields of air flows in ventilation problems. *Scientific herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2011; (4): 18–26.
6. Kuznetsov S.N. A selection of ventilation mode in premises with moving sources of harmful substances. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017; 33(1): 15–22.
7. Popov V.M., Barakov A.V., Kuznetsov S.N. Emergency ventilation of clean rooms. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2021; (2): 70–77. (In Russ.).
8. Chuykin S.V., Loboda A.V. Determination of velocity fields of air streams in ventilated rooms with conformal mappings. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013; 19(3): 39–51.
9. Melkumov V.N., Kolodyazhnyi S.A., Chuykin S.V. Modelling air flows in premises using conformal mapping. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2014; 22(1): 79–81.

10. Melkumov V.N., Loboda A.V., Chuykin S.V. Mathematical modeling of air flows in large-volume rooms. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014; (2): 11–18. (In Russ.).
11. Melkumov V.N., Chuykin S.V., Sklyarov K.A., Kolosov A.I. Conformal mapping in mathematical modelling of air flows in premises. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016; 9(18).
12. Ivanov V.I. Conformal mappings and their applications. Moscow, 2002. 324 p. (In Russ.).
13. Shabat B.V. Introduction to complex analysis. Moscow, 2004. 336 p. (In Russ.).
14. Avkhadiev F.G. Conformal maps and boundary value problems. Kiev: Matematika, 1996. 216 p. (In Russ.).

Информация об авторах

С.В. Чуйкин – кандидат технических наук, доцент, ser.chu@mail.ru

А.В. Лобода – доктор физико-математических наук, доцент, lobvgasu@yandex.ru

Information about the authors

S.V. Chuykin – PhD, Ass. Professor, ser.chu@mail.ru

A.V. Loboda – DSc, Ass. Professor, lobvgasu@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.03.2022
Одобрена после рецензирования 20.04.2022
Принята к публикации 27.05.2022

The article was submitted 21.03.2022
Approved after reviewing 20.04.2022
Accepted for publication 27.05.2022