

Численное моделирование движения лифтовой кабины в шахте высотного здания

Д.М. Денисихина, А.В. Меркулова

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет*

Аннотация: Рассмотрены воздушные потоки, возникающие при движении лифтовой кабины в шахте высотного здания с -4 по 58 этаж. Движущаяся кабина лифта, работая как поршень, вытесняет воздух перед собой из шахты и втягивает воздух в шахту позади себя. В качестве метода исследования использовался вычислительный комплекс STAR-ССМ+. Для моделирования нестационарной задачи движения лифтовой кабины использовалась технология скользящих сеток. Получено, что при движении лифтовой кабины со скоростью 7 м/с максимальные перепады давления на поверхностях лифтовой шахты составили 130 Па. Максимальный расход воздуха, поступающего за счет действия эффекта поршня через дверь в шахту лифта и из шахты лифта в холл, составляет около 250 м³/ч. Эта величина сопоставима по значению с расходами, формирующимися при естественном движении воздуха в лифтовой шахте за счет действия эффекта тяги в холодный период года и не может быть автоматически выкинута из рассмотрения.

Ключевые слова: высотное строительство, численное моделирование, эффект тяги, эффект поршня, лифтовая шахта.

Введение

В настоящее время строительство высотных зданий в России активно развивается, приобретая все большую актуальность. При этом, при проектировании высотных зданий приходится решать целый ряд уникальных задач, связанных с высокими статическими и динамическими нагрузками на несущие конструкции, сложностью решений инженерных систем, подбором материалов и конструкций и пр.

Одной из таких задач является проектирование вертикального транспорта в высотных зданиях. Лифты в высотных зданиях – это всегда технически сложные устройства, и при их проектировании необходимо обращать особое внимание на многие элементы, которые в обычных многоэтажных зданиях не оказывают заметного влияния на комфорт и безопасность поездки.

Лифтовые шахты – это одни из вертикальных соединений здания (наряду с лестничными клетками, технологическими шахтами для прокладки инженерных систем, вентиляционными каналами). Такие вертикальные соединения позволяют воздуху перетекать между этажами, формируя внутренний столб «теплого» воздуха с меньшими, по сравнению с холодным наружным воздухом, значениями плотности. В этих вертикальных каналах в холодный период года возникает тяга (как в печной трубе), формируя эффект тяги (stack effect) в зданиях [1, 2].

Чем больше разность плотностей внутреннего и наружного воздуха, тем большие перепады давления будут формироваться на ограждающих конструкциях здания [3, 4], препятствуя его нормальному функционированию. В результате, в холодное время года в высотном здании могут возникнуть (и как правило возникают) серьезные проблемы, связанные с действием эффекта тяги. К таким проблемам относятся: заклинивание дверей лифтов, затрудненность открытия наружных и внутренних дверей, шум, возникающий из-за прохода воздуха через неплотности.

Одной из мер уменьшения действия эффекта тяги в здании является охлаждение лифтовых шахт [5]. Кроме того, уменьшить негативные последствия эффекта тяги можно путем изменения положения линии нейтрального давления, подавая приточный воздух в шахту лифта [6].

С другой стороны, движущаяся кабина лифта, работая как поршень, вытесняет воздух перед собой из шахты и втягивает воздух в шахту позади себя. Особенно значителен этот эффект в высотных зданиях, для которых характерна высокая скорость движения лифтовых кабин. Так, при пожаре, движущийся лифт может вытолкнуть дым с верхних на нижние этажи здания [7].

В результате, расчет потоков воздуха, формирующихся в шахте лифта, представляет собой многосвязную задачу, зависящую как от естественных

потоков воздуха, вызванных эффектом тяги в холодный период года, расходов вентиляционного воздуха, подаваемого в шахту, так и эффектом поршня, создаваемым при движении самой лифтовой кабины.

В настоящей статье рассмотрен один из элементов данной системы, а именно потоки воздуха, создаваемые в лифтовой шахте и через двери лифтовых холлов при движении лифтовой кабины в шахте лифта.

Именно на эти потоки воздуха будут накладываться потоки, создаваемые системами вентиляции лифтовых шахт, и потоки, вызванные эффектом тяги в холодный период года.

Цель исследования

Цель настоящего исследования – проанализировать особенности возникающего течения в шахте при движении лифтовой кабины, оценить величины давления, скорости, а также расходы воздуха через двери в лифтовую шахту, возникающие при прохождении лифтовой кабины мимо этажей.

Метод исследования

В настоящее время методы численного моделирования (CFD-моделирование) параметров микроклимата приобретают все большую популярность для расчета воздушных потоков [8-10], позволяя решить задачу отыскания параметров течения при движении лифтовой кабины.

Инструментом численного исследования в настоящей работе является гидродинамический вычислительный комплекс STAR-CCM+, основанный на численном решении трехмерных дифференциальных уравнений сохранения [11].

Для описания движения потоков воздуха в шахте лифта использовались уравнения сохранения (1) -(4).

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau} + \bar{\tau}_t) + \rho \vec{g}, \quad (2)$$

где тензор вязких напряжений $\bar{\tau}$, определен с помощью реологического закона Ньютона:

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \bar{I}, \quad (3)$$

а тензор турбулентных напряжений $\bar{\tau}_t$ для линейных моделей – в соответствии с обобщенной гипотезой Буссинеска.

$$\bar{\tau}_t = \mu_t(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \vec{V} \bar{I} - \frac{2}{3} \rho k \bar{I}, \quad (4)$$

Для нахождения характеристик турбулентности необходимо использование той или иной модели турбулентности. В работе использовалась нелинейная k - ε , использующая, в отличие от линейных моделей, квадратичную связь между тензором турбулентных напряжений и тензором скоростей деформации.

Моделирование нестационарного движения лифтовой кабины связано с расчетом на сетке, учитывающей изменение во времени положения движущихся объектов относительно шахты лифта. В работе использована технология скользящих расчетных сеток (sliding mesh). Данный подход подразумевает использование нескольких сеточных областей и применение дополнительного алгоритма для обмена данными между границами области. При этом для случая неструктурированной расчетной сетки внутри области передача данных через несовпадающие границы происходит с помощью интерполяции значений высокого порядка точности. На каждом временном шаге на границах областей осуществляется передача значений искомых параметров между сеточными узлами и границами расчетных ячеек.

При применении технологии скользящих сеток шаг по времени выбирается таким образом, чтобы смещение расчетной ячейки скользящей границы относительно другой происходило на расстояние не больше одной длины границы ячейки за один шаг по времени.

Постановка задачи

Скорость движения лифтовой кабины задавалась равной 7 м/с. Кабина двигалась с -4 до 58 этажа. Характеристика удельного сопротивления воздухопроницанию дверей лифтовой шахты принята $10^4 \text{ м}^3/\text{кг}$. Моделирование проведено для изотермических условий (равенства температуры внутреннего и наружного воздуха).

Для проведения расчетов была построена конечнообъемная неструктурированная расчетная сетка. Общая размерность расчетной сетки составила 4 млн. ячеек.

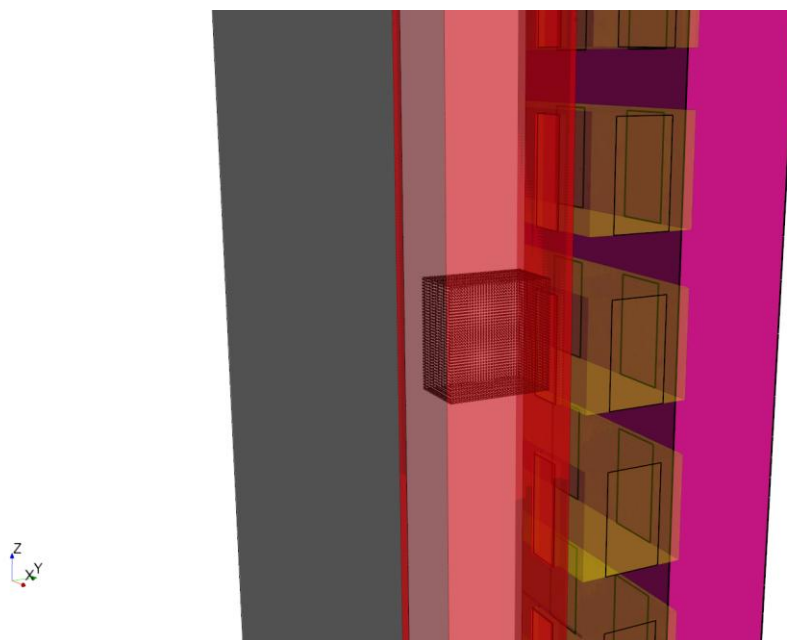


Рис. 1. – Фрагмент расчетной области. Лифтовая кабина движется с -4 по 58 этаж

Результаты и обсуждения

В ходе работы с помощью методов численного моделирования был проведен нестационарный расчет движения лифтовой кабины в шахте с -4 по 58 этаж.

На рис. 2, рис. 3 показаны поля скорости, формирующиеся вблизи лифтовой кабины при ее движении со скоростью 7 м/с по шахте лифта. Как видно из представленных рисунков, значения скорости в неподвижной системе координат, связанной с шахтой лифта (рис. 2), формирующиеся в пространстве между кабиной и шахтой, составляют около -9 м/с. При этом, если рассматривать значения скоростей в подвижной системе координат, связанной с кабиной лифта, то максимальные скорости составляют 16 м/с (рис. 3).

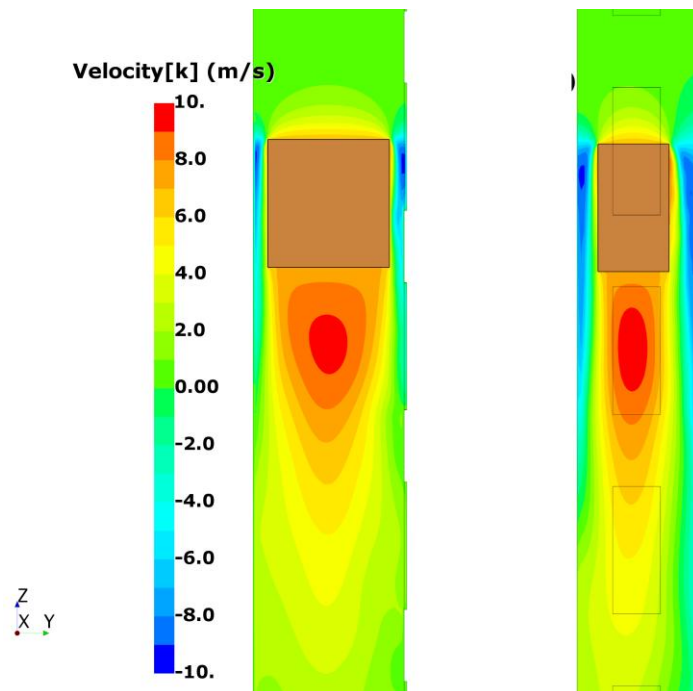


Рис. 2. – Поле вертикальной компоненты скорости в вертикальных сечениях, проходящих через центр лифтовой кабины (в неподвижной системе координат). Скорость движения кабины 7 м/с.

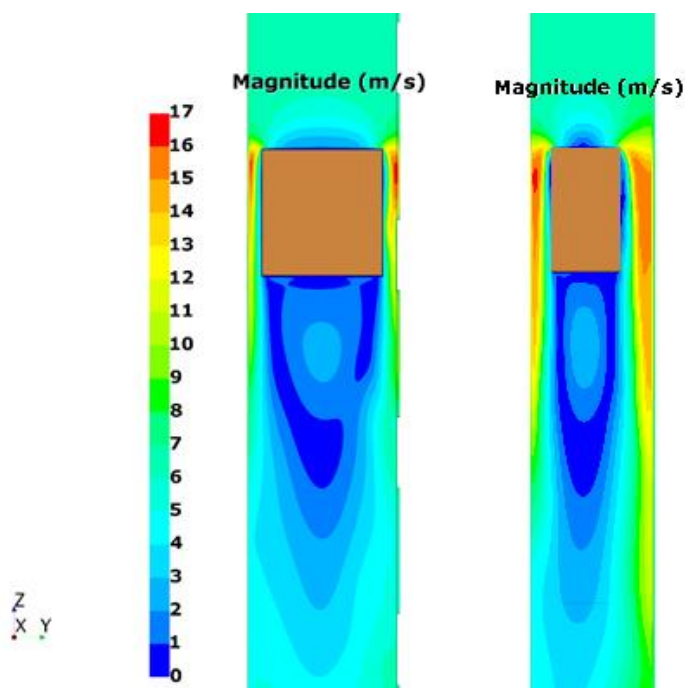


Рис. 3. – Поле модуля скорости в вертикальных сечениях, проходящих через центр лифтовой кабины (в системе координат, связанной с лифтом).

Скорость движения кабины 7 м/с.

На рис. 4 представлены поля статического давления, формирующиеся на поверхности лифтовой кабины и в объеме шахты лифта, для 11 с, 23 с и 33 с от начала движения лифтовой кабины. Давление перед лифтовой кабиной, как и следовало ожидать, постепенно повышается при движении лифта вверх.

Получено, что максимальные перепады давления на дверях лифтовых шахт составляют менее 100 Па при нахождении кабины вблизи верхних и нижних этажей, где эффект поршня максимальный. Максимальное колебание давления, возникающее на элементах стен шахт при прохождении мимо них кабины, составляет около 130 Па.

Получено, что при движении лифтовой кабины воздух выходит/входит через неплотности дверей лифтовой шахты. При этом, создаваемый при движении кабины эффект поршня, «выталкивает» воздух в лифтовые холлы перед кабиной и «засасывает» за кабиной.

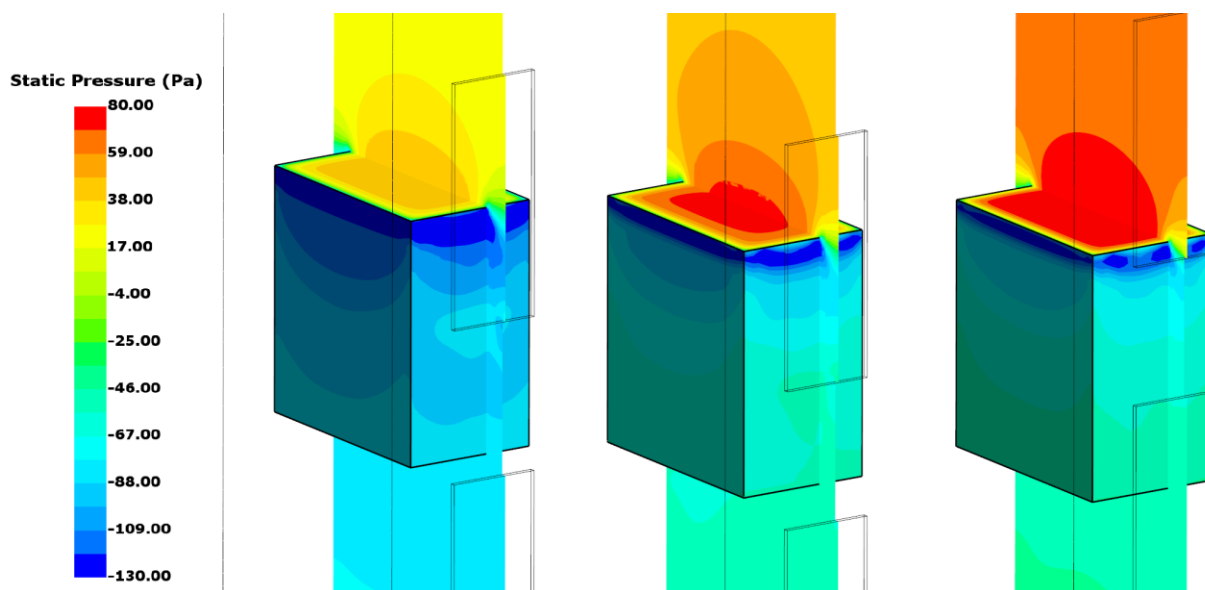


Рис. 4. – Распределение статических давлений на поверхности лифтовой кабины и в вертикальном сечении для моментов времени 11 с, 23 с, 33 с (слева направо).

На рис. 5 показаны поля значений массовых расходов воздуха, вытекаемого и вытекаемого через двери в лифтовую шахту за счет действия эффекта поршня (двери в лифтовую шахты закрыты, характеристика удельного сопротивления воздухопроницанию составляет $10^4 \text{ м}^3/\text{кг}$).

Максимальный расход воздуха, поступающего за счет действия эффекта поршня, через дверь в шахту лифта и из шахты лифта в холл, составляет около $250 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для сравнения, максимальный расход воздуха (в холодный период года), поступающий через те же двери, вследствие эффекта тяги составляет около $200 \text{ м}^3/\text{ч}$. Однако действия эффекта поршня кратковременно по времени и направлено в разные стороны в зависимости от направления движения лифтовой кабины.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что в высотном здании при движении лифтовой кабины максимальный расход воздуха, поступающего через закрытую дверь в шахту лифта и из шахты лифта в холл, составляет около $250 \text{ м}^3/\text{ч}$.

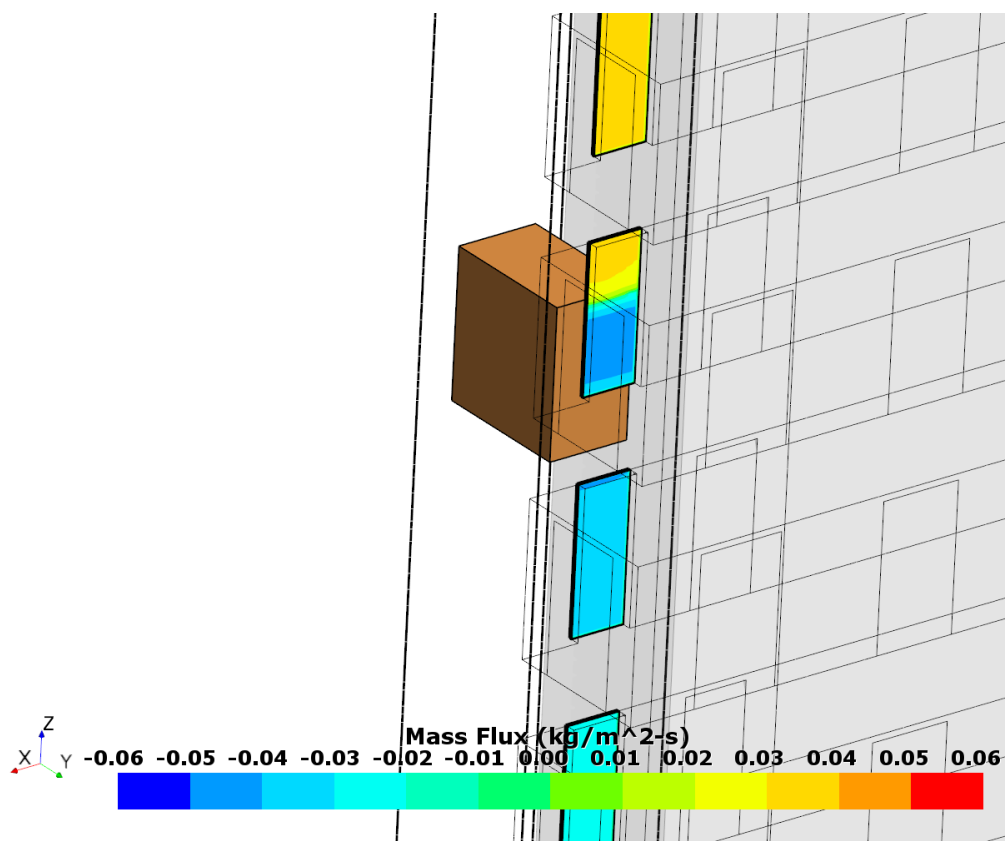


Рис. 5. – Массовый расход воздуха через двери в лифтовую шахту.
Положительное значение – воздух вытекает из шахты, отрицательные –
затекает в шахту.

Эта величина сопоставима по значению с расходами, формирующимися при естественном движении воздуха в лифтовой шахте за счет действия эффекта тяги в холодный период года. Таким образом, при анализе течения, формирующего в лифтовых шахтах высотного здания, потоки воздуха, создаваемые при движении лифтовой кабины, не следует автоматически исключать из рассмотрения, а должны учитываться в комплексной задаче моделирования воздушного режима здания.

Литература

1. Lim H., Seo J., Song. D., Yoon S., Kim J. Interaction analysis of countermeasures for the stack effect in a high-rise office building // Build Environ. 2020. №106530. p. 168.

2. ASHRAE. 2019 ASHRAE handbook-heating, ventilating, and air-conditioning applications, SI ed.; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2019. pp. 4.1–4.4.
 3. Li Y., Zhu N., Hou Y. Multi-Criteria Decision-Making of Countermeasure Combination for Mitigating the Stack Effect in High-Rise Office Building // Buildings. 2023. №13 (3). p. 653.
 4. Yu J.Y., Song K.D., Cho D.W. Resolving Stack Effect Problems in a High-Rise Office Building by Mechanical Pressurization // Sustainability. 2017. № 9. p. 1731.
 5. Lee, J.H.; Song, D.S.; Park, D.R. A study on the development and application of the E/V shaft cooling system to reduce stack effect in high-rise buildings. Build. Environ. 2010. №45. pp. 311–319.
 6. Song D.S., Lim H.W., Lee J.H., Seo J.M. Application of the mechanical ventilation in elevator shaft space to mitigate stack effect under operation stage in high-rise buildings. Indoor and Built Environment. 2014. Vol. 23(1). pp. 81–91.
 7. Klote J.H., Tamura G. Elevator Piston Effect and the Smoke Problem. Fire Safety Journal. 1986. Vol. 11. №. pp. 227-233.
 8. Nielsen, P.V., Allard, F., Awbi, H.B., Davidson, L. and Schälin, A. // Computational fluid dynamics in ventilation design. REHVA Guide Book 10. RHEVA. 2007. pp. 20–29.
 9. Shokofe R., Majid, A., Hasan, M. Investigating impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation // Build. Environ. 2021. №204. 108165. pp. 5–8.
 10. Саламатин И.А., Логойда Т.И., Скорик Т.А., Пирожникова А.П. Математическое моделирование теплового режима помещений // Инженерный вестник Дона, 2022, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7381.
 11. Денисихина Д.М., Иванова Ю. В., Мокров В.В. Численное моделирование истечения из современных воздухораспределительных
-



устройств // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4972.

References

1. Lim H., Seo J., Song. D., Yoon S., Kim J. Build. Environ. 2020. №106530. p. 168.
2. ASHRAE. 2019 ASHRAE handbook-heating, ventilating, and air-conditioning applications, SI ed.; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2019. pp. 4.1-4.4.
3. Li Y., Zhu N., Hou Y. Buildings. 2023. №13 (3). p. 653.
4. Yu J.Y., Song K.D., Cho D.W. Sustainability. 2017. № 9. p. 1731.
5. Lee, J.H.; Song, D.S.; Park, D.R. Build. Environ. 2010. №45. pp. 311–319.
6. Song D.S., Lim H.W., Lee J.H., Seo J.M. Indoor and Built Environment. 2014. Vol. 23(1). pp. 81–91.
7. Klote J.H., Tamura G. Fire Safety Journal. 1986. Vol. 11. №. pp. 227-233.
8. Nielsen, P.V., Allard, F., Awbi, H.B., Davidson, L. and Schälin, A. Computational fluid dynamics in ventilation design. REHVA Guide Book 10. RHEVA. 2007. pp. 20–29.
9. Shokofe R., Majid, A., Hasan, M. Build. Environ. 2021. №204. 108165. pp. 5–8.
10. Salamatin I. A., Logojda T.I., Skorik T.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7381.
11. Denisikhina D.M., Ivanova Y.V., Mokrov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4972.