

Разработка математических моделей оценки вариантов устройства инверсионных кровель

А.Н. Егоров¹, А.А. Тугушев²

¹*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*
²*ООО «Новый Дом Инвест», Санкт-Петербург*

Аннотация: Технология устройства инверсионной «зеленой» кровли в эксплуатируемых крышах становится все более актуальной в современном строительстве, в соответствии с принципами устойчивого развития и энергоэффективности. Однако, теоретического обеспечения проектирования и возведения инверсионной кровли еще недостаточно – отсутствует комплексный анализ устройства кровли, который бы учитывал разного рода критерии. В исследовании разработаны математические модели трех систематизированных групп возведения инверсионных кровель (на опорах, без опор и кровли-паркинга) по трем укрупненным критериям, комплексно характеризующих их устройство, а именно: технологичность, эффективность использования ресурсов и экологичность. Результаты исследования позволяют определять оптимальные решения по устройству кровли на этапе вариантного конструктивно-технологического проектирования для дальнейшего их совершенствования и применения в практике строительства.

Ключевые слова: инверсионная кровля, эксплуатируемое покрытие, система критериев, систематизация, конструктивно-технологическое проектирование, вариантное проектирование, экспертный анализ, математическое моделирование, технологичность, эффективность, экологичность.

Создание дополнительных «зеленых» эксплуатируемых пространств в зданиях активно развивается в современном строительстве с целью повышения энергоэффективности, комфорта проживания, устойчивого развития городов [1, 2]. Данные решения возможно реализовать на поверхности крыш зданий или сооружений. В настоящее время в отечественной и зарубежной практике строительства разработаны технологии устройства инверсионной кровли с различным функционалом эксплуатируемых покрытий: кровля с озеленением (так называемая «зеленая» кровля) [3], кровля-паркинг, терраса, пешеходная зона [4].

Особо следует подчеркнуть положительное влияние озеленения поверхности кровли на энергоэффективность здания и окружающую среду, в

том числе, за счет применения инверсионной структуры, сопротивление теплопередачи которой не уступает, а часто и превосходит конструкции традиционной плоской кровли, а также имеются преимущества в инфильтрации воздуха через толщу ограждающих конструкций и уменьшения количества пыльных частиц в воздушной среде [5].

Конструкция инверсионной кровли по своему устройству противоположна конструкции традиционной плоской, так как основная гидроизоляция находится под «защитой» слоя утеплителя (как правило, уложенного в два слоя или более) из плит экструдированного пенополистирола, защищающего от внешних механических и температурных воздействий [6]. Финишный слой подобной кровли служит эксплуатируемым покрытием плоской крыши здания или сооружения. В зарубежных исследованиях, посвященных анализу энергоэффективности кровли [6] и теплоизоляционных характеристик [7], было установлено, что плиты из ЭППС защищают основной гидроизоляционный слой от расширения и сжатия при высоких и низких температурах окружающей среды.

Стоит отметить, что отечественные исследования, в большинстве своём, рассматривают анализ отдельных характеристик инверсионной кровли – например, по анализу отдельных технологических параметров [8], по теплотехническому анализу конструктивно-технологических решений [9]. При этом, отсутствует комплексный системный анализ, который учитывал бы всё в совокупности: критерии технологичности, экологичности и энергоэффективности.

В процессе проведения анализа состояния вопроса по предмету исследования авторами установлено, что теоретического обеспечения устройства «зеленых» кровель недостаточно. Была выявлена необходимость проведения комплексного анализа на стадии вариантного проектирования

инверсионных крыш с целью определения оптимальных решений по их устройству.

Для решения научной задачи были сгруппированы варианты устройства инверсионной кровли [10] по конструктивно-технологическому признаку, затем на основании предварительно разработанной системы критериев была выполнена экспертная оценка вариантов [11].

На основании полученных результатов, была разработана математическая модель, отражающая эффективность устройства инверсионной кровли с эксплуатируемым покрытием с учетом трех укрупненных критериев, по которым были предварительно систематизированы показатели, характеризующие эффективность устройства эксплуатируемой инверсионной кровли [11], а именно:

- технологичность (K_1);
- эффективность использования ресурсов (K_2);
- экологичность (K_3).

Следует отметить, что в данном исследовании под критерием технологичности (K_1) подразумевается совокупность показателей, позволяющих оценить производственные и эксплуатационные характеристики кровли, а также возможность проведения работ в различных условиях строительства, а именно: возможность выполнения работ в условиях выпадения атмосферных осадков; возможность применения кровли с целью реконструкции плоской кровли существующих зданий; возможность использования кровли в индивидуальном жилищном строительстве (высотой до трех этажей); удобство обеспечения удаления снега, льда с поверхности кровли на этапе эксплуатации; удобство обеспечения удаления осадков в виде дождевой воды с поверхности кровли на этапе эксплуатации.

Под эффективностью использования ресурсов (K_2) подразумевается следующий комплекс показателей: конструктивная надежность кровли и

качество изоляции; стоимость эксплуатации; материалоемкость кровли; теплоёмкость кровли; трудоёмкость работ.

И, в свою очередь, под критерием экологичности (K_3) подразумевается совокупность показателей, дающих возможность оценки степени воздействия устройства кровли на окружающую среду: малое количество строительного мусора и отходов на месте производства работ; возможность применения теплоизоляции на основе естественных (природных) материалов.

Разработка моделей выполнялась для трех систематизированных основных групп – вариантов устройства инверсионной кровли с разделением по конструктивно-технологическому признаку: на опорах (вариант №1), без опор (вариант №2) и кровля-паркинг (вариант №3).

Для разработки математических моделей учитывались следующие ранее рассчитанные авторами показатели: h_{ij} – балл (1 – минимальное значение, 10 – максимальное), выставленный i -тым экспертом по конкретному j -тому критерию разработанной системы оценки устройства кровли, состоящей из 12 параметров, объединенных в 3 укрупненных критерия; λ_j – весовой коэффициент j -того критерия, определяющий значимость критерия [11].

Так, общая оценка H_0^1 устройства кровли на опорах (вариант №1) состоит из частных критериальных оценок K_1^1, K_2^1, K_3^1 :

$$H_0^1 = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \cdot h_{1j} + \sum_{j=6}^{10} \lambda_j \cdot h_{1j} + \sum_{j=11}^{12} \lambda_j \cdot h_{1j}, \quad (1)$$

где $\sum_{j=1}^5 \lambda_j \cdot h_{1j}$ – критериальная оценка K_1^1 варианта №1; $\sum_{j=6}^{10} \lambda_j \cdot h_{1j}$ – критериальная оценка K_2^1 варианта №1; $\sum_{j=11}^{12} \lambda_j \cdot h_{1j}$ – критериальная оценка K_3^1 варианта №1; λ_j – весовой коэффициент j -того критерия, определяющий значимость критерия; h_{1j} – средняя оценка всех экспертов по критерию j для варианта устройства кровли №1 [11].

Общая оценка H_0^2 устройства кровли без опор (вариант №2), состоящая из критериальных подфункций K_1^2, K_2^2, K_3^2 , определяется как:

$$H_0^2 = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \cdot h_{2j} + \sum_{j=6}^{10} \lambda_j \cdot h_{2j} + \sum_{j=11}^{12} \lambda_j \cdot h_{2j}, \quad (2)$$

где $\sum_{j=1}^5 \lambda_j \cdot h_{2j}$ – критериальная оценка K_1^2 варианта №2; $\sum_{j=6}^{10} \lambda_j \cdot h_{2j}$ – критериальная оценка K_2^2 варианта №2; $\sum_{j=11}^{12} \lambda_j \cdot h_{2j}$ – критериальная оценка K_3^2 варианта №2; λ_j – весовой коэффициент j -того критерия, определяющий значимость критерия; h_{2j} – средняя оценка всех экспертов по критерию j для варианта устройства кровли №3 [11].

И, в свою очередь, общая оценка H_0^3 устройства кровли-паркинга (вариант №3), определяется, как:

$$H_0^3 = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \cdot h_{3j} + \sum_{j=6}^{10} \lambda_j \cdot h_{3j} + \sum_{j=11}^{12} \lambda_j \cdot h_{3j}, \quad (3)$$

где: $\sum_{j=1}^5 \lambda_j \cdot h_{3j}$ – критериальная оценка K_1^3 варианта №3; $\sum_{j=6}^{10} \lambda_j \cdot h_{3j}$ – критериальная оценка K_2^3 варианта №3; $\sum_{j=11}^{12} \lambda_j \cdot h_{3j}$ – критериальная оценка K_3^3 варианта №3; λ_j – весовой коэффициент j -того критерия, определяющий значимость критерия; h_{3j} – средняя оценка всех экспертов по критерию j для варианта устройства кровли №3 [11].

На рис. 1 приведена диаграмма, отражающая свойства устройства эксплуатируемой инверсионной кровли по трем укрупненным критериям с учетом зависимости весового коэффициента j -того критерия λ_j и средней оценки всех экспертов по критерию j для каждой из сгруппированных вариантов устройства кровли h_{ij} .

Анализ диаграммы показывает, что вариант устройства инверсионной кровли с применением опор отстает от остальных по большинству укрупненных критериев – технологичности (критерий 1) и эффективности использования ресурсов (критерий 2), но опережает другие варианты по критерию экологичности (критерий 3).

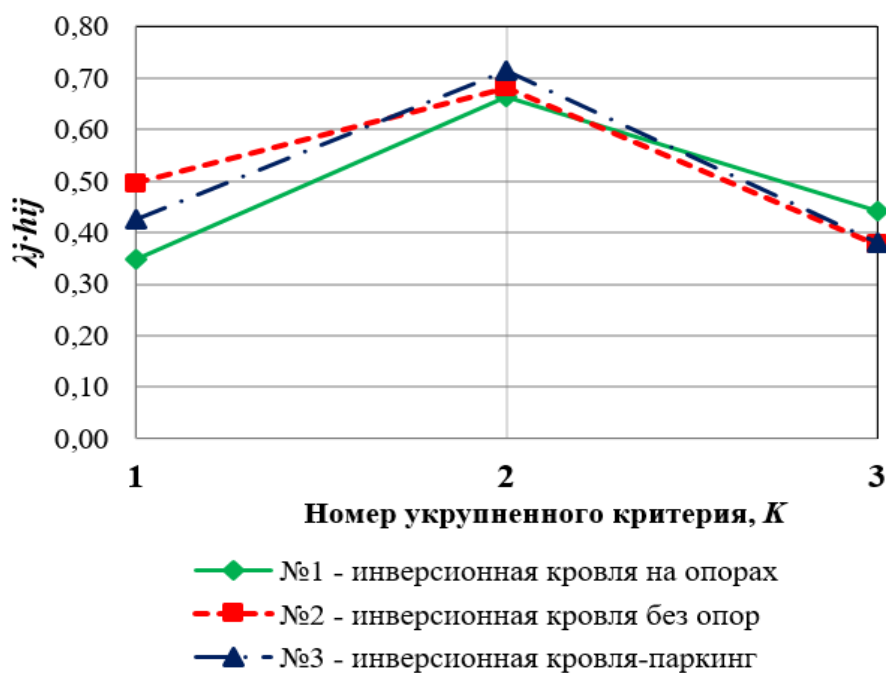


Рис. 1. – Диаграмма, отражающая свойства эксплуатируемой инверсионной кровли по трем укрупненным критериям: технологичности (1); эффективности использования ресурсов (2); экологичности (3)

Среди трех вариантов устройства кровли наивысшую оценку получил критерий эффективности использования ресурсов (критерий 2), что объясняется значимостью факторов стоимости, материалоемкости, трудоемкости работ, энергоемкости кровли, надежности и качества изоляции, при этом, лучшим определился вариант устройства с кровлей-паркингом.

Выводы

1. На основании выполненного экспертного анализа вариантов устройства инверсионной кровли были разработаны математические модели оценки устройства исследуемой кровли по критериям технологичности, эффективности использования ресурсов, экологичности. Приведена диаграмма, отражающая свойства устройства по вышеуказанным критериям.

2. Вариант устройства инверсионной кровли с применением опор (№1, см. рис.1) отстает от остальных по большинству критериев и требует

усовершенствования технологии устройства в соответствии с разработанной системой показателей, характеризующей технологичность и эффективность использования ресурсов.

3. Наибольшую оценку получил укрупнённый критерий эффективности использования ресурсов (критерий 2), что по результату экспертного анализа определяет его как наиболее значимый при устройстве инверсионных кровель. Максимальное значение по критерию эффективности использования ресурсов получил вариант устройства с кровлей-паркингом (№3, см. рис.1).

4. Результаты исследования позволяют определять оптимальные решения по устройству кровли при вариантном конструктивно-технологическом проектировании для дальнейшего усовершенствования вариантов эксплуатируемых крыш и применении их при строительстве зданий и сооружений.

Литература

1. Новгородская Н. О., Граница Ю. В. Эксплуатируемая кровля: тенденции и концепция в озеленении // Сельское хозяйство. 2019. № 4. С. 23–31. DOI: 10.7256/2453-8809.2019.4.33023. URL: nbpublish.com/library_read_article.php?id=33023.

2. Швалев М. Д., Мальцева И. Н. Эксплуатируемые кровли как фактор устойчивого развития городов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2020. № 3(46). С. 89–94.

3. Манжилевская С. Е., Грибанов А. В. Устройство зеленой кровли как способ повышения экологической безопасности окружающей среды при реконструкции и строительстве // Инженерный вестник Дона. 2020. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6498

4. Руденко А. А., Вылегжанина Ж. В. К вопросу о достоинствах и недостатках инверсионной кровли при проведении капитального ремонта // Наука и образование: новое время. 2017. № 6 (23). С. 84–89.

5. Бенуж А. А., Богачёв А. В. Влияние озеленения кровли на энергоэффективность здания // Academia. Архитектура и строительство. 2021. №2. С. 117–122. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-117-122. URL: aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/313.

6. Kalibatas D., Kovaitis V. Selecting the most effective alternative of waterproofing membranes for multifunctional inverted flat roofs // Journal of Civil Engineering and Management. 2017. 23 (5). pp. 650–660.

7. Misar I., Novotný M. Defects and behaviour of inverted flat roof from the point of building physics // MATEC Web of Conferences. 2017. 93. URL.: mateconferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/07/matecconf_bd2017_02002.pdf.

8. Шушунова Н. С. Анализ технологических параметров при устройстве инверсионных кровельных покрытий с озеленением // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 3 (114). С. 349-355. URL: cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologicheskikh-parametrov-pri-ustroystve-inversionnyh-krovelnyh-pokrytiy-s-ozeleneniem.

9. Донцова Е. И., Рожкова К. С. Анализ материалов для устройства инверсионной кровли // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. Том 2. Пермь: ПНИПУ. 2019. С. 307–311.

10. Egorov A. N., Tugushev A. A. System of criteria and analysis appraisals for green inverted roof // Contemporary Problems of Architecture and Construction: Contemporary Problems of Architecture and Construction: 1st ed. 2021. London: Taylor & Francis. pp. 377–380.

11. Егоров А. Н., Тугушев А. А. Вариантное конструктивно-технологическое проектирование инверсионной кровли на основе



экспертного анализа // Инженерный вестник Дона. 2023. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8168.

References

1. Novgorodskaya N. O., Granitsa Yu. V. Sel'skoe khozyaystvo. 2019. № 4. DOI: 10.7256/2453-8809.2019.4.33023. URL: nbpublish.com/library_read_article.php?id=33023.
2. Shvalev M. D., Mal'tseva I. N. Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. 2020. № 3(46). Pp. 89–94.
3. Manzhilevskaya S. E., Gribanov A. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6498
4. Rudenko A. A., Vylegzhanina Zh. V. Nauka i obrazovanie: novoe vremja, 2017. № 6 (23). pp. 84–89.
5. Benuzh A. A., Bogachev A. V. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2021. №2. pp. 117–122. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-117-122. URL: aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/313.
6. Kalibatas D., Kovaitis V. Journal of Civil Engineering and Management. 2017. 23 (5). pp. 650–660.
7. Misar I., Novotný M. MATEC Web of Conferences. 2017. 93. URL: mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/07/mateconf_bd2017_02002.pdf.
8. Shushunova N. S. Vestnik MGSU. 2018. vol. 13, issue 3 (114). pp. 349–355. URL: cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologicheskikh-parametrov-priustroystve-invercionnyh-krovelnyh-pokrytiy-s-ozeleneniem.
9. Dontsova E. I., Rozhkova K. S. Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. Tom 2. Perm': PNIPU. 2019. pp. 307–311.
10. Egorov A. N., Tugushev A. A. Contemporary Problems of Architecture and Construction: Contemporary Problems of Architecture and Construction: 1st ed. 2021, London: Taylor & Francis. pp. 377–380.



11. Egorov A. N., Tugushev A. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №1.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8168.