

Вариантное конструктивно-технологическое проектирование инверсионной кровли на основе экспертного анализа

А.Н. Егоров¹, А.А. Тугушев²

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

Аннотация: Многообразие вариантов устройства инверсионной кровли с эксплуатируемым покрытием обуславливает необходимость в проведении анализа конструктивно-технологических решений на стадии вариантного проектирования эксплуатируемых крыш. В настоящее время отсутствует комплексная оценка и анализ по системе критериев, достаточно, в полной мере, характеризующие конструкцию кровли по конструктивно-технологическому признаку. В исследовании выполнена оценка трех основных сгруппированных и систематизированных вариантов устройства инверсионной кровли (на опорах, без опор и кровля-паркинг) по системе критериев для точной оценки эффективности устройства кровли в строительных проектах на основе экспертного анализа. Предложенная система критериев оценки позволяет определять оптимальные решения устройства инверсионной кровли в практике строительства зданий при вариантном проектировании.

Ключевые слова: инверсионная кровля, эксплуатируемая крыша, эксплуатируемое покрытие, вариантное проектирование, система критериев, систематизация, конструктивно-технологическое решение, оценка вариантов, экспертный анализ, математическое моделирование, оптимальность, эффективность.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике строительства находит широкое применение использование инверсионных кровель в промышленных и гражданских зданиях. Это обуславливается как их более высокой надежностью и долговечностью в сравнении с традиционными кровельными покрытиями, так и современными инновациями в области градостроительства для формирования концепции устойчивого развития городской среды на основе «зеленого» экологического строительства, создания дополнительных эксплуатируемых пространств на поверхности крыши [1].

Рассматриваемая технология получила широкое распространение в таких странах, как Япония, Гонконг, Италия, Германия, Франция, ОАЭ, Саудовская Аравия, Сингапуре и США [2, 3]. Примечателен опыт стран

Северной Европы – там инверсионные кровли получают все более широкое применение, несмотря на климатические условия и количество осадков [4].

В отечественную практику строительства инверсионная кровля пришла относительно недавно, и зачастую компании, выполняющие функцию застройщика, расценивают её как особенность проекта и эксклюзивное решение [5].

Так, конструкция инверсионной кровли позволяет использовать её с функциональной точки зрения как эксплуатируемое пространство за счет повышения долговечности покрытия путем расположения основного гидроизоляционного слоя под защитой теплоизоляции из экструдированного пенополистерола (ЭППС). Данное расположение слоев защищает гидроизоляцию кровли от различных внешних воздействий [6]. На поверхности кровли можно создать террасу, паркинг или пространство с интенсивным или экстенсивным озеленением. Данное инженерное решение соответствует современным принципам экологического, энергоэффективного строительства [7, 8] и следует принципам устойчивого урбанизма [9]. В некоторых исследованиях выявлено увеличение экологической безопасности окружающей среды от применения инверсионной «зеленой» кровли [10, 11].

Существует многообразие вариантов решений устройства инверсионной кровли, зависящее от функционального назначения кровли и эксплуатируемого финишного покрытия. Конструктивно-технологическая последовательность расположения слоев, в ряде основных случаев, идентична [9, 10]. В особых случаях, как в случае кровли с озеленением, конструкция может быть дополнена фильтрующими слоями, подстилающим слоем и слоями пароизоляции [11].

В ряде исследований и ранее были предприняты попытки определения наиболее и наименее оптимальных и эффективных вариантов инверсионной плоской кровли по определенным параметрам только общего характера.

Например, в зарубежных исследованиях были выполнены анализ и оценка вариантов устройства плоской кровли по критериям экологической устойчивости и воздействию на окружающую среду [11, 12].

Несмотря на имеющиеся научно-исследовательские разработки по данной теме, теоретического обеспечения в плане технологичности устройства исследуемой кровли недостаточно. Поэтому существует необходимость проведения обширного и комплексного анализа на стадии вариантного проектирования эксплуатируемых крыш.

Вместе с тем, отсутствует комплексная оценка и анализ по системе критериев, достаточно в полной мере характеризующие конструкцию кровли по конструктивно-технологическому признаку с целью определения оптимальности решений устройства.

Для решения заданной проблемы, в начале исследования варианты устройства инверсионной плоской кровли были разделены на 3 основные группы по конструктивно-технологическому признаку (рис. 1):

1. Группа 1 – инверсионная кровля на опорах;
2. Группа 2 – инверсионная кровля без опор, в т.ч. с озеленением;
3. Группа 3 – инверсионная кровля-паркинг [13].

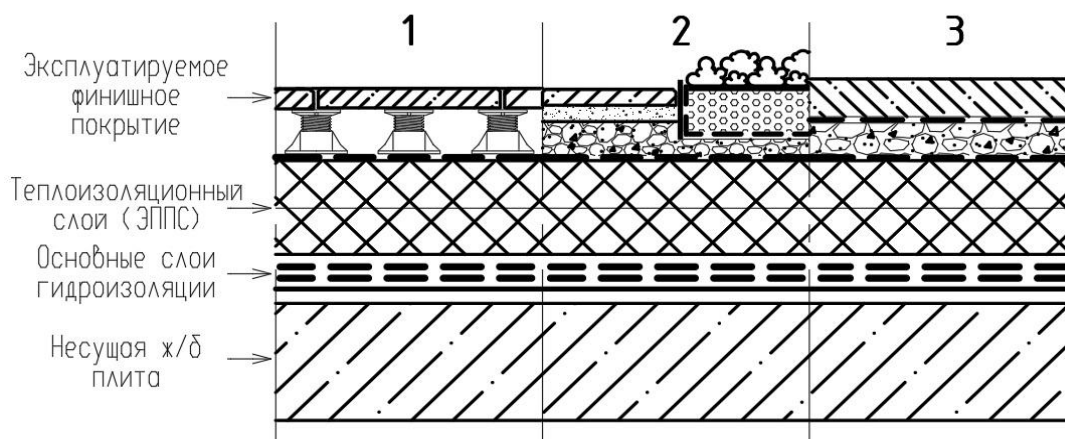


Рис. 1. – Конструкции основных сгруппированных вариантов инверсионной кровли: 1 – на опорах, 2 – без опор, 3 – кровля-паркинг

Далее был выполнен экспертный анализ вариантов конструктивно-технологических решений устройства кровель. Следует отметить, что метод экспертного анализа активно используется в технических и проектных задачах, в том числе при решении задач по выбору рациональных вариантов строительного производства [14].

Экспертный анализ проводился на основе разработанной авторами системы критериев (табл. 1), состоящих из 12 показателей, которые влияют на эффективность устройства инверсионной кровли – предложенная система учитывает технологическую эффективность, эффективность использования ресурсов и фактор экологичности для инверсионной кровли в целом [15].

Для проведения экспертного анализа были привлечены 7 экспертов, имеющих профильное строительное образование и опыт в сфере строительства от 10 лет. Эксперты давали оценки от 1 до 10 каждому критерию по степени соответствия и обеспеченности (где 1 – это минимальное значение, 10 – максимальное) в формате опроса.

Ниже в таблице приведена система критериев с учетом рассчитанных в предыдущем исследовании [15] весовых коэффициентов на основе обработки результатов опроса экспертов о значимости критериев для устройства инверсионной кровли, как технологии в целом (табл.1).

Таблица № 1

Перечень показателей, характеризующих эффективность устройства эксплуатируемой инверсионной кровли

Шифр	Критерий оценки	Весовой коэффициент λ
1	2	3
I. Технологичность:		
j_1	1.1. Возможность выполнения работ в условиях выпадения атмосферных осадков	$\lambda_1 = 0,099$
j_2	1.2. Возможность применения кровли с целью реконструкции плоской кровли существующих зданий	$\lambda_2 = 0,063$
j_3	1.3. Возможность использования кровли в индивидуальном жилищном строительстве (высотой до трех этажей)	$\lambda_3 = 0,042$
j_4	1.4. Удобство обеспечения удаления снега, льда с поверхности кровли при эксплуатации	$\lambda_4 = 0,096$

Продолжение таблицы № 1

1	2	3
II. Эффективность использования ресурсов:		
j_6	2.1. Конструктивная надежность кровли и качество изоляции	$\lambda_6 = 0,110$
j_7	2.2. Стоимость эксплуатации	$\lambda_7 = 0,092$
j_8	2.3. Материалоемкость кровли	$\lambda_8 = 0,083$
j_9	2.4. Теплоемкость кровли	$\lambda_9 = 0,088$
j_{10}	2.5. Трудоемкость работ	$\lambda_{10} = 0,080$
III. Экологичность:		
j_{11}	3.1. Малое количество строительного мусора во время работ	$\lambda_{11} = 0,083$
j_{12}	3.2. Возможность применения теплоизоляции на основе естественных материалов	$\lambda_{12} = 0,063$

По итогам проведенного экспертного анализа наиболее значимыми критериями для эксплуатируемой инверсионной кровли в целом являются следующие критерии: конструктивная надежность кровли и качества изоляции (j_6), возможность выполнения работ в условиях выпадения атмосферных осадков (j_1), удобство обеспечения удаления снега и льда с поверхности кровли при эксплуатации (j_4), удобство обеспечения удаления осадков в виде дождевой воды с поверхности кровли при эксплуатации (j_5).

Следующим этапом было проведение оценки вариантов по системе критериев для каждой из трех групп отдельно при помощи того же метода экспертного анализа (от 1 до 10). Результаты приведены ниже (табл. 2 – 4).

Таблица № 2

Результаты экспертного анализа устройства кровли №1 (на опорах)

Критерий	Эксперт 1, h_1	Эксперт 2, h_2	Эксперт 3, h_3	Эксперт 4, h_4	Эксперт 5, h_5	Эксперт 6, h_6	Эксперт 7, h_7
j_1	3	4	5	6	4	5	6
j_2	5	6	4	6	7	5	3
j_3	7	2	5	8	5	7	1
j_4	7	3	2	5	5	5	1
j_5	6	3	3	5	6	1	1
j_6	5	7	3	5	5	6	6
j_7	8	9	7	10	7	7	8
j_8	8	9	8	10	8	6	7
j_9	8	9	9	9	9	7	6
j_{10}	8	7	8	7	10	6	8
j_{11}	7	5	8	7	6	8	5
j_{12}	7	7	5	6	4	4	5
Σ	79	71	67	84	76	67	57

Таблица № 3

Результаты экспертного анализа устройства кровли №2 (без опор)

Критерий j_n	Эксперт 1, h_1	Эксперт 2, h_2	Эксперт 3, h_3	Эксперт 4, h_4	Эксперт 5, h_5	Эксперт 6, h_6	Эксперт 7, h_7
j_1	5	6	6	8	7	9	8
j_2	6	7	7	3	2	5	5
j_3	8	2	7	10	5	9	5
j_4	8	3	5	8	1	6	1
j_5	8	7	7	9	8	6	7
j_6	10	9	9	6	8	7	8
j_7	10	6	6	7	4	5	8
j_8	10	10	9	9	8	6	9
j_9	7	7	8	6	5	6	10
j_{10}	10	8	5	6	10	6	5
j_{11}	3	5	5	4	3	3	2
j_{12}	8	9	7	7	8	5	7
Σ	93	79	81	83	69	73	75

Таблица № 4

Результаты экспертного анализа устройства кровли №3 (кровля-паркинг)

Критерий j_n	Эксперт 1, h_1	Эксперт 2, h_2	Эксперт 3, h_3	Эксперт 4, h_4	Эксперт 5, h_5	Эксперт 6, h_6	Эксперт 7, h_7
j_1	6	7	8	8	7	10	8
j_2	4	2	2	3	1	5	6
j_3	2	1	1	2	3	1	2
j_4	5	2	3	3	2	5	4
j_5	9	7	8	9	10	4	5
j_6	9	9	10	5	8	5	8
j_7	10	10	9	7	7	6	9
j_8	10	10	10	9	10	8	9
j_9	8	8	8	6	5	6	9
j_{10}	9	8	5	5	10	6	5
j_{11}	3	5	5	4	3	3	2
j_{12}	9	9	6	7	8	5	8
Σ	84	78	75	68	74	64	75

Стоит отметить, что оценки для каждого сгруппированного варианта сильно отличаются по одному и тому же критерию.

Затем было выполнено определение оптимального варианта (группы) устройства кровли. Зная значение весовых коэффициентов (см. табл. 1),

можно найти значения F_{ij} для каждого эксперта по формуле 1 как сумму оценок экспертов, умноженных на соответствующие весовые коэффициенты:

$$F_{ij} = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot h_{ij}, \quad (1)$$

где F_{ij} – обобщенная функция математической модели; h_{ij} – балл, выставленный i -тым экспертом по j -тому критерию; λ_j – весовой коэффициент j -того критерия, определяющий значимость критерия.

Оптимальным будет считаться тот вариант, у которого значение F_{ij} получится наибольшим.

По итогу были рассчитаны значения критериев оптимальности для сгруппированных вариантов (табл. 5).

Таблица № 5

Критерии оптимальности для сгруппированных вариантов устройства инверсионной кровли

Сгруппированный вариант №1 (кровля на опорах):						
$F_1(h_1)$	$F_1(h_2)$	$F_1(h_3)$	$F_1(h_4)$	$F_1(h_5)$	$F_1(h_6)$	$F_1(h_7)$
6,502	6,000	5,502	6,906	6,334	5,497	4,895
Сгруппированный вариант №2 (кровля без опор):						
$F_2(h_1)$	$F_2(h_2)$	$F_2(h_3)$	$F_2(h_4)$	$F_2(h_5)$	$F_2(h_6)$	$F_2(h_7)$
7,806	6,723	6,765	6,914	5,840	6,066	6,371
Сгруппированный вариант №3 (кровля-паркинг):						
$F_3(h_1)$	$F_3(h_2)$	$F_3(h_3)$	$F_3(h_4)$	$F_3(h_5)$	$F_3(h_6)$	$F_3(h_7)$
7,301	6,828	6,713	5,908	6,436	5,566	6,458

Следующим этапом было определение общего мнения группы экспертов. Общее мнение группы экспертов OP_m об эффективности каждого сгруппированного варианта устройства кровли можно найти, как среднее взвешенное его оценок:

$$OP_m = \frac{\sum F_m(h_i)}{N_i}, \quad (2)$$

где $F_m(h_i)$ – критерии оптимальности из табл. 5; N_i – количество экспертов (7 экспертов).

Так, для сгруппированного варианта устройства кровли №1, общее мнение группы экспертов будет равным:

$$OP_1 = \frac{6,502 + 6,000 + 5,502 + 6,906 + 6,334 + 5,497 + 4,895}{7} = 5,948 \quad (3)$$

В случае сгруппированного варианта устройства кровли №2, общее мнение группы экспертов будет равным:

$$OP_2 = \frac{7,806 + 6,723 + 6,765 + 6,914 + 5,840 + 6,066 + 6,371}{7} = 6,641 \quad (4)$$

В случае сгруппированного варианта устройства кровли №3, общее мнение группы экспертов будет равным:

$$OP_3 = \frac{7,301 + 6,828 + 6,713 + 5,908 + 6,436 + 5,566 + 6,458}{7} = 6,458 \quad (5)$$

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что вариант устройства безопорной инверсионной кровли более эффективен по сравнению с остальными, так как $OP_2 > OP_3 > OP_1$.

Выводы

1. Выполнена экспертная оценка трех сгруппированных по конструктивно-технологическому признаку вариантов устройства инверсионной кровли на основе разработанной системы критериев, позволяющей осуществлять более точный выбор конструктивного решения инверсионной кровли при вариантном проектировании с применением метода экспертного анализа.
 2. Согласно результатам общего мнения группы экспертов, вариант устройства инверсионной кровли без опор более эффективен по сравнению с остальными и является наиболее оптимальным. Остальные варианты требуют усовершенствования.
 3. При вариантном проектировании группировки могут различаться по мере развития конструктивно-технологических решений инверсионных
-



крыш. Предложенная методика оценки на основе экспертного анализа позволяет получать оптимальные решения в практике строительства зданий.

4. Полученные результаты позволяют разрабатывать математические модели оценки вариантов устройства инверсионной кровли с целью усовершенствования технологии по конкретным требуемым параметрам.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь и участие в исследовании кафедре технологии строительного производства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, а также строительным компаниям Санкт-Петербурга ООО «Ладога» и ООО «Новый Дом Инвест».

Литература

1. Шушунова Н. С. Анализ технологических параметров при устройстве инверсионных кровельных покрытий с озеленением // Вестник МГСУ. 2018. №3 (114). URL: cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologicheskikh-parametrov-pri-ustroystve-inversionnyh-krovelnyh-pokrytiy-s-ozeleneniem.

2. Пименова Е. В., Демидова Л. М) . Современные направления в архитектурном проектировании учебных зданий (на примере республики Сингапур // Инженерный вестник Дона. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4082

3. 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.

4. Полюх А. А., Талипова Л. В. Применение инверсионной кровельной системы в Санкт-Петербурге // Сборник материалов Всероссийской конференции, 4–10 апреля 2022 г. В 3 ч. Ч. 2. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 222-225.

5. Шмырев А. Эксплуатируемая кровля // Интернет-журнал о дизайне и архитектуре Berlogos.ru. 2016. URL: berlogos.ru/article/ekspluatiruemaya-krovlya/.

6. Тугушев А. А. Совершенствование изоляционных материалов эксплуатируемой инверсионной кровли // Технология и организация строительного производства: Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28–29 апреля 2021 года. СПб: СПбГАСУ, 2021. С. 446-452.

7. Король Е. А., Шушунова Н. С. Особенности устройства различных вариантов кровельных покрытий с системами озеленения // Academia. Архитектура и строительство. 2019. №2. URL: cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ustroystva-razlichnyh-variantov-krovelnyh-pokrytiy-s-sistemami-ozeleneniya.

8. Егоров А. Н., Шприц М. Л., Гдимиян Н. Г. Инновационные технологии в строительстве // Строительство и реконструкция. 2015. №3 (59). С.130-137.

9. Королева В. С., Акри Е. П. Инверсионная кровля как механизм благоустройства и озеленение городов // Современные вызовы и перспективы развития молодежной науки: Сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 5 апреля 2021 года. Петрозаводск: «Новая Наука», 2021. С. 82-85.

10. 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

11. Carretero-Ayuso M. J, García-Sanz-Calcedo J. Comparison between building roof construction systems based on the LCA // Revista De La Construcción. 2018. pp. 123-136.

12. Inan, H. Green Roofs and Urban Life Sustainability // Recycling and Reuse Approaches for Better Sustainability. Environmental Science and Engineering. 2018. pp. 151-161.

13. Тугушев А. А. Систематизация вариантов устройства эксплуатируемой инверсионной кровли // Наукосфера. 2021. № 1-1. С. 145-149.

14. Лapidус А.А., Демидов Л.П. Исследование факторов, влияющих на показатель потенциала строительной площадки // Вестник МГСУ. 2014. №4. С. 160-166. URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-vliyayuschih-na-pokazatel-potentsiala-stroitelnoy-ploschadki cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-vliyayuschih-na-pokazatel-potentsiala-stroitelnoy-ploschadki.

15. 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.

References

1. Shushunova N. S. Vestnik MGSU. 2018. №3 (114). URL: cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologicheskikh-parametrov-pri-ustroystve-inverzionnyh-krovelnyh-pokrytiy-s-ozeleneniem.

2. Pimenova E. V., Demidova L. M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4082

3. Rudenko A. A., Vylegzhanina Zh. V. Nauka i obrazovanie: novoe vremja, 2017. № 6 (23). pp. 84-89.

4. Polyukh A. A., Talipova L. V. Sbornik materialov Vserossiyskoy konferentsii, 4–10 aprelya 2022 g. V 3 ch. Ch. 2. St. Petersburg: POLITEKhpRESS, 2022. pp. 222-225.

5. Shmyrev A. Internet-zhurnal o dizayne i arkhitekture Berlogos.ru. 2016. URL: berlogos.ru/article/ekspluatiruemaya-krovlya/.

6. Tugushev A. A. Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva: Materialy vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 28–29 aprelya 2021 goda. St. Petersburg: SPbGASU, 2021. pp. 446-452.
 7. Korol' E. A., Shushunova N. S. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2019, №2. URL: cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ustroystva-razlichnyh-variantov-krovelnyh-pokrytiy-s-sistemami-ozeleneniya.
 8. Egorov A. N., Shprints M. L., Gdimiyaniy N. G. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2015. №3 (59). pp. 130-137.
 9. Koroleva V. S., Akri E. P. Sovremennyye vyzovy i perspektivy razvitiya molodezhnoy nauki: Sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Petrozavodsk, 5 aprelya 2021 goda. Petrozavodsk: "Novaya Nauka", 2021. pp. 82-85.
 10. Manzhilevskaya S. E., Gribanov A. V. Inzhenernyy vestnik Dona. 2020. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6498
 11. Carretero-Ayuso M. J, García-Sanz-Calcedo J. Revista De La Construcción, 2018. pp. 123–136.
 12. Inan, H. Recycling and Reuse Approaches for Better Sustainability. Environmental Science and Engineering, 2018. pp. 151-161.
 13. Tugushev A. A. Naukosfera. 2021. № 1-1. pp. 145-149.
 14. Lapidus A. A., Demidov L. P. Vestnik MGSU. 2014. №4. pp. 160-166. URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-vliyayuschih-na-pokazatel-potentsiala-stroitelnoy-ploschadki cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-vliyayuschih-na-pokazatel-potentsiala-stroitelnoy-ploschadki.
 15. 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.
-