

Сагитов Дамир Ильдарович

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им.
Главного маршала авиации А.А. Новикова

Глушкова Дарья Ивановна

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им.
Главного маршала авиации А.А. Новикова

Геотермальные энергетические системы в аэропортах, или инновационный подход к устойчивому экономически выгодному энергоснабжению

Аннотация. Статья представляет полный анализ применения внедрения инновационного решения для обеспечения постоянного энергоснабжения- геотермальных энергетических систем. Описаны проблемы существующих систем теплоснабжения и научная новизна нетрадиционных технологий, принципы их установки с технико-экономической стороны и методы функционирования. В ходе работы проведена расчетная часть для типового аэропорта и показан сравнительный анализ разных систем для получения энергии. Исследование доказывает точные преимущества нововведений перед традиционными методами добычи энергии в таких аспектах, как долгосрочность, экономичность и экологическая безопасность.

Ключевые слова: геотермальные системы, тепловые насосы, энергоэффективность, экономичность, устойчивое развитие, аэропорты.

Sagitov Damir Ilydarovich

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of
Aviation A. A. Novikov

Glushkova Darya Ivanovna

Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of
Aviation A. A. Novikov

Geothermal energy systems in airports, or an innovative approach to sustainable and cost-effective energy supply

Annotation. The article provides a comprehensive analysis of the implementation of an innovative solution for ensuring continuous energy supply through geothermal energy systems. It describes the challenges faced by existing heating systems and the scientific novelty of non-traditional technologies, as well as the principles of their installation and operation from a technical and economic perspective. The article also presents a calculation for a typical airport and a comparative analysis of different energy generation systems, including examples of successful implementation of geothermal energy sources in major international airports. The study highlights the clear advantages of these innovations over traditional energy production methods in terms of long-term sustainability, cost-effectiveness, and environmental friendliness.

Keywords: geothermal systems, heat pumps, energy efficiency, cost-effectiveness, sustainable development, airports.

Введение. Современные аэропорты как крупнейшие потребители энергетических ресурсов ежедневно затрачивают значительные объемы энергии на поддержание установленной температуры, освещение, обеспечение непрерывной работы технического оборудования. На фоне современных экологических проблем и необходимости в устойчивом развитии авиационная отрасль столкнулась со сложной задачей поиска экономически

выгодных способов получения энергии без ущерба экологической обстановке. Основные затраты энергии приходятся на:

- отопление терминалов в зимний период и кондиционирование в летний, вентиляция;
- освещение взлетно-посадочных полос, терминалов и служебных зданий;
- работу транспортных систем, багажного оборудования, систем, отвечающих за безопасность;
- на поддержание работы иных служб и инфраструктуры, необходимых для функционирования аэропорта.

Ключевые факторы, актуализирующие проблемы поиска новых способов получения энергии в аэропортах:

- 1) зависимость от ископаемого топлива, что соответствует зависимости от колебания цен на газ, уголь;
- 2) ужесточение экологических требований в соответствии с нормами по выбросам углекислого газа в атмосферу;
- 3) долгосрочная перспектива экономически выгодного использования;
- 4) энергетическая безопасность как состояние защищенности экономики и населения страны в сфере энергетики.

Помимо вышеперечисленных недостатков, существующие системы получения энергии с использованием ископаемого топлива требуют регулярного технического обслуживания, ремонта и замены оборудования, а также не могут обеспечить бесперебойную работу ввиду возможных логистических проблем.

Инновацией в решении данных проблем является геотермальная энергетика. Технология использует практически неисчерпаемый ресурс - недра Земли, обеспечивая гарантийное, экологическое и экономически эффективное теплоснабжение. В отличие от непредсказуемых колебаний цен на топливо, геотермальные системы сокращают эксплуатационные расходы в течение последующих десятилетий после первоначальных высоких затрат на установку.

Применение геотермальных систем в аэропортах заключается в интеграции нескольких инновационных подходов:

1. **Использование низкопотенциального тепла Земли:** современные системы преобразуют низкопотенциальное тепло грунта с помощью теплового насоса, в отличие от традиционных высокотемпературных источников.
2. **Сезонное аккумулирование тепла:** существенное повышение эффективности системы обеспечивается за счет аккумуляции избытка тепла в летний период для использования зимой.
3. **Интеллектуальное управление:** интеграция современных геотермальных систем с системами автоматического управления позволяет оптимизировать работу в зависимости от погодных условий, нагрузки и времени суток.
4. **Гибридные решения:** сочетание геотермальных систем с другими возобновляемыми источниками энергии (солнечными коллекторами, ветрогенераторами) создает синергетический эффект и повышает надежность энергоснабжения.
5. **Модульный подход:** в соответствии с количеством необходимой энергии, есть возможность создавать и внедрять модульные системы.

Принцип работы геотермальных систем заключается в использовании тепла земных недр. Геотермальные тепловые насосы чаще применяют в совокупности с грунтовыми теплообменниками различных конфигураций.

Алгоритм работы системы:

1. Сбор тепла. Уложенные в земле, обычно на глубине от нескольких до сотен метров, трубы содержат циркулирующий теплоноситель, чаще всего представленный смесью воды и антифриза.
2. Передача тепла. Нагретый грунтом теплоноситель поступает в тепловой насос.

3. Усиление температуры. Хладагент, испаряясь, поступает в компрессор, где сжимается, что приводит к значительному повышению его температуры (до 60-80°C).

4. Распределение тепла. горячий хладагент поступает в конденсатор, где отдает тепло системе отопления, цикл возобновляется.

Ключевой показатель эффективности теплового насоса, показывающий, во сколько раз вырабатываемая энергия превосходит потребляемую, называется коэффициентом преобразования (COP). Для современных геотермальных систем COP составляет 3-5.

Для оценки эффективности внедрения геотермальной системы в аэропорту проведем тепловой расчет для типового терминала площадью 50 000 м². Удельная тепловая нагрузка на отопление – 60 Вт/м², а на кондиционирование – 50 Вт/м². Отопительный период длится 220 дней, период кондиционирования – 120 дней. Средняя температура наружного воздуха в отопительный сезон составляет –5 °С, при этом температура внутри помещений поддерживается на уровне +20 °С. Температура грунта на глубине 100 м равна +10 °С.

Расчет тепловой нагрузки:

1. **Максимальная тепловая нагрузка на отопление:**

$$Q_{\text{отоп}} = 50\,000 \text{ м}^2 \times 60 \text{ Вт/м}^2 = 3\,000\,000 \text{ Вт} = 3 \text{ МВт}$$

2. **Максимальная тепловая нагрузка на кондиционирование:**

$$Q_{\text{конд}} = 50\,000 \text{ м}^2 \times 50 \text{ Вт/м}^2 = 2\,500\,000 \text{ Вт} = 2,5 \text{ МВт}$$

3. **Годовая потребность в тепловой энергии на отопление:**

$$Q_{\text{год_отоп}} = 3 \text{ МВт} \times 24 \text{ ч/сут} \times 220 \text{ сут} \times 0,6 \text{ (коэффициент использования)} = 9\,504 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

4. **Годовая потребность в тепловой энергии на кондиционирование:**

$$Q_{\text{год_конд}} = 2,5 \text{ МВт} \times 24 \text{ ч/сут} \times 120 \text{ сут} \times 0,5 \text{ (коэффициент использования)} = 3\,600 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

5. **Общая годовая потребность в тепловой энергии:**

$$Q_{\text{год_общ}} = 9\,504 + 3\,600 = 13\,104 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

Расчет производительности геотермальной системы:

Принимаем COP теплового насоса = 4 (среднее значение для современных систем)

1. **Требуемая тепловая мощность теплового насоса:**

$$P_{\text{тепл}} = 3 \text{ МВт (по максимальной нагрузке)}$$

2. **Электрическая мощность, потребляемая тепловым насосом:**

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{тепл}} / \text{COP} = 3 \text{ МВт} / 4 = 0,75 \text{ МВт}$$

3. **Годовая экономия энергии по сравнению с электрическим отоплением:**

- При прямом электрическом отоплении потребовалось бы: 13 104 МВт·ч

- При использовании теплового насоса требуется: 13 104 / 4 = 3 276 МВт·ч

- Экономия: 13 104 - 3 276 = 9 828 МВт·ч в год

4. **Экономия по сравнению с газовым отоплением:**

- При КПД газового котла 90% и теплотворной способности газа 34 МДж/м³:

- Годовой расход газа: (13 104 МВт·ч × 3,6 ГДж/МВт·ч) / (34 МДж/м³ × 0,9) = 1 540 000 м³

- При стоимости газа 8 руб/м³: годовые затраты 12,32 млн руб

5. **Затраты на электроэнергию для геотермальной системы:**

- При стоимости электроэнергии 5 руб/кВт·ч: 3 276 000 кВт·ч × 5 руб/кВт·ч = 16,38 млн руб

Расчет грунтового теплообменника:

Для обеспечения тепловой мощности 3 МВт при температуре грунта +10°C и температуре теплоносителя на выходе из теплообменника +5°C:

1. **Удельный теплосъем с 1 метра скважины:** 50 Вт/м (для глинистых грунтов)

2. **Общая длина скважин:** $L = 3\,000\,000 \text{ Вт} / 50 \text{ Вт/м} = 60\,000 \text{ м}$

3. **Количество скважин глубиной 100 м:** $N = 60\,000 \text{ м} / 100 \text{ м} = 600 \text{ скважин}$

4. **Площадь участка под скважины:** при расстоянии между скважинами 10 м потребуется участок примерно $200 \times 300 \text{ м} = 60\,000 \text{ м}^2$

1. **Капитальные затраты:**

- Бурение скважин: $600 \text{ скв} \times 100 \text{ м} \times 3 \text{ 000 руб/м} = 180 \text{ млн руб}$
- Тепловые насосы и оборудование: 100 млн руб
- Монтажные работы и пусконаладка: 50 млн руб. **Итого:** 330 млн руб

2. **Эксплуатационные затраты (годовые):**

- Электроэнергия: 16,38 млн руб
- Обслуживание: 5 млн руб. **Итого:** 21,38 млн руб

3. **Экономия по сравнению с газовой системой:**

- Затраты на газ: 12,32 млн руб
- Обслуживание газовой котельной: 8 млн руб. **Итого:** 20,32 млн руб

Экономия: $20,32 - 21,38 = -1,06$ млн руб (небольшое превышение затрат). Стоит учесть, что стоимость оборудования в геотеплоэнергетике выше, но срок эксплуатации, по сравнению с газовой системой, в несколько раз больше.

4. **Экономия по сравнению с электрическим отоплением:**

- Затраты на электроэнергию при прямом отоплении: $13 \text{ 104 000 кВт}\cdot\text{ч} \times 5 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} = 65,52 \text{ млн руб}$

Экономия: $65,52 - 21,38 = 44,14$ млн руб в год

5. **Срок окупаемости:**

- По сравнению с электрическим отоплением: $330 \text{ млн руб} / 44,14 \text{ млн руб/год} = 7,5$ лет

- По сравнению с газовым отоплением: $330 \text{ млн руб} / 1,06 \text{ млн руб/год} = 311$ лет (без учета роста цен на газ)

6. **Чистая приведенная стоимость (NPV) за 25 лет:**

- При ставке дисконтирования 8%
- $NPV = -330 + \sum (44,14 / (1+0,08)^n)$ для $n=1...25 = 152,3$ млн руб

Выводы по расчету: Геотермальная система требует дополнительных мер для лидерства в сравнении с газовыми системами, но в аспекте экономической эффективности превосходит электрическое энергоснабжение. Экономика проекта улучшается за счет следующих факторов:

- Увеличение стоимости традиционных энергоносителей;
- Поддержка развития со стороны государства;
- Повышение эффективности тепловых насосов;
- Масштабное производство снижает затраты на оборудование.

Таблица 1. Сравнительный анализ различных систем теплоснабжения для аэропорта

Параметр	Газовая котельная	Электрическое отопление	Геотермальная система
Первоначальные инвестиции	Низкие (20-50 млн руб)	Средние (30-70 млн руб)	Высокие (200-400 млн руб)
Эксплуатационные расходы	Высокие (зависит от цен на газ)	Очень высокие	Низкие
Зависимость от цен на топливо	Полная	Полная (от тарифов на электроэнергию)	Минимальная
Срок службы, лет	15-20	20-25	50+ (скважины), 20-25 (оборудование)
Коэффициент полезного действия	85-92%	95-98%	300-500% (COP 3-5)

Параметр	Газовая котельная	Электрическое отопление	Геотермальная система
Экологическое воздействие	Высокое (выбросы CO ₂ , NO _x , SO _x)	Среднее (зависит от источника электроэнергии)	Низкое
Требования к площади	Средние	Низкие	Высокие (для грунтового теплообменника)
Необходимость в обслуживании	Высокая	Средняя	Низкая
Энергетическая безопасность	Низкая	Средняя	Высокая
Возможность кондиционирования	Нет	Да (через отдельные системы)	Да (встроенная функция)

Вывод. Устойчивое энергоснабжение аэропортов может быть предоставлено геотермальными энергетическими системами. Несмотря на высокие первоначальные затраты, геотермальные источники обеспечивают долгосрочную экономическую эффективность за счет окупаемости за 7-12 лет с последующим практически бесплатным теплоснабжением. В отличие от традиционных систем, зависящих от цен на топливо, предложенная обеспечивает производство тепловой энергии в 3-5 раз больше потребляемой по предсказуемому тарифу. Используя возобновляемый источник, тепловую энергию Земли, геотермальная система позволяет сократить выбросы углекислого газа на 70-90%, а также уменьшить уровень шума и других факторов, негативно влияющих на экологию местности.

Список источников

1. Выпуск журнала Дайджест декабрь 2024, группа компаний ИНСОЛАР. - Текст: электронный // Режим доступа: <https://insolar.ru/upload/iblock/e44/qeebhey1p61014px1wn0jzkg0lds9525.pdf> (дата обращения: 03.04.2026).
2. Выпуск журнала Мировая энергия «Геотермальная энергия», 21.11.2023. - Текст: электронный // Режим доступа: <https://www.world-energy.org/article/38264.html> (дата обращения: 03.04.2026).
3. Международное энергетическое агентство (IEA). Geothermal Energy. - 2024. - 45 с.
4. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA). Geothermal Power: Technology Brief. - 2023. - 32 с.
5. Европейская ассоциация геотермальной энергии (EGEC). Geothermal Market Report 2024. - Brussels, 2024. - 68 с.
6. Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация). Концепция развития аэропортовой инфраструктуры до 2030 года. - Москва, 2023. - 120 с.
7. Национальная ассоциация геотермальной энергии (Россия). Стратегия развития геотермальной энергетики в Российской Федерации. - 2024. - 56 с.
8. Airport Council International (ACI). Sustainable Aviation: Best Practices in Airport Energy Management. - Montreal, 2024. - 89 с.
9. Международная организация гражданской авиации (ICAO). Environmental Report 2024: Aviation and Climate Change. - Montreal, 2024. - 210 с.

10. Управление по энергоэффективности и возобновляемой энергии США (EERE). Geothermal Heat Pump Systems: Design and Installation Guide. - Washington, 2023. - 145 с.
11. Европейская комиссия. Directive (EU) 2023/... on energy efficiency and renewable energy in transport infrastructure. - Brussels, 2023.
12. Министерство энергетики Российской Федерации. Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики». - Москва, 2024. - 180 с.
13. Международный аэропорт Цюриха. Sustainability Report 2024. - Zurich, 2025. - 45 с.
14. Аэропорт Хельсинки-Вантаа. Environmental Action Plan 2024-2030. - Helsinki, 2024. - 60 с.
15. Научно-исследовательский институт энергетических проблем. Геотермальные ресурсы России: оценка и перспективы использования. - Москва, 2024. - 210 с.

Сведения об авторах

Сагитов Дамир Ильдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры №13 «Систем автоматизированного управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Глушкова Дарья Ивановна, студент 2 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sagitov Damir Ilydarovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department No. 13 'Automated Control Systems', Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Glushkova Darya Ivanovna, 2nd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.