



# Эффективность работы геотермальной теплонасосной системы теплоснабжения в жилом доме

---

Тимофеев Д.В., аспирант

Научный руководитель: проф. к.т.н. Малявина Е.Г.

6 февраля 2018 года

Национальный Исследовательский Московский  
Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ-МИСИ)



1. Введение
2. Инженерный расчёт оборудования
3. Моделирование энергетических систем
4. Характеристики объекта
5. Расчёты потребления энергии системой
6. Выводы



# Введение

---



# Инженерный расчёт оборудования

---

# Отличие энергетического моделирования от инженерного расчёта



Инженерный расчёт	Энергетическое моделирование
Будет ли оборудование работать в экстремальных условиях?	Насколько эффективно выбранное оборудование будет работать в экстремальных условиях?
Используется аналитическая модель	Используется численная модель, или смесь численной и аналитической
Можно оценить капитальные затраты	Капитальные затраты известны после подбора оборудования
Нельзя оценить затраты на содержание	Можно оценить стоимость эксплуатации системы
Приняты сильные упрощения, по времени ощущается как мгновенный	Подобие численного эксперимента, расчёт занимает время

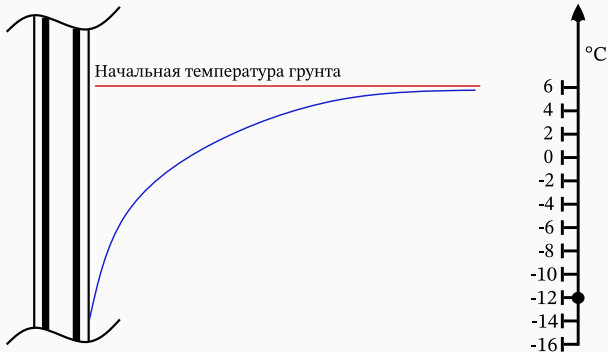


Грунтовые породы	при 1800 ч. работы теплового насоса	при 2400 ч. работы теплового насоса
Сухие осадочные породы, $\lambda < 1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$	25 Вт/м	20 Вт/м
Скальные породы или насыщенные водой осадочные, $\lambda = 1,5...3,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$	60 Вт/м	50 Вт/м
Консолидированные скальные породы, $\lambda > 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$	84 Вт/м	70 Вт/м



Грунтовые породы	при 1800 ч. работы теплого насоса	при 2400 ч. работы теплого насоса
Сухие осадочные породы, $\lambda < 1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	25 Вт/м	20 Вт/м
Скальные породы или насыщенные водой осадочные, $\lambda = 1,5...3,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	60 Вт/м	50 Вт/м
Консолидированные скальные породы, $\lambda > 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	84 Вт/м	70 Вт/м

# Особенности инженерного расчёта теплососных систем

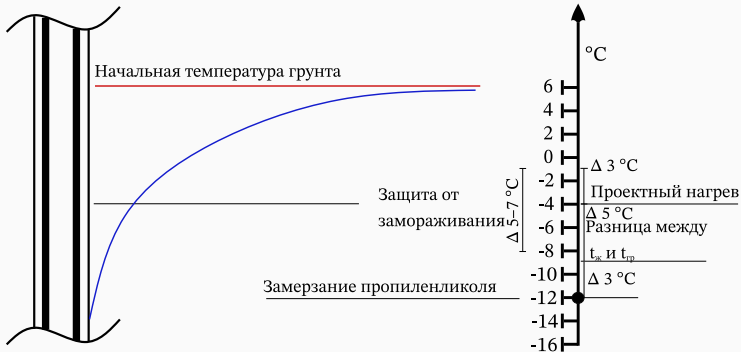


Вначале температура в грунте постоянна (красная линия). Если отбирать при помощи ВГТ одинаковое в каждую секунду количество холода, с течением времени температура установится (синяя линия)





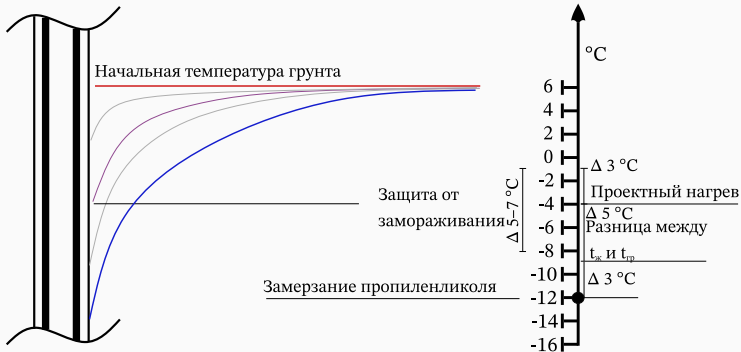
# Особенности инженерного расчёта теплонасосных систем



Если мы позволим температуре установиться, теплоноситель замёрзнет. Нужно подобрать длину теплообменника так, чтобы теплоноситель не охладился ниже  $-4\text{ }^\circ\text{C}$

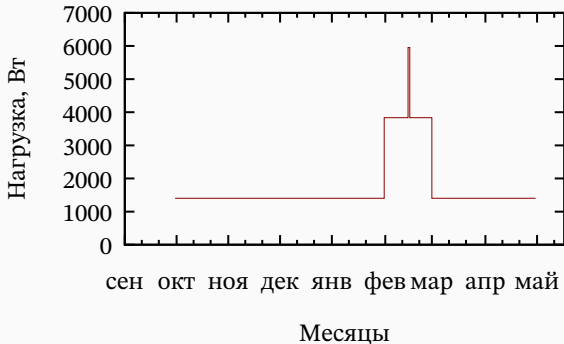


# Особенности инженерного расчёта теплососных систем



Или мы можем учитывать нестационарность процесса, зная, что грунт остывает медленно. Подобрать длину так, чтобы грунт **не успел** замёрзнуть в наших климатических условиях

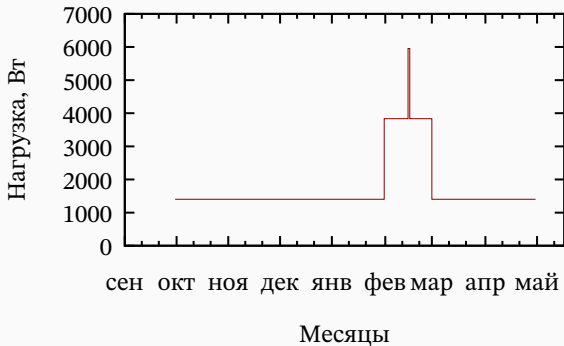
# Учёт переменной нагрузки в методике ASHRAE



В методике ASHRAE нагрузка представлена в виде трёх «пульсов»:

- Средняя годовая нагрузка (нижняя линия);
- Средняя нагрузка в самый холодный месяц (средняя линия);
- Средняя нагрузка в самый холодный день.

# Учёт переменной нагрузки в методике ASHRAE



$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + q_{evap} (R_b + PLF_m R_{gm} + F_{sc} R_{gst})}{t_g - \frac{ELT+LLT}{2} + t_p}$$



- В VDI 4640 данные для 1800 и 2400 часов. Согласно «экстремальному» типовому году НИИСФ РААСН в Москве 4996 часов
- В VDI 4640 данные рассчитывались для климатических условий Германии (так как это немецкие нормы). В Москве холоднее чем в Германии



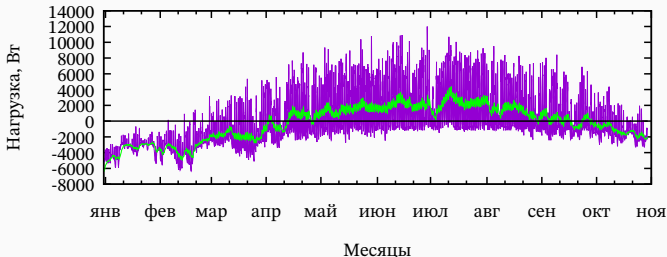
Можно ли использовать таблицу из VDI4640  
для Москвы?



# Моделирование энергетических систем

---

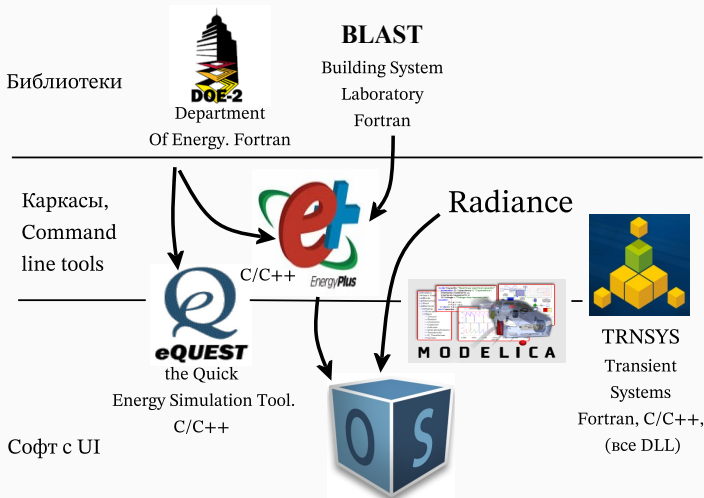
# Симуляция работы СКВ здания



- Напоминает численный эксперимент. Модель каждого компонента системы аппроксимирует поведение реального объекта, принимая в каждый дискретный шаг расчёта входные данные от предыдущих компонентов, и вычисляя данные для следующего;
- Шаг в процессе симуляции составляет час виртуального времени или меньше;
- Временной горизонт эксперимента год или больше;



# Существующие программы для энергетического моделирования





- Недостаток в функциональности:
  - Модель теплового насоса в Energy plus с поршневым компрессором, желание использовать современные хладагенты (R410A);
  - Возможность применить более современные алгоритмы оптимизации для поиска рабочей точки;
  - Возможность учёта постепенного замерзания и оттаивания грунта вокруг грунтового теплообменника;
- Написаны на языках с ручным управлением памятью (C/C++), что затрудняет внесение изменений в код.

# Функциональные особенности запроектированной программы

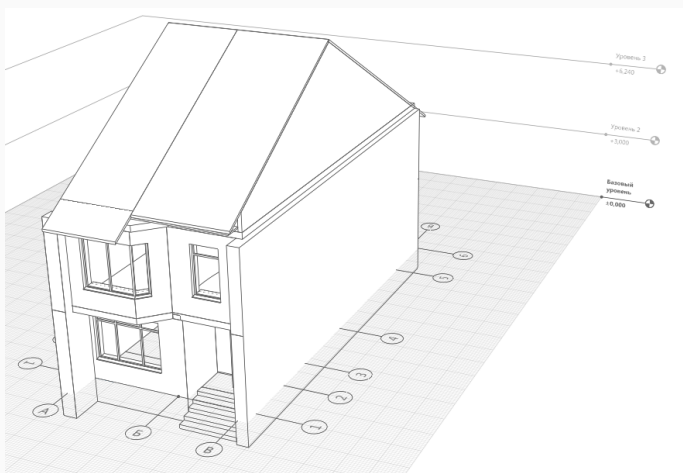


- Модель грунтового теплообменника в конечных разностях, учитывает постепенное замерзание и оттаивание грунта при помощи данных СП 25.13330.2012;
- Модель теплового насоса со спиральным компрессором;
- Упрощённые модели тепло/холодо потребления здания;
- Упрощённые модели насосов, солнечного коллектора, мини-VRF блока;
- Упрощённая модель электрического котла.



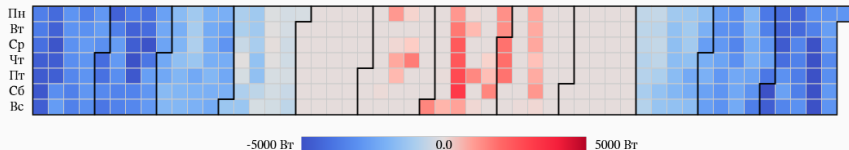
# Характеристики объекта

---



**Рис. 1:** Блокированный жилой дом (таун хаус)  
в московском климате

# Теплопотери и теплопоступления рассматриваемого здания



Условия функционирования системы на отопление:

- Температура воздуха по сухому термометру ниже 14 °С;
- На отопление система работает с октября по май.

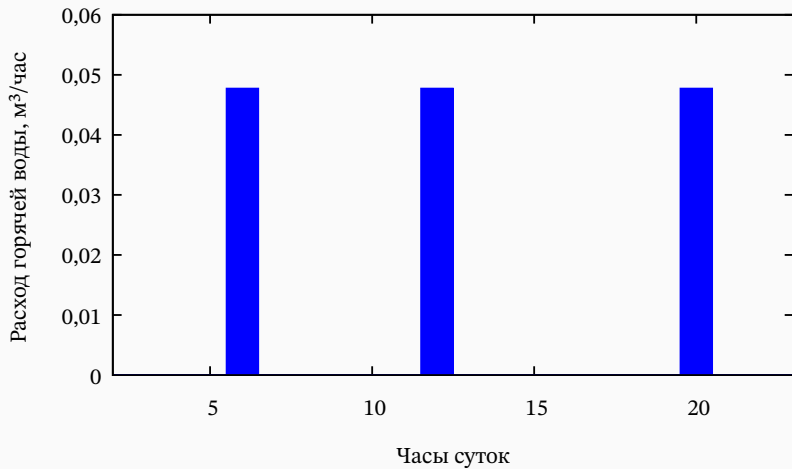
Условия функционирования системы на холодоснабжение:

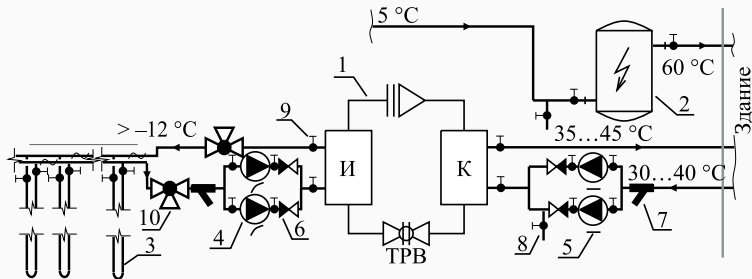
- Температура воздуха по сухому термометру выше 22 °С;
- На холодоснабжение система работает с июня по сентябрь.

Отношение требуемой отопительной нагрузки к холодильной:

$$12, 73\text{МВт} \cdot \text{ч} / 0, 95\text{МВт} \cdot \text{ч} = 13, 38$$

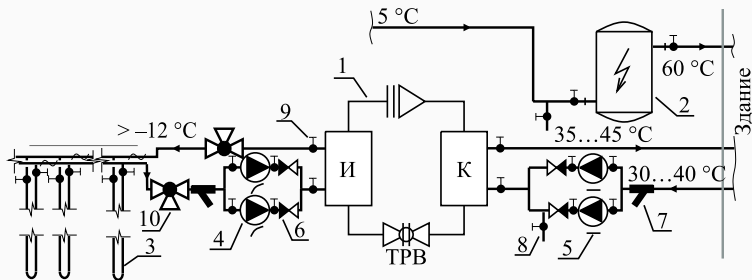
# Потребление горячей воды жильцами здания за сутки





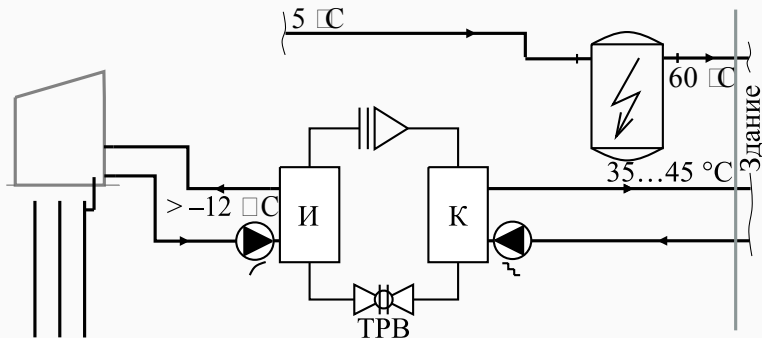
**Рис. 2:** 1 – тепловой насос, 2 – электрический котёл, 3 – поле грунтовых теплообменников, 4 – циркуляционный насос грунтового контура с переменной частотой вращения привода, 5 – циркуляционный насос контура здания с постоянной скоростью, 6 – обратный клапан, 7 – фильтр, 8 – ответвления для слива воды, 9 – шаровой кран, 10 – трёхходовой клапан (для прочистки контура)





**Рис. 2:** 1 — тепловой насос, 2 — электрический котёл, 3 — поле грунтовых теплообменников, 4 — циркуляционный насос грунтового контура с переменной частотой вращения привода, 5 — циркуляционный насос контура здания с постоянной скоростью, 6 — обратный клапан, 7 — фильтр, 8 — ответвления для слива воды, 9 — шаровой кран, 10 — трёхходовой клапан (для прочистки контура)

# Упрощённая модель системы только с необходимыми для расчёта элементами



**Рис. 3:** Схема отопления здания при помощи теплового насоса, а горячее водоснабжение при помощи электродкотла



# Расчёты потребления энергии системой

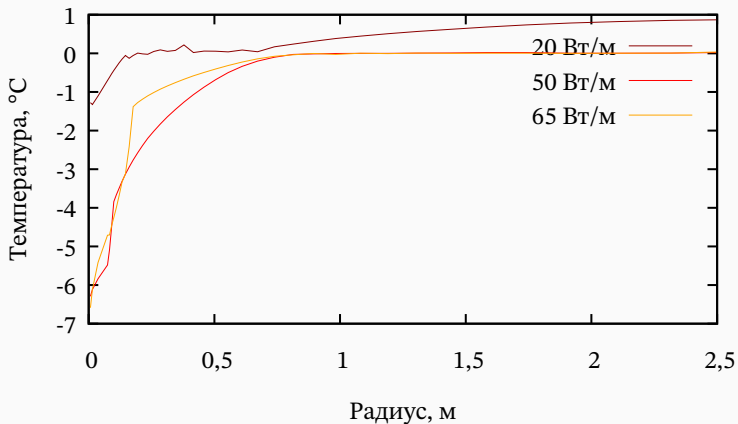
---

# Расчёт правильности выбора глубины скважины

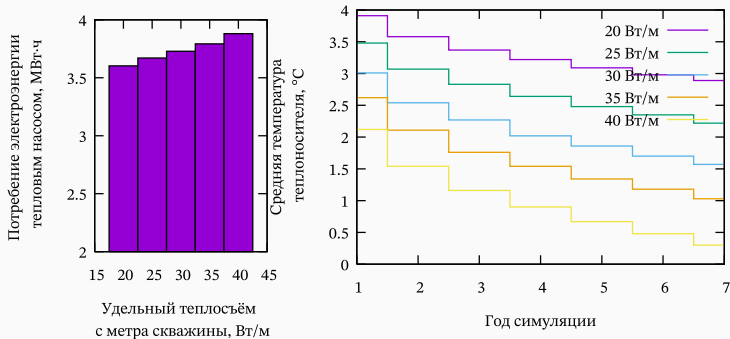


**Таблица 1:** Принятые теплофизические характеристики грунта, расчётная пиковая нагрузка на скважину, и год работы, в котором система перестаёт вырабатывать требуемое количество теплоты

Грунт	Влажность, д.е.	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Нагрузка на скважину, Вт/м	Год смерти
Слабозасоленная глина	0,15	1,17	20	нет
Среднезасоленная глина	0,05	1,49	50	1
Сильнозасоленный песок	0,20	2,69	65	1

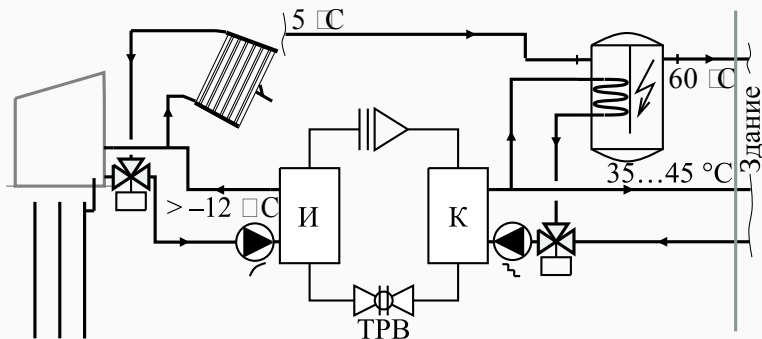


**Рис. 4:** Температурный профиль грунта на глубине 35 метров на 5 год симуляции, с разными параметрами грунта и глубиной скважины, подобранными по таблице VDI4640



**Рис. 5:** Слева — увеличение потребляемой мощности теплового насоса при уменьшении глубины скважин. По оси абсцисс — принятый удельный теплосъём с метра скважины, по которому рассчитывалась её глубина. Справа — понижение среднегодовой температуры пропиленгликоля в грунтовом контуре в течение численной симуляции. Теплопроводность грунта  $\lambda = 2,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$





**Рис. 7:** Схема отопления при помощи теплового насоса. Скважина летом «регенерируется» при помощи солнечного коллектора



# Потребление энергии системами теплоснабжения



**Таблица 2:** Потребление электрической энергии, МВт·ч, системой теплоснабжения здания за год

Источник энергии	Электродкотёл	Бивалентный котёл	Бивалентный котёл и солнечный коллектор	Зима и лето
Тепловой насос	3,71	4,52	4,50	3,70
Бойлер для горячей воды	3,53	2,11	2,11	3,53
Насос в контуре здания	0,23	0,37	0,38	0,24
Насос в грунтовом контуре	0,17	0,37	0,37	0,19
Суммарные затраты электроэнергии на теплоснабжение	7,73	7,37	7,36	7,72

# Стоимость потребляемой энергии разными системами



**Таблица 3:** Стоимость энергии (тыс. руб.), затраченной на теплоснабжение здания за год

Назначение	ТЕН	Тепловой насос	Центральная система теплоснабжения	Газовый котёл
Отопление	37,583	11,573	21,884	6,370
Горячее водоснабжение	15,320	7,073 + 3,016	9,474	1,764

- Цена на электрическую энергию: 1,15 руб/кВт·ч с 22<sup>00</sup> до 7<sup>00</sup>, 4,34 руб/кВт·ч с 7<sup>00</sup> до 22<sup>00</sup>;
- Цена на тепловую энергию от сети центрального теплоснабжения: 1477,05 руб/Гкал;
- Цена тепловой энергии, получаемой от сжигаемого газового топлива: 0,5 руб/кВт·ч;
- Цена на горячее водоснабжение: 180,55 руб/м<sup>3</sup>.

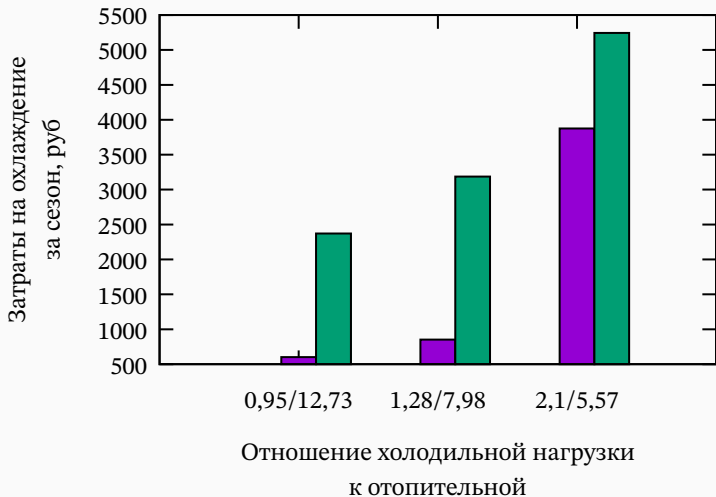


Пусть в здании будут присутствовать:

- Фоновые тепловыделения  $10 \text{ Вт/м}^2$ , круглосуточно;
- Тепловыделения от 18 взрослых мужчин, с  $8^{00}$  до  $17^{00}$ .

Рассмотрим случаи, когда в здании присутствуют только одна, или оба из вышеприведённых внутренних тепlopоступлений. Тогда отношение требуемой холодильной нагрузки к отопительной составит:

- $7,98 \text{ МВт}\cdot\text{ч} / 1,28 \text{ МВт}\cdot\text{ч} = 6,20$  раз;
- $5,57 \text{ МВт}\cdot\text{ч} / 2,1 \text{ МВт}\cdot\text{ч} = 2,68$  раз.



**Рис. 8:** Затраты на охлаждение при разных нагрузках. фиолетовые — затраты на охлаждение тепловым насосом, зелёные — затраты на охлаждение mini VRF



## Выводы

---



- Использование теплоснасосных систем теплоснабжения с вертикальным грунтовым теплообменником выгоднее на величину COP (3 – 4 раза), чем отопление здания при помощи электричества, и выгоднее на 30% чем системы центрального теплоснабжения;
- Теплоснасосная система проигрывает в стоимости потребляемой энергии газовому котлу. Газовый котёл эффективнее на 60%;
- Разница в стоимости энергии в течении 8 лет между тремя системами (центральная система теплоснабжения, теплоснасосная система, и газовый котёл) может быть несущественна по сравнению с капитальными затратами на установку и подключение сетей, и капитальные затраты варьируются от места к месту;
- В случае больших нагрузок на отопление и маленьких на охлаждение, стоит рассмотреть возможность установку горячего водоснабжения отдельной системой, и использовать тепловой насос летом для кондиционирования.



Спасибо за просмотр!