

# Оценочный технико-экономический расчёт эффективности применения тепловых насосов для теплоснабжения тепличного комплекса в г. Хабаровске

Настоящий расчёт выполняется с целью определения эффективности использования тепловых насосов для обеспечения теплом и холодом тепличного комплекса, создаваемого на территории рекультивируемых зольных отвалов ТЭЦ-3 г. Хабаровска.

## Общие данные

На рассматриваемом земельном участке общей площадью 52 га планируется разместить комплекс теплиц общей площадью 10 га.

Климатические условия региона характеризуются следующими параметрами в соответствии с СП 131.13330.2018 «Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99\*»:

- расчётная температура для проектирования системы отопления минус 29 °С;
- средняя температура наружного воздуха за отопительный период минус 9,5 °С;
- среднегодовая температура 2,2 °С;
- продолжительность отопительного периода 205 суток.

Температура внутреннего воздуха в расчётах принята равной 21 °С.

В качестве источника тепла низкого температурного потенциала для тепловых насосов предлагается использовать грунт. Для этого предлагается устроить горизонтальный грунтовый коллектор, состоящий из полимерных труб, уложенных на поверхность зольных отвалов до проведения рекультивации, которые впоследствии будут укрыты грунтом.

Исходя из площади земельного участка определим доступную мощность горизонтальной системы теплосбора.

$$520\,000\text{ м}^2 \cdot 20\text{ Вт/м}^2 = 10,4\text{ МВт},$$

где 20 Вт/м<sup>2</sup> - удельная величина теплосъёма, ожидаемая для рассматриваемого региона, типа грунтового теплообменника и свойств грунта.

Согласно представленным заказчиком данным, суммарная тепловая нагрузка тепличного комплекса составляет 40 МВт. Учитывая, что коэффициент преобразования энергии тепловыми насосами составит приблизительно 3,3 единицы (т.е. на 1 МВт

тепловой мощности необходимо будет подвести 0,3 МВт электричества, и при этом 0,7 МВт будет получено из грунта), максимальная доступная в указанных условиях производительность тепловых насосов составит порядка 15,6 МВт. Данная величина меньше нагрузки теплоснабжения тепличного комплекса, поэтому в дальнейших расчётах для простоты рассматривается применение тепловых насосов для обеспечения теплоснабжения четверти площади теплиц, т.е. 2,5 га.

## **Варианты организации энергоснабжения комплекса**

В настоящее время заказчиком рассматриваются 2 варианта энергоснабжения тепличного комплекса:

- вариант 1 - электроснабжение за счёт подключения к электрическим сетям, теплоснабжение от газовой котельной с подключением к магистральному газу и прокладкой газопровода;
- вариант 2 - электроснабжение и частичное теплоснабжение от собственной миниТЭЦ с обеспечением пикового потребления тепла газовыми котлами.

При этом в обоих вариантах нерешёнными остаются вопросы поддержания температуры в теплицах в летний период, когда требуется охлаждение. В дальнейших расчётах принято, что холодоснабжение в летнее время осуществляется за счёт работы холодильных машин, поскольку в ином случае производство придётся останавливать на несколько месяцев, что негативно скажется на общей экономике проекта, учитывая отсутствие реализации продукции в этот промежуток времени при сохранении значительной части операционных затрат.

В расчёте в качестве базового варианта, с которым производится сравнение, принят вариант 1, предусматривающий присоединение к сетям электро- и газоснабжения.

В качестве предлагаемых вариантов рассматриваются следующие варианты организации энергоснабжения комплекса с применением теплонасосного оборудования:

- вариант 3 - электроснабжение за счёт подключения к электрическим сетям, теплоснабжение и холодоснабжение от тепловых насосов;
- вариант 4 - электроснабжение от собственной миниТЭЦ, теплоснабжение комбинированное - от миниТЭЦ и тепловых насосов, холодоснабжение от тепловых насосов.

По технологии в теплицах предусмотрено использование искусственного освещения в течение 16 часов в сутки из расчёта 180 Вт/м<sup>2</sup>. Для рассматриваемой площади теплиц мощность освещения составит 4,5 МВт. В отопительный период эта нагрузка будет снижать потребность в отоплении, тогда как в летний период

соответствующее количество энергии нужно будет удалять при помощи системы холодоснабжения (поскольку внешние теплопритоки в летнее время не определялись, в качестве расчётной нагрузки холодоснабжения в расчётах будем использовать именно мощность освещения. Очевидно, что в действительности мощность системы охлаждения должна быть выше).

## Энергетический баланс

Рассмотрим энергетический баланс теплиц для всех вариантов энергоснабжения.

**Вариант 1.** В базовом варианте необходимо будет подвести 4,5 МВт электроэнергии и соорудить газовую котельную на 10 МВт. Кроме того, понадобится установить холодильное оборудование производительностью 4.5 МВт холода.

**Вариант 2.** В этом случае рассмотрим отдельно работу энергетического оборудования при работающем освещении и во время его отсутствия для зимнего и летнего периодов. Результаты сведём в таблицу 1.

Таблица 1. Энергетический баланс теплиц для варианта 2 - миниТЭЦ.

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения	
		С подсветкой	Без подсветки
Время действия	ч	16,00	8,00
<b><u>Зимний период</u></b>			
Тепловая нагрузка	МВт	10,00	
Тепловая мощность освещения	МВт	4,50	-
Тепловая мощность миниТЭЦ	МВт	6,75	-
Мощность, направляемая в теплоаккумуляторы	МВт	1,25	-
Мощность, потребляемая из теплоаккумуляторов	МВт	-	2,50
Запасённое количество тепла	МВт*ч	20,00	
Объём теплоаккумуляторов	м <sup>3</sup>	859,85	
Мощность котельной	МВт	-	7,50
<b><u>Летний период</u></b>			
Мощность чиллеров холодильная	МВт	-	9,00

Мощность чиллеров электрическая	МВт	-	3,00
Мощность миниТЭЦ электрическая	МВт	4,50	3,00
Мощность миниТЭЦ тепловая	МВт	6,75	4,50
Мощность чиллеров тепловая	МВт	-	12,00
Мощность, направляемая в аккумуляторы	МВт	-	9,00
Мощность, потребляемая из аккумуляторов	МВт	4,50	-
Запасённое в аккумуляторах количество холода	МВт*ч	72,00	
Объём аккумуляторов	м <sup>3</sup>	6 190,89	

В зимний период при работе освещения миниТЭЦ обеспечивает производство электроэнергии для его работы, одновременно производя тепло в количестве, в 1,5 раза, превышающем выработку электричества. При этом образуется избыток тепловой мощности, которые можно направить в аккумуляторы тепла (на данном этапе проработки будем считать, что тепловые потери при аккумуляции отсутствуют). Во время отключения электроэнергии данное тепло будет расходоваться на отопление теплиц. Однако запасов тепла не хватит на покрытие нагрузки отопления, и потребления электроэнергии в данное время нет, т.к. освещение отключено. Поэтому недостаток тепловой мощности обеспечивается работой газовых котлов.

В летнее время миниТЭЦ также работает на нагрузку освещения во время его использования, но именно в это время требуется активное охлаждение воздуха в теплицах, т.к. освещение является источником тепла: вся энергия, расходуемая на освещение в конечном итоге преобразуется в тепло. Это может вызвать повышение температуры внутри теплиц выше максимально допустимых значений. Чтобы этого избежать, следует во время работы освещения обеспечить охлаждение теплиц, при этом холодопроизводительность чиллеров должна быть не меньше, чем мощность освещения. Однако одновременная работа освещения и чиллеров потребует дополнительных мощностей миниТЭЦ, что, учитывая стоимость оборудования миниТЭЦ, не целесообразно, особенно если принять во внимание, что в оставшееся время миниТЭЦ будет простаивать. Поэтому предлагается включать чиллеры в то время, когда освещение не работает, и накапливать холод в аккумуляторах. Это позволит не увеличивать мощности миниТЭЦ и выровнять её загрузку. При этом запасённый холод будет расходоваться на снятие теплоизбытков от освещения во время его работы.

При расчёте объёмов аккумуляторов принято, что в зимнем режиме теплоноситель нагревается на 20 °С, а в летний охлаждается на 10 °С.

Вариант 3. Расчёт требуемых мощностей оборудования проводится аналогично предыдущему варианту. Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. Энергетический баланс теплиц для варианта 3 - эл. сети + ТН.

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения	
		С подсветкой	Без подсветки
Время действия	ч	16,00	8,00
<b><i>Зимний период</i></b>			
Тепловая нагрузка	МВт	10,00	
Тепловая мощность освещения	МВт	4,50	-
Мощность ТН тепловая	МВт	5,50	10,00
Мощность ТН электрическая	МВт	1,67	3,03
<b><i>Летний период</i></b>			
Мощность ТН холодильная	МВт	-	9,00
Мощность ТН электрическая	МВт	-	3,00
Мощность сетей электрическая	МВт	4,50	3,00
Мощность ТН тепловая	МВт	-	12,00
Мощность, направляемая в грунт	МВт	-	9,00
Мощность, потребляемая из грунта	МВт	4,50	-
Запасённое в грунте количество холода	МВт*ч	72,00	
Удельный сброс холода в грунт	Вт/м <sup>2</sup>	1731	

В данном варианте тепловая мощность тепловых насосов соответствует полной нагрузке отопления, поэтому во время работы освещения они работают частично. При этом требуется увеличить подводимую мощность электрической сети по сравнению с базовым вариантом.

Летом система работает аналогично варианту 2, но только холод запасается не в аккумуляторах, а в грунте, что позволяет экономить занимаемое оборудованием место и снизить капитальные затраты, а также использовать

возможности пассивного холодоснабжения и восстановить тепловой режим грунта к отопительному сезону.

Вариант 4. Расчёт требуемых мощностей оборудования проводится аналогично предыдущему варианту. Результаты показаны в таблице 3.

Таблица 3. Энергетический баланс теплиц для варианта 4 - миниТЭЦ + ТН.

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения	
		С подсветкой	Без подсветки
Время действия	ч	16,00	8,00
<b><u>Зимний период</u></b>			
Тепловая нагрузка	МВт	10,00	
Мощность освещения тепловая	МВт	4,50	-
Мощность миниТЭЦ тепловая	МВт	6,75	3,13
Мощность ТН тепловая	МВт	-	6,88
Мощность ТН электрическая	МВт	-	2,09
<b><u>Летний период</u></b>			
Мощность ТН холодильная	МВт	-	9,00
Мощность ТН электрическая	МВт	-	3,00
Мощность сетей электрическая	МВт	4,50	3,00
Мощность ТН тепловая	МВт	-	12,00
Мощность, направляемая в грунт	МВт	-	9,00
Мощность, потребляемая из грунта	МВт	4,50	-
Запасенное в грунте количество холода	МВт*ч	72,00	
Удельный сброс холода в грунт	Вт/м <sup>2</sup>	17,31	

Зимой миниТЭЦ и освещение покрывают нагрузку отопления когда свет включен, а когда он выключен большая часть электрической мощности миниТЭЦ идёт на привод тепловых насосов, и вместе они обеспечивают отопление теплиц.

Летом ситуация полностью повторяет предыдущий вариант.

В сводном виде ситуация выглядит таким образом:

Таблица 4. Мощности оборудования по вариантам.

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Мощность электрической сети	МВт	6,00	-	6,17	-
Мощность газовой котельной	МВт	10,00	7,50	-	-
Мощность миниТЭЦ электрическая	МВт	-	6,00	-	4,50
Мощность ТН тепловая	МВт	-	-	12,00	12,00
Мощность чиллеров холодильная	МВт	4,50	4,50	-	-
Ёмкость аккумуляторов	м <sup>3</sup>	-	6 190,00	-	-

### Технико-экономическое сравнение

Теперь, после того как мы определили мощности основного оборудования, можно перейти к расчёту выработки энергии и потребления ресурсов, а также определить экономические характеристики рассматриваемых систем.

В расчёте примем следующие исходные данные и допущения:

- эффективность работы чиллеров и тепловых насосов в режиме холодоснабжения равна 3 (3 МВт холода на 1 МВт электроэнергии);
- теплотворная способность газа 9,239 МВт\*ч/тыс.м<sup>3</sup>;
- КПД сжигания газа 90%;
- в отопительный сезон холодоснабжение не производится;
- коэффициент использования холодильной мощности в межотопительный сезон 0,5;
- тариф на электроэнергию, получаемую из сети 4,56 руб./кВт\*ч с НДС;
- при обеспечении прогноза потребления электроэнергии на сутки вперёд тариф может быть снижен на 20%;
- тариф на газ 10,78 руб./м<sup>3</sup> с НДС;
- удельные вложения в подключение к электрическим сетям 20000 руб./кВт;
- удельные вложения в подключение к газовым сетям 15000 руб./кВт;
- удельная стоимость создания миниТЭЦ 74,5 млн. руб./МВт электрической мощности;
- удельная стоимость газовой котельной 3,4 млн. руб./МВт;
- удельная стоимость холодильного оборудования 36 000 руб./кВт холода;
- удельная стоимость аккумуляторов тепла/холода 20 000 руб./м<sup>3</sup>;

- удельная стоимость тепловых насосов 25 000 руб./кВт тепла;
- удельная стоимость грунтового теплообменника 300 руб./м<sup>2</sup>.

Результаты расчёта сведены в таблицу 5, представленную ниже.

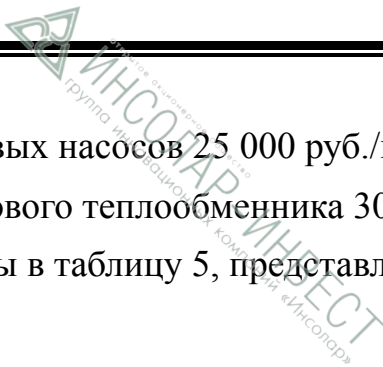




Таблица 5. Результаты технико-экономического расчёта.

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения			
		Подключение к сетям (базовый)	МиниТЭЦ	Сети + ТН	МиниТЭЦ + ТН
<b><u>ЗИМНИЙ РЕЖИМ</u></b>					
Нагрузка отопления расчётная	МВт	10,00			
Нагрузка освещения	МВт	4,50			
<i><u>Мощности теплового оборудования</u></i>					
Мощность газовой котельной тепловая	МВт	10,00	7,50	0,00	-
Мощность миниТЭЦ тепловая	МВт	-	6,75	-	6,75
Мощность ТН тепловая	МВт	-	-	10,00	6,88
<i><u>Мощности электрооборудования</u></i>					
Подведённая мощность электрических сетей	МВт	4,50	-	6,17	-
Мощность миниТЭЦ электрическая	МВт	-	4,50	-	4,50
Мощность ТН электрическая	МВт	-	-	3,03	2,09
<i><u>Выработка тепла за отопительный период</u></i>					
Освещение	МВт*ч	14 760,00	14 760,00	14 760,00	14 760,00
Газовая котельная	МВт*ч	12 036,43	6 699,11	0,00	-

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения			
		Подключение к сетям (базовый)	МиниТЭЦ	Сети + ТН	МиниТЭЦ + ТН
МиниТЭЦ	МВт*ч	-	22 140,00	-	24 933,64
ТН	МВт*ч	-		12 036,43	6 145,31
<b>ЛЕТНИЙ РЕЖИМ</b>					
<i>Мощность холодильного оборудования</i>					
Холодильная мощность чиллеров	МВт	4,50	4,50	-	-
Аккумуляированный холод из грунта	МВт	-	-	4,50	4,50
Холодильная мощность ТН	МВт	-	-	9,00	9,00
<i>Мощности электрооборудования</i>					
Подведённая мощность электрических сетей	МВт	6,00	-	4,50	-
Мощность миниТЭЦ электрическая	МВт	-	6,00	-	4,50
Электрическая мощность ТН	МВт	-	-	3,00	3,00
Электрическая мощность чиллеров	МВт	1,50	1,50	-	-
<i>Выработка холода</i>					
Чиллеры	МВт*ч/год	11 520,00	11 520,00	-	-
Пассивный холод из грунта	МВт*ч/год	-	-	1 440,00	735,21
ТН	МВт*ч/год	-	-	10 080,00	10 784,79

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения			
		Подключение к сетям (базовый)	МиниТЭЦ	Сети + ТН	МиниТЭЦ + ТН
<b>ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ</b>					
<i>Потребление электроэнергии</i>					
На освещение	МВт*ч/год	26 280,00	26 280,00	26 280,00	26 280,00
На привод ТН	МВт*ч/год	-	-	7 007,81	5 457,36
На привод чиллеров	МВт*ч/год	3 744,00	3 744,00	-	-
Потребление электроэнергии из сети	МВт*ч/год	30 024,00	-	33 287,81	-
<b>Сброс тепла в атмосферу</b>	<b>МВт*ч/год</b>	<b>15 264,00</b>	<b>33 938,68</b>	<b>15 264,00</b>	<b>29 122,52</b>
<i>Расход газа</i>					
Расход газа	тыс.м3/год	1 447,54	6 862,11	0,00	6 571,59
<i>Экономия энергии</i>					
Суммарные затраты энергии	МВт*ч/год	42 060,43	57 059,11	33 287,81	54 643,39
<b>Экономия энергии</b>	<b>МВт*ч/год</b>	-	<b>-14 998,68</b>	<b>8 772,62</b>	<b>-12 582,96</b>
	<b>%</b>	-	<b>-35,66%</b>	<b>20,86%</b>	<b>-29,92%</b>
<i>Эксплуатационные расходы</i>					
Затраты на газ	млн. руб./год	15,61	73,99	0,00	70,86
Затраты на электроэнергию	млн. руб./год	136,91	-	121,43	-
Всего эксплуатационных затрат:	млн. руб./год	152,52	73,99	121,43	70,86

Наименование параметра	Ед. изм.	Вариант энергоснабжения			
		Подключение к сетям (базовый)	МиниТЭЦ	Сети + ТН	МиниТЭЦ + ТН
Экономия эксплуатационных затрат	млн. руб./год	-	<b>78,52</b>	<b>31,08</b>	<b>81,66</b>
	%	-	<b>51%</b>	<b>20%</b>	<b>54%</b>
<i>Капитальные вложения</i>					
Газовые сети	млн. руб.	150,00	281,25	-	168,75
Электрические сети	млн. руб.	120	-	123,34	-
Газовая котельная	млн. руб.	34,00	25,50	-	-
МиниТЭЦ	млн. руб.	-	446,67	-	335,00
Чиллеры	млн. руб.	162,00	162,00	-	-
Теплоаккумуляторы	млн. руб.	-	123,82	-	-
ТН	млн. руб.	-	-	300,00	300,00
Грунтовые теплообменники	млн. руб.	-	-	156,00	156,00
<b>Всего:</b>	<b>млн. руб.</b>	<b>466,00</b>	<b>1 039,23</b>	<b>579,34</b>	<b>959,75</b>
Дополнительные капитальные вложения	млн. руб.	-	573,23	113,34	493,75
<b>Срок окупаемости</b>	<b>лет</b>	<b>-</b>	<b>7,30</b>	<b>3,65</b>	<b>6,05</b>

Как видно из результатов приведённых расчётов, вариант 3, предполагающий подведение электрических сетей и установку тепловых насосов, демонстрирует наилучшие показатели с точки зрения экономии энергии. При этом несмотря на то, что эксплуатационные затраты в обоих рассмотренных случаях использования миниТЭЦ оказываются ниже, чем при подключении к электрическим сетям, за счёт чрезвычайно высоких капитальных затрат эти варианты оказываются менее эффективными с точки зрения экономики, чем вариант 3 - электрические сети и тепловые насосы.

При использовании тепловых насосов и электроснабжении от сетей эксплуатирующая организация может сократить количество обслуживающего персонала и его функционал, т.к. отпадёт необходимость в таких непрофильных для тепличного хозяйства специалистах, как работники миниТЭЦ. Кроме того, снимутся вопросы согласования нагрузок и обеспечения взаимодействия с электрическими сетями в ситуации превышения выработки энергии над потреблением и т.п.

Отметим также, что варианты использования миниТЭЦ предполагают увеличение расхода энергии по сравнению с базовым вариантом на 30-36%, в то время как вариант 3 с тепловыми насосами напротив, обеспечивает экономию энергии в размере 21%.

Полученный срок окупаемости теплонасосной системы по варианту 3 составляет менее 4 лет. Если же принять во внимание постоянный рост тарифов на энергию и энергоносители, то можно ожидать сокращения срока окупаемости до 3 лет и даже менее.

Поскольку тарифы на электроэнергию в России уже находятся на мировом уровне, тогда как тарифы на газ значительно ниже мировых, рост тарифов на газ может существенно превышать рост тарифов на электроэнергию, что негативно скажется на экономических параметрах всех вариантов, предполагающих использование газа.

Из представленных расчётов можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным вариантом организации энергоснабжения комплекса теплиц является вариант с подключением к электрическим сетям и использованием тепловых насосов для теплоснабжения и охлаждения теплиц.

Все данные по техническим характеристикам и стоимостным параметрам оборудования, представленные в настоящем предложении, являются оценочными и подлежат обязательному уточнению в процессе дальнейшей проработки.

В данном расчёте рассматривалась только одна четвёртая часть площадей теплиц. Более подробные расчёты и рассмотрение вариантов расширения использования теплонасосного оборудования на остальные площади теплиц создаваемого комплекса, равно как и оптимизация решений по внутренним системам подачи тепла и холода в теплицах могут быть выполнены нами на стадии разработки концепции энергоснабжения комплекса.

Директор проектного отделения  
ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»  
Горнов В.Ф.



11.05.2021 г.

Вариант энергоснабжения

Наименование параметра	Ед. изм.	Подключение к сетям (базовый)	Вариант энергоснабжения		
			МиниТЭЦ	Сети + ТН	МиниТЭЦ + ТН
<u>Эксплуатационные расходы</u>					
Затраты на газ	млн. руб./год	15,61	73,99	0,00	70,86
Затраты на электроэнергию	млн. руб./год	136,91	-	121,43	-
<b>Расходы на сервис</b>	<b>млн. руб./год</b>	<b>11,36</b>	<b>31,72</b>	<b>13,74</b>	<b>29,28</b>
<b>Амортизация</b>	<b>млн. руб./год</b>	<b>24,00</b>	<b>47,22</b>	<b>20,12</b>	<b>35,61</b>
<b>Налог на имущество</b>	<b>млн. руб./год</b>	<b>10,25</b>	<b>22,86</b>	<b>10,42</b>	<b>18,79</b>
<b>Всего эксплуатационных затрат:</b>	<b>млн. руб./год</b>	<b>198,13</b>	<b>175,79</b>	<b>165,71</b>	<b>154,54</b>
Экономия эксплуатационных затрат	млн. руб./год	-	22,34	32,42	43,59
	%	-	11%	16%	22%
<u>Капитальные вложения</u>					
Газовые сети	млн. руб.	150,00	281,25	0,00	168,75
Электрические сети	млн. руб.	120,00	-	123,34	-
Газовая котельная	млн. руб.	34,00	25,50	0,00	-
МиниТЭЦ	млн. руб.	-	446,67	-	335,00
Чиллеры	млн. руб.	162,00	162,00	-	-

Теплоаккумуляторы	млн. руб.	-	123,82	0,00	-
ТН	млн. руб.	-	-	300,00	300,00
Грунтовые теплообменники	млн. руб.	-	-	50,40	50,40
<b>Всего:</b>	<b>млн. руб.</b>	<b>466,00</b>	<b>1 039,23</b>	<b>473,74</b>	<b>854,15</b>
Дополнительные капитальные вложения	млн. руб.	-	573,23	7,74	388,15
<b>Срок окупаемости</b>	<b>лет</b>	<b>-</b>	<b>25,66</b>	<b>0,24</b>	<b>8,91</b>