

**Modelarea fizică a sistemului de termoficare privind integrarea pompei de căldură în sistemul de alimentare centralizată cu energie termică**

**Физическое моделирование системы отопления с учетом интеграции теплового насоса в систему централизованного снабжения тепловой энергией**

## ХЛАДАГЕНТЫ – общая информация

- После подписания Монреальского протокола (1985 г.) по запрету веществ, разрушающих озоновый слой, были установлены озоноразрушающие потенциалы (ОРП) (ODP - Ozone-Depleting Potential) хладагентов. После принятия Киотского протокола (1987 г.), призвавший снизить эмиссии парниковых газов, были установлены потенциалы глобального потепления (ПГП) (GWP - Global Warming Potential) для каждого хладагента. За единицу был принят ПГП диоксида углерода.
- В настоящее время во всем мире идет постепенный отказ от синтетических хладагентов и переход к использованию природных хладагентов, одновременно с этим, ужесточаются требования к существующим хладагентам. Поэтому, при планировании широкого внедрения тепловых насосов, следует ответственно относиться к выбору хладагентов. В таблице приведены наиболее перспективные природные хладагенты.

Наиболее выигрышным по совокупному рассмотрению параметров является R744

Вещество	Обозначение	Формула	М, кг/моль	ОРП, (ODP)	ПГП, (GWP)	P <sub>кр</sub> , МПа
Воздух	R729	–	28.96	0	0	3.79
Аммиак	R717	NH <sub>3</sub>	17.03	0	0	11.39
Диоксид углерода	R744	CO <sub>2</sub>	44.01	0	1	7.377
Этан	R170	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.07	0	<3	4.872
Пропан	R290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.1	0	<3	4.248
Изобутан	R600 а	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	0	<3	3.640

## ХЛАДАГЕНТЫ – общая информация

- Учитывая современные реалии, можно выделить основные показатели хладагентов, которыми необходимо руководствоваться при выборе хладагента:
  - озоноразрушающая способность ОРП (ODP);
  - потенциал глобального потепления ПГП (GWP);
  - токсичность;
  - пожароопасность и взрывоопасность
  - легкость в обнаружении утечек;
  - критические параметры и термодинамические свойства;
  - свойства переноса;
  - тепло массообменные характеристики;
  - температуры замерзания и термического разложения;
  - растворимость в смазочных маслах;
  - совместимость с применяемыми в машиностроении материалами и водой;
  - стоимость.

## ХЛАДАГЕНТЫ – общая информация

- Учитывая уникальные термодинамические и экологические свойства R744, предпочтение следует отдать ТН на R744, как наиболее эффективному и безопасному для окружающей среды.
- Основные преимущества и особенности R744 следующие:
  - не горюч, (ПГП) GWP=1, что в сотни и тысячи раз меньше, чем у популярных синтетических хладагентов, (ОРП) ODP=0;
  - высокая энергоэффективность (более низкое энергопотребление по сравнению с системами на синтетических хладагентах (СХ));
  - высокая объемная теплопроизводительность, как следствие, меньший объем заправки хладагента (по сравнению с синтетическими хладагентами), уменьшение габаритов и материалоемкости системы;
  - высокая плотность газа, что повышает эффективность теплообмена;
  - диоксид углерода производится в Молдове и себестоимость его ниже, чем пропана;
  - к особенностям можно отнести относительно высокое давление в системе (до 80 бар в до критической области и до 100 бар в сверхкритической). Но современные технологии успешно преодолели эти особенности.

## ТЕПЛОВОЙ НАСОС – общая информация

Тепловой насос – это установка для переноса теплоты от более холодного теплоносителя к более горячему за счет подвода внешней электрической энергии или механической, необходимых для работы компрессора.

Принцип действия теплового насоса основан на отдаче и поглощении теплоты рабочего агента «хладагента» в цикле, при периодическом переходе его из одного состояния в другое. В настоящее время парокомпрессионные тепловые насосы (ПКТН) являются самыми распространенными.

При более высоком давлении температура конденсации (кипения) повышается, поэтому хладагент конденсируется при более высокой температуре, чем испаряется. В результате, тепловой насос позволяет передавать теплоту от холодного теплоносителя к горячему. При этом он потребляет энергию ( $a_{сж}$ ), необходимую для сжатия хладагента.

# ТЕПЛОВОЙ НАСОС – общая информация

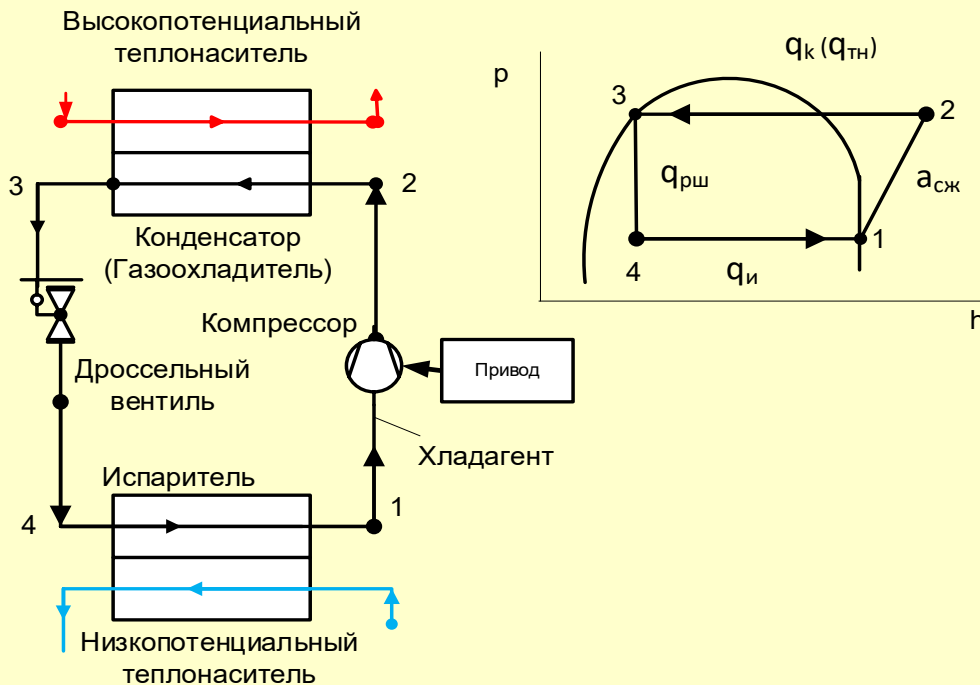


Рис. 1. Структурная схема ТН и термодинамический цикл.

- Процесс 1-2 – обратимый процесс сжатия хладагента в компрессоре при постоянной энтропии, при этом затрачивается работа ( $a_{сж}$ ).
- Процесс 2-3 – изотермическая (при постоянной температуре) конденсация хладагента в конденсаторе ( $q_{к}$ ) и отдача теплоты высокопотенциальному теплоносителю ( $q_{тн}$ ).
- Процесс 3-4 – обратимый процесс расширения хладагента в дроссельном вентиле при постоянной энтропии, при этом выделяется энергия ( $q_{рш}$ ).
- Процесс 4-1 – изотермическое испарение хладагента в испарителе за счет теплоты, отобранной у низкопотенциального теплоносителя, при этом передается энергия ( $q_{и}$ ) от низкопотенциального теплоносителя.

# ТЕПЛОВОЙ НАСОС – общая информация

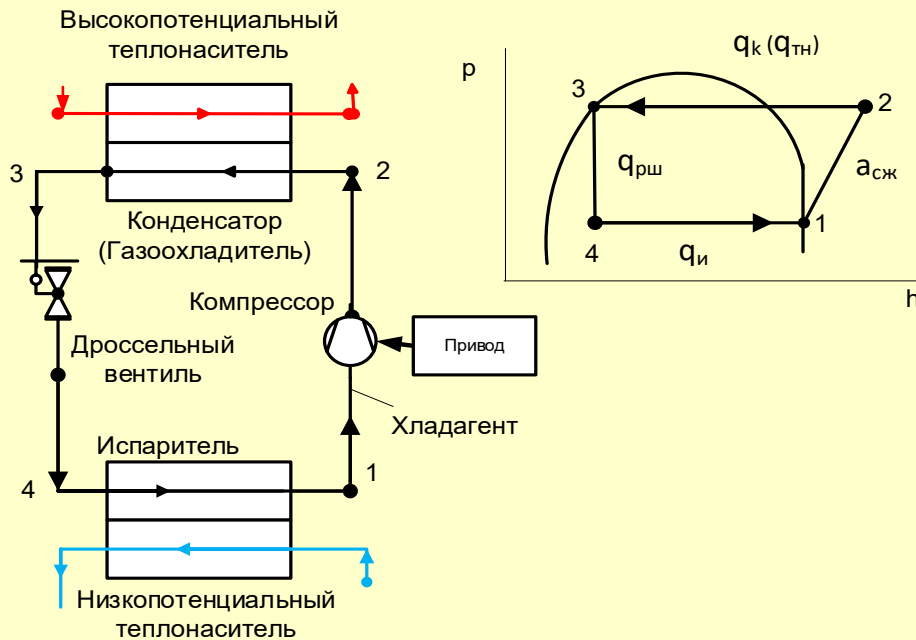


Рис. 1. Структурная схема ТН и термодинамический цикл.

Эффективность теплового насоса оценивается коэффициентом преобразования теплоты  $COP$ , равным отношению теплоты, переданной горячему теплоносителю, к работе, затрачиваемой на сжатие:

$$COP = q_{ТН} / a_{сж}.$$

Энергетическую эффективность теплового насоса удобно оценивать с помощью  $p, h$ -диаграммы. На этой диаграмме значения  $q_i, q_k, a_{сж}, q_{ТН}$  соответствуют размеру проекций соответствующих процессов на ось абсцисс. При этом,  $COP$  будет равен отношению разностей энтальпий:  $(h_2 - h_3)$  и  $(h_2 - h_1)$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД



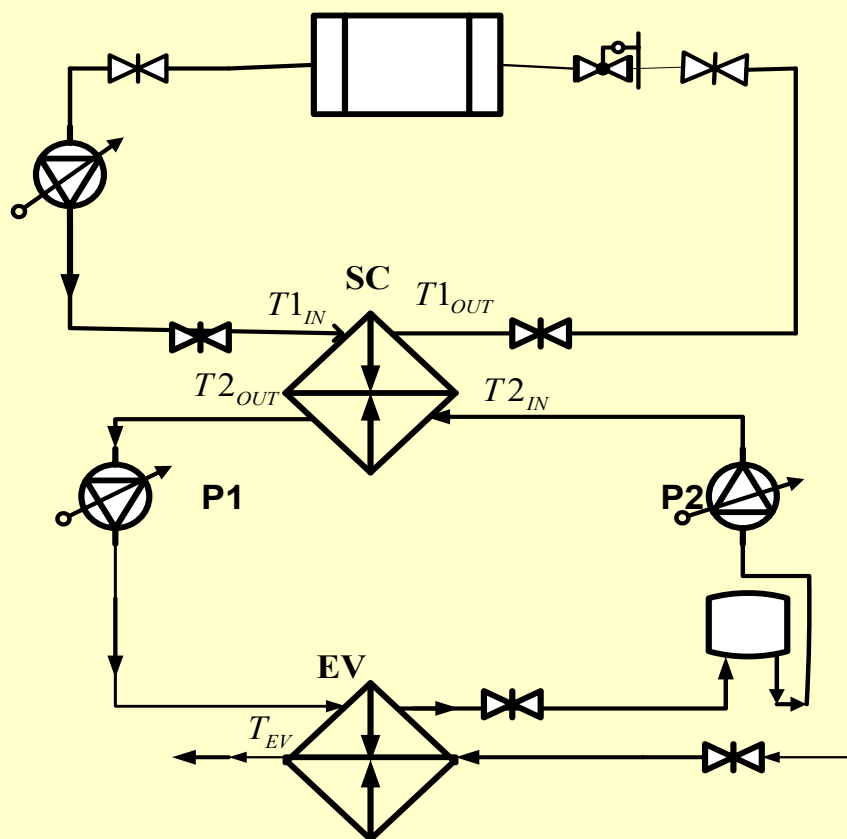
Рис.2. Экспериментальный стенд. Общий вид.

Основные функциональные составные части стенда, следующие:

- спроектированный и изготовленный горизонтальный пяти - секционный кожухотрубный теплообменник (КТТ);
- спроектированный и изготовленный вертикальный кожухозмеевиковый теплообменник (КЗТ);
- узел подготовки горячей воды с заданной температурой;
- узел подготовки холодной воды с температурой наружного воздуха;
- модифицированный тепловой насос на  $\text{CO}_2$ ;
- спроектированная и реализованная микро SCADA;



Разработана методика и схема изменения тепло-производительности теплообменников КТТ и КЗТ путем изменения площади теплообмена. Разработаны системы регулирования тепловой мощности кожухотрубного и кожухозмеевикового теплообменников. Суть методики изменения тепловой мощности в теплообменниках с кожухами показана на рис. 3



Где:

SC – Кожухотрубный теплообменник;

EV – кожухозмеевиковый теплообменник;

EH – проточный электронагреватель;

P1, P2, P3 – частотно регулируемые насосы;

VS – промежуточная ёмкость, включенная в разрыв последовательной цепи насосов P1, P2.

Измеритель уровня жидкости в теплообменнике SC выполнен на базе дифференциального манометра (на схеме не показан).

Рис. 3.

## Схема изменения уровня в теплообменниках.

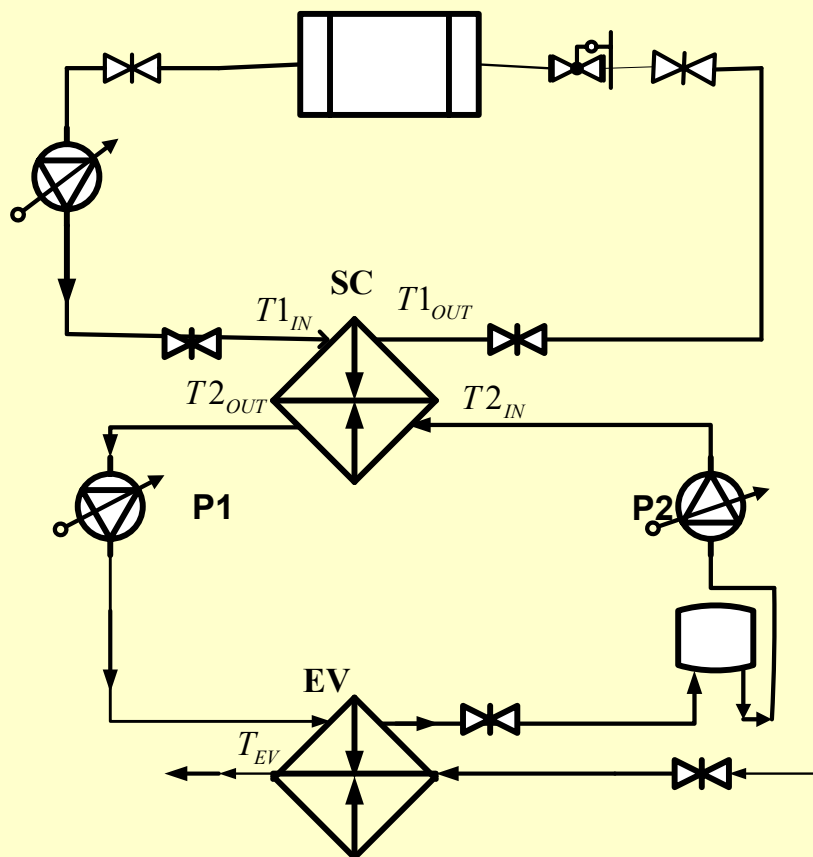


Рис. 3

- Объем промежуточной емкости VS должен быть не менее двух объёмов теплоносителя, циркулирующего в контуре P1 – P2.
- При равной производительности насосов P1 – P2 уровень в SC не изменяется.
- Для уменьшения уровня в теплообменнике (ТО) производительность насоса P1 уменьшается, при достижении заданного значения уровня восстанавливается условие равенства производительностей насосов P1, P2. При этом избыток воды переходит в промежуточную ёмкость VS.
- Для увеличения уровня теплоносителя в ТО производительность насоса P2 увеличивается, при достижении заданного уровня вновь восстанавливается условие равенства производительностей P1, P2, при этом, необходимое количество теплоносителя поступает из VS.

С целью преобразования высокой температуры обратной воды тепловой сети в заданную (пониженную) температуру промежуточной рабочей среды для передачи тепла испарителю теплового насоса, разработана схема теплового четырёхполюсника

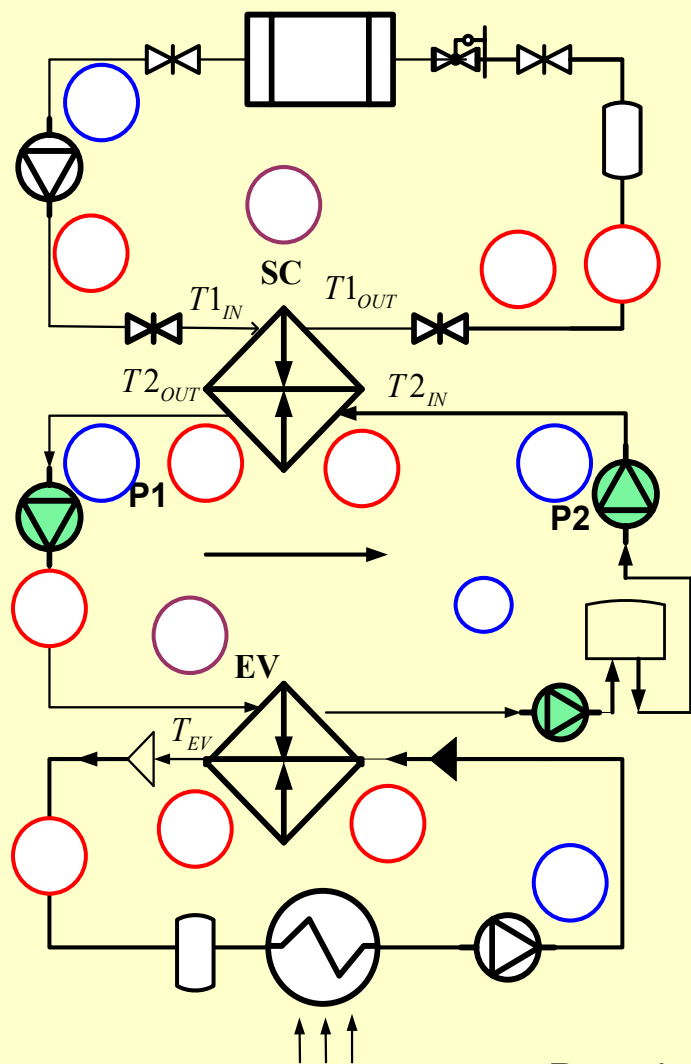


Рис. 4.

Схема четырёхполюсника состоит из:

- кожухотрубного теплообменника SC, в пространстве между трубками (кожухе) которого, может изменяться поверхность теплообмена за счет изменения уровня теплоносителя.
- Кожухозмеевикового теплообменника EV, имитирующего испаритель, в котором поверхность теплообмена также может изменяться, благодаря использованию регулируемых водяных насосов P1, P2, P4 (выделены зелёным цветом).
- Регулирование осуществляется согласно методике, представленной на Рис.3.

## Скриншот экрана микро SCADA

Из рассмотрения графиков этого файла следует, что несмотря на высокие пульсации расходов насосов P1, P4, P2, заданный уровень воды в кожухе кожухозмеевикового теплообменника (белая линия) поддерживается в пределах 3 – 5 мм. (на отрезке времени установившегося режима 150 – 240 с.)

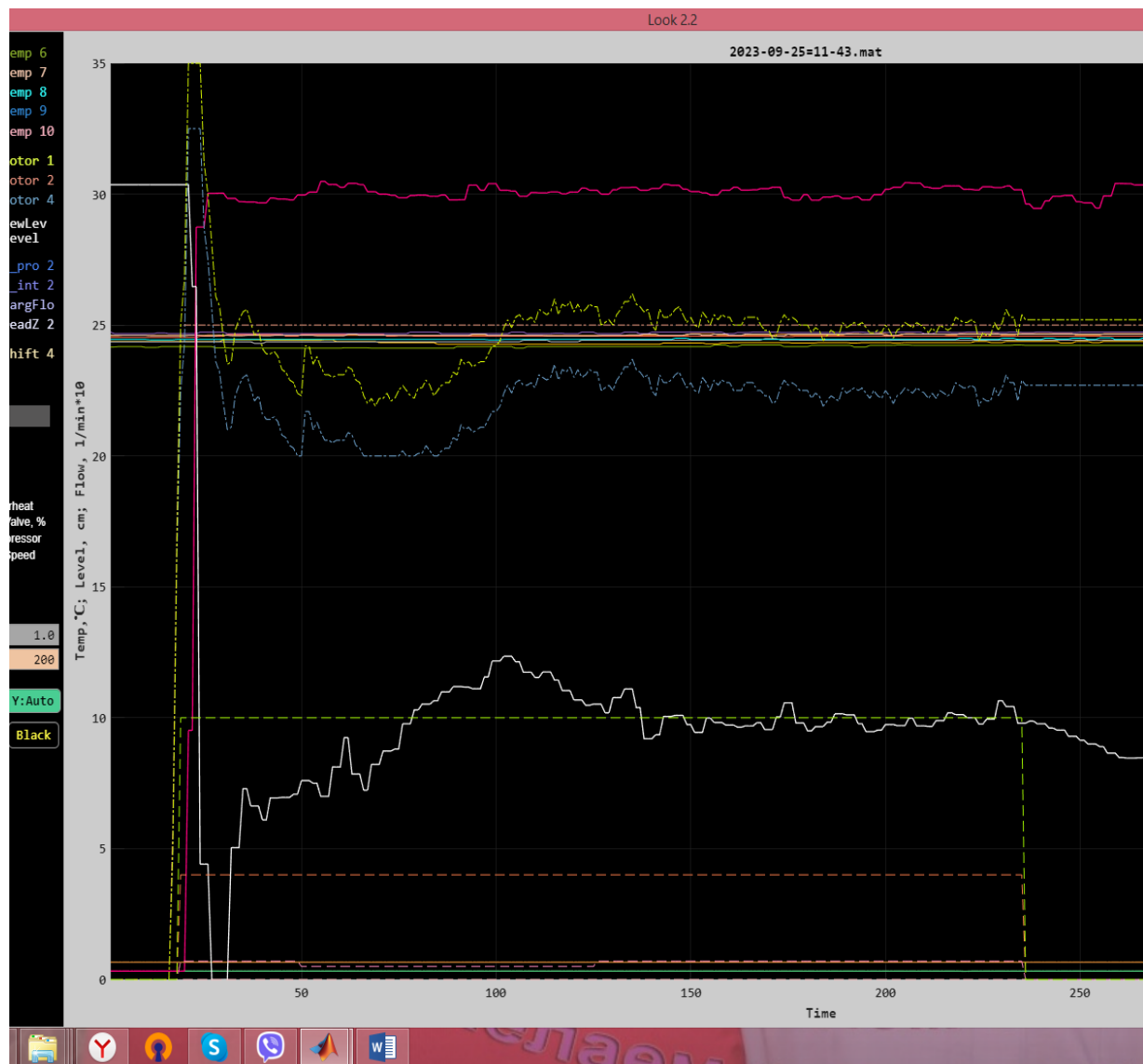


Рис 5

На этом файле показано качество поддержания уровня на отрезке времени 200-320 с. С помощью ПИ –регулятора, и процесс отслеживания уровня (белая линия) изменением расхода P1 (желто-зелёная линия). Точность поддержания уровня на заданном значении составляет 2,0 – 3,0 мм.

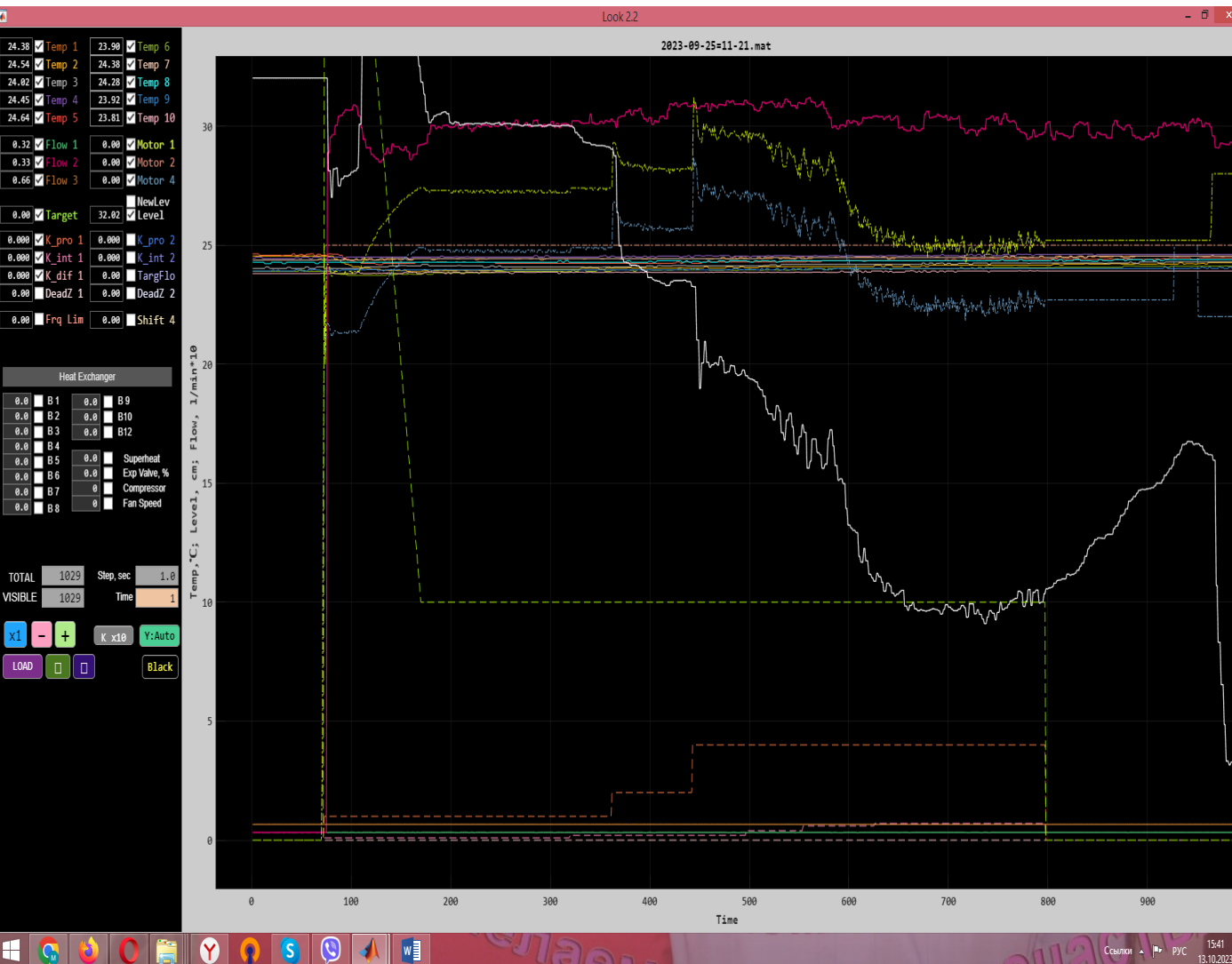
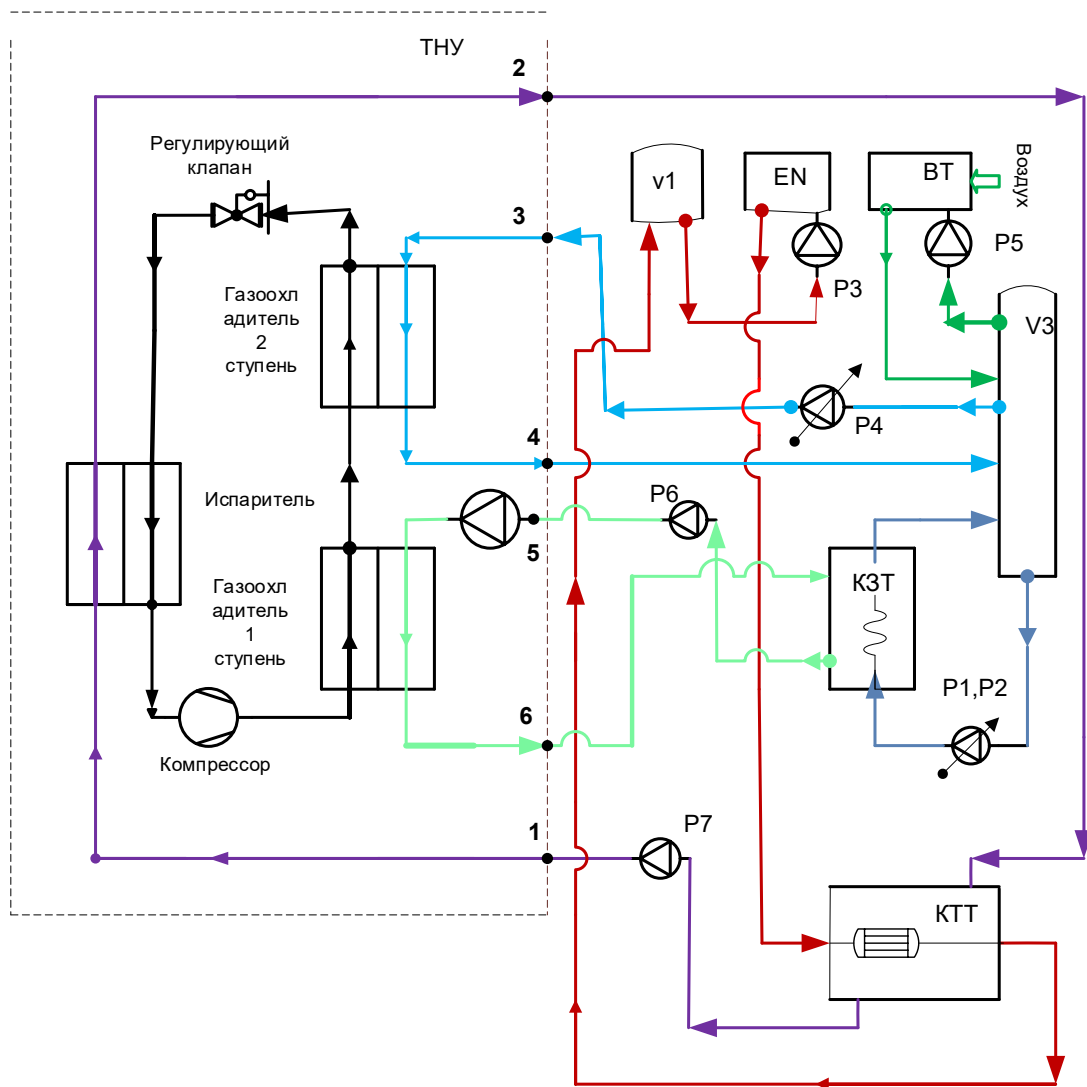


Рис. 6.

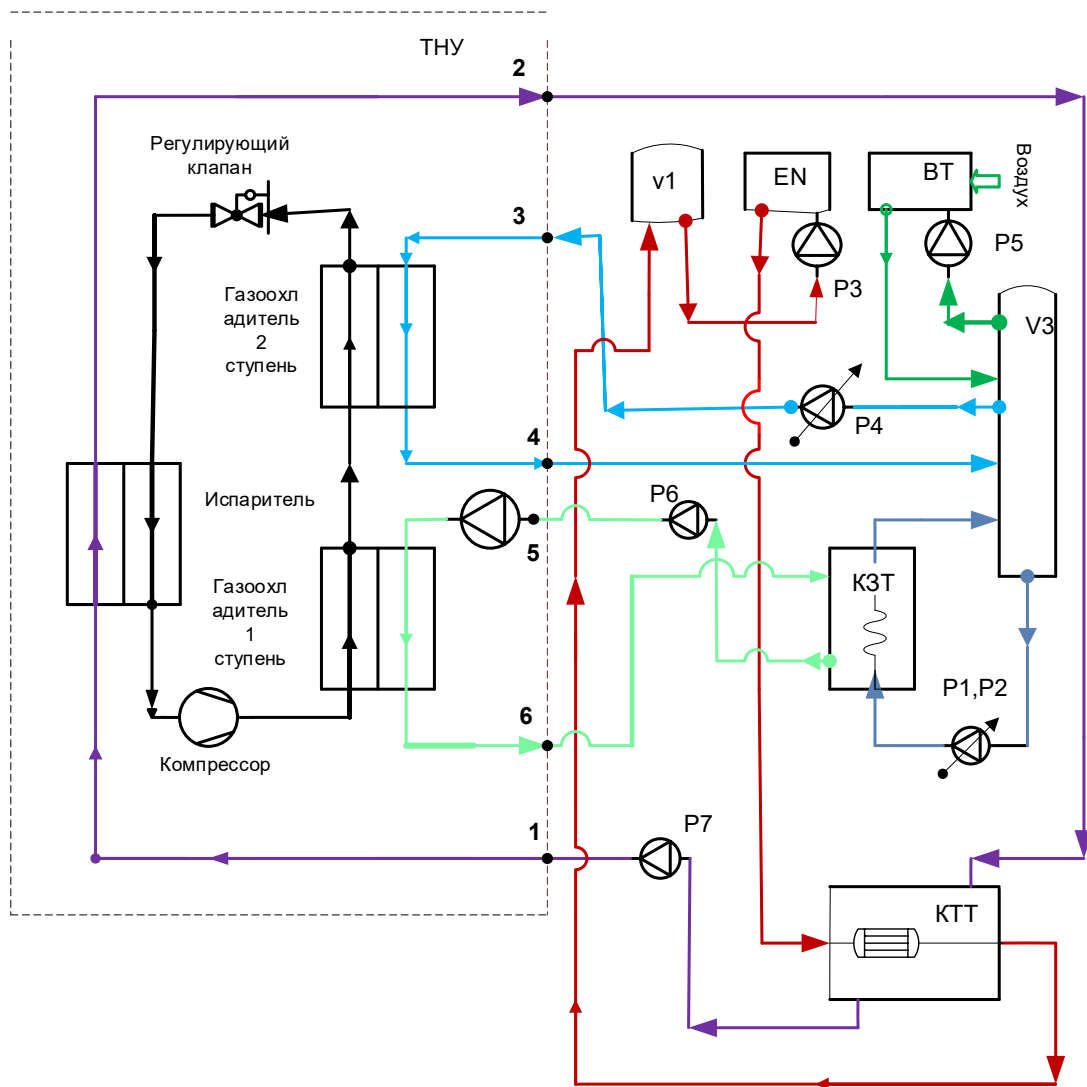
## Схема соединения ТНУ со стендом. Рис. 7.



При реализации использован модернизированный тепловой насос для приготовления горячей воды. В процессе переговоров о покупке ТН удалось получить согласие изготовителя об установке второго газоохладителя, последовательно со штатным. Таким образом, удалось разделить газоохладитель на две ступени.

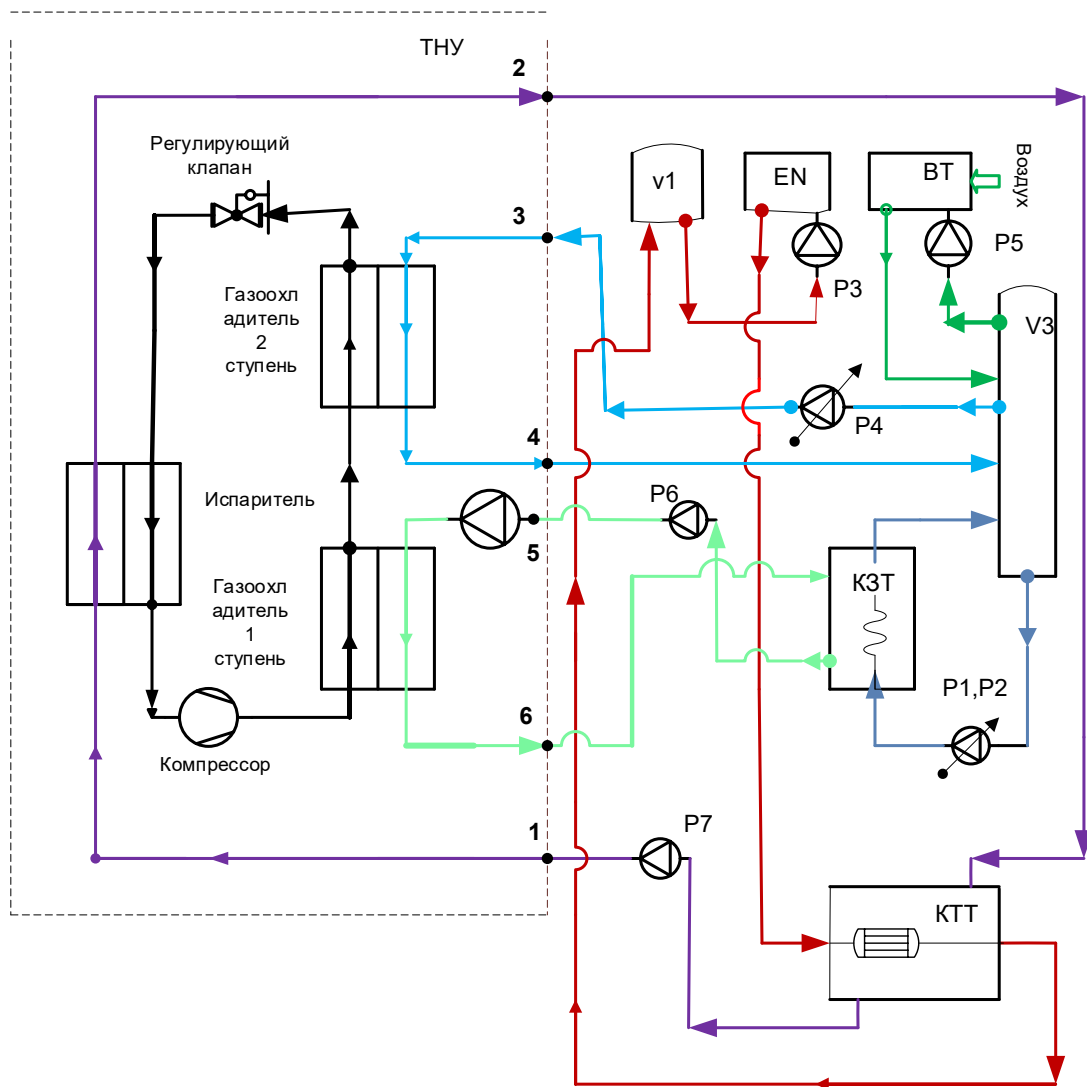
Ёмкость V3 является источником холодного теплоносителя, в данном случае воды, с температурой, равной температуре наружного воздуха. Эта температура поддерживается постоянной, благодаря непрерывной циркуляции воды через воздушный теплообменник с помощью насоса P5 повышенной производительности (контур выделен зелёным цветом). Так как производительность насоса P5 значительно превышает сумму производительностей насосов, которые используют холодную воду в других контурах, и постоянному интенсивному перемешиванию, температура в ёмкости поддерживается постоянной.

## Схема соединения ТНУ со стендом. Рис. 7.



- Контур V1 – P3 – EN – трубный коллектор кожухотрубного теплообменника (КТТ), (выделен красным цветом), имитирует энергию обратной сетевой воды централизованного отопления здания. Благодаря накопительной ёмкости тёплой воды V1, разница температур на входе и выходе проточного электронагревателя поддерживается минимальной, что способствует более точному поддержанию, заданных значений расхода и температуры воды в процессе эксперимента.
- Контур, **выход кожуха КТТ – P7 – испаритель ТН – вход кожуха КТТ**, (выделен фиолетовым цветом) имитирует заданное (регулируемое) количество энергии, поступающее в испаритель ТН, необходимое для эффективной работы ТН.

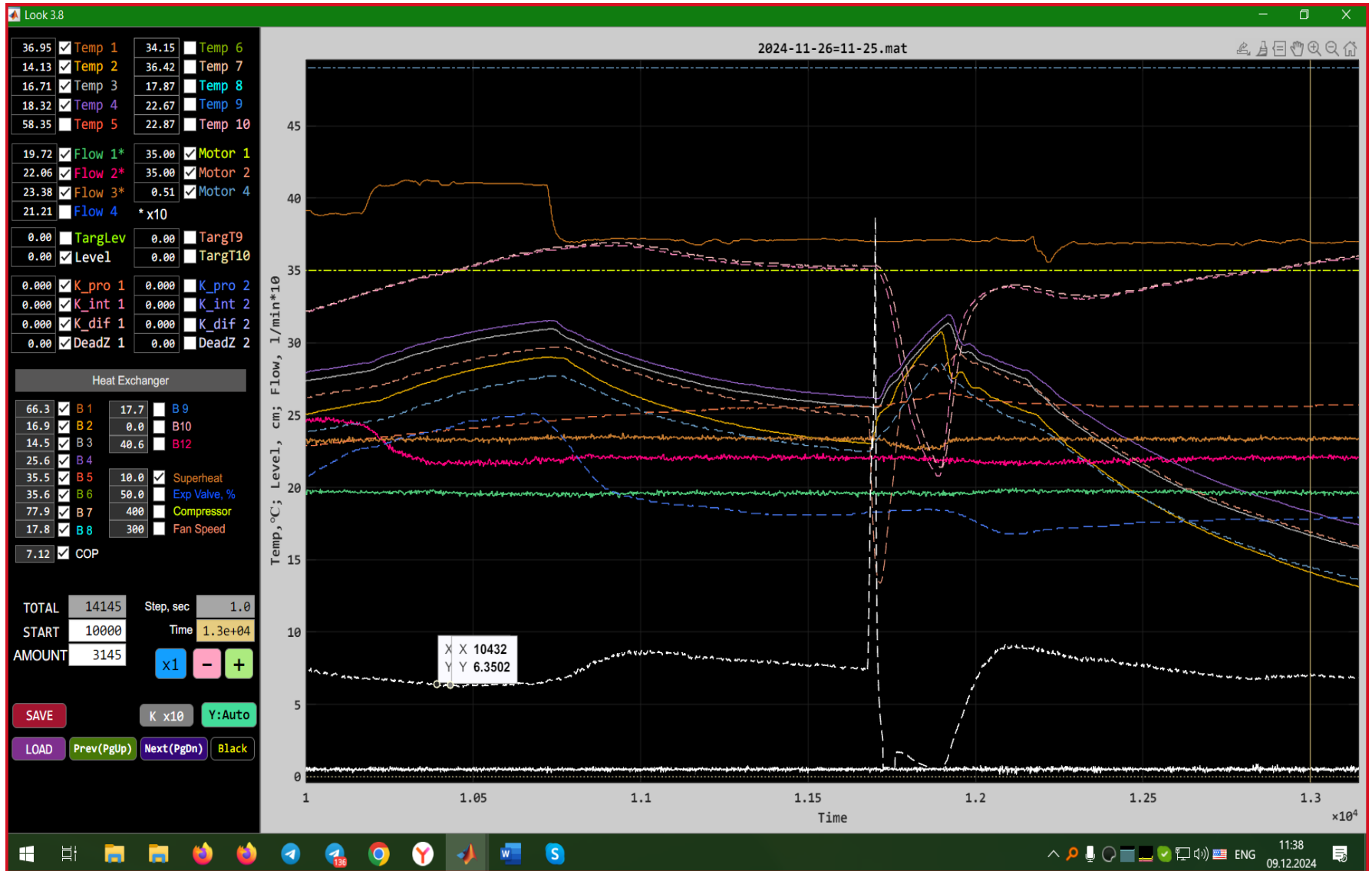
Схема соединения ТН со стендом. Рис. 7.



- Контура, выход кожина кожухозмеевикового теплообменника (КЗТ) – P6 – внутренний P5 – газоохладитель первой ступени ТН – вход кожина КЗТ (выделен светло-зелёным цветом), и выход из ёмкости V3 – частотно-регулируемые P1, P2 – вход змеевика КЗТ – выход змеевика – вход в V3, имитируют нагрузку ТН, т.е. здание. Регулирование параметров нагрузки ТН осуществляется изменением производительности насосов P1, P2, P6.
- Контур, выход из ёмкости V3 – P4 - газоохладитель второй ступени ТН – вход в V3 предназначен для оптимизации работы контура газоохладителя ТН с целью увеличения COP теплового насоса за счет повышения отдачи теплоты в этом контуре.



# Физическая модель системы отопления здания с интегрированным тепловым насосом на CO<sub>2</sub>. (Скриншот SCADA, демонстрация COP – белая линия)

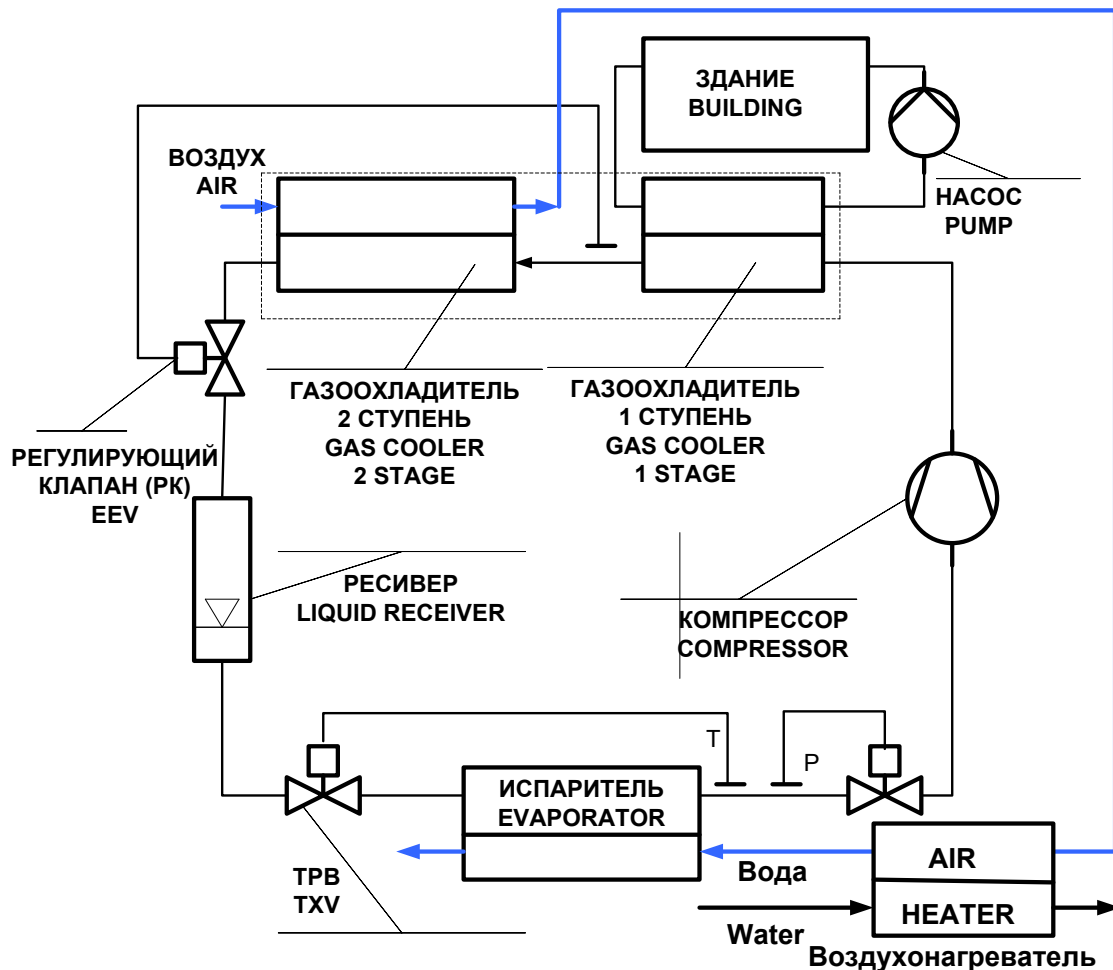


## **Физическая модель системы отопления здания с интегрированным тепловым насосом на CO<sub>2</sub>.**

В результате проведенных исследований на физической модели с модернизированным ТН, было установлено, что предложенная схема теплового насоса позволяет стабилизировать режим ТНУ за счет оптимального значения величины энтальпии на выходе второй ступени газоохладителя, что повлекло за собой увеличение COP ТН.

# Учитывая результаты исследований на физической модели, разработана схема ТН для отопления здания, интегрированная в систему централизованного теплоснабжения

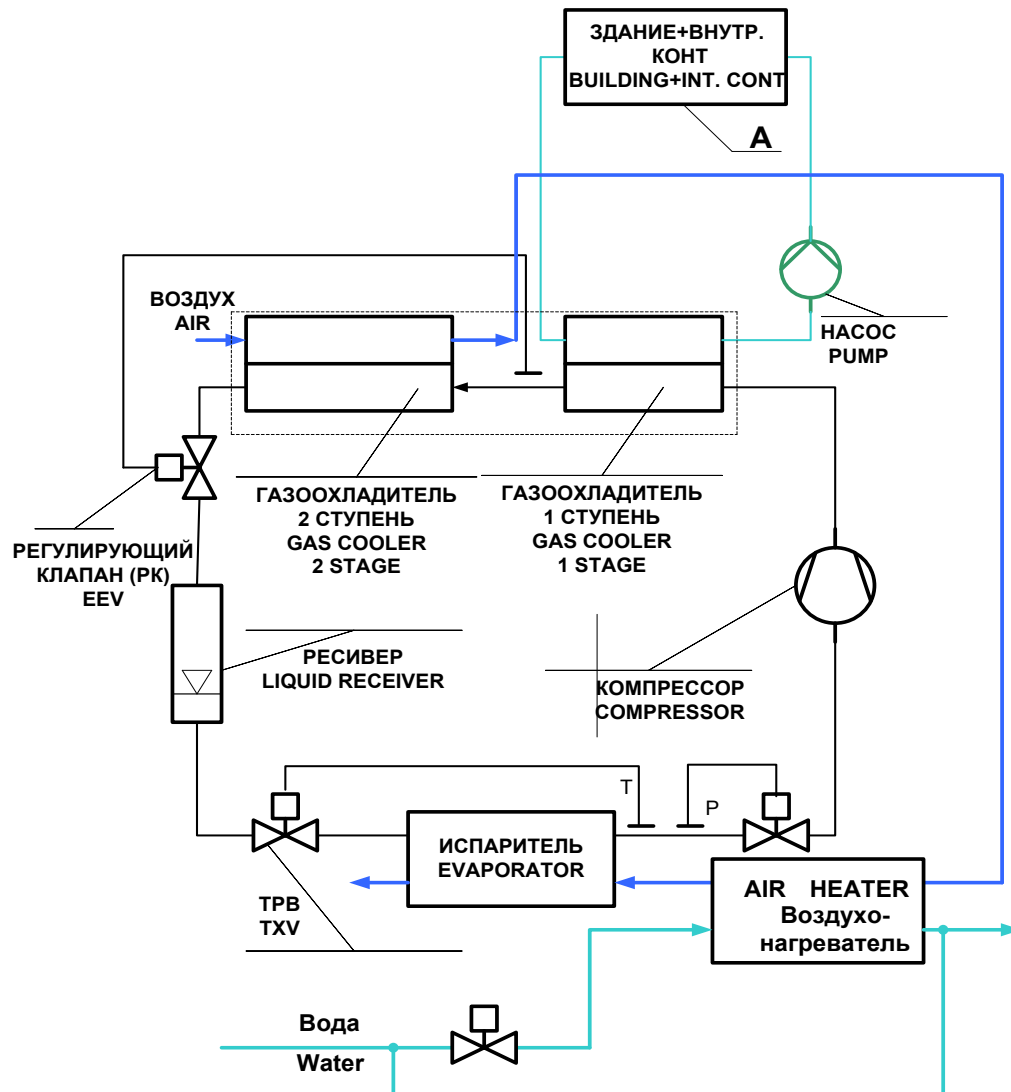
(подробное описание схемы приведено в выпуске журнала PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (64) 2024)



Разработана схема бивалентного теплового насоса (БТН), которая позволяет обеспечить как качественный, так и качественно-количественный законы регулирования теплового режима здания при повышенном COP теплового насоса, благодаря повышению отдачи теплоты в контуре газоохладителя.

## Схема ТН для отопления здания интегрированная в систему централизованного теплоснабжения (продолжение)

подробное описание схемы приведено в выпуске журнала PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 4 (64) 2024



Данная схема является продолжением первой схемы.

Разработаны законы регулирования теплового режима здания при повышении COP теплового насоса, благодаря рациональному выбору температурного графика регулирования.



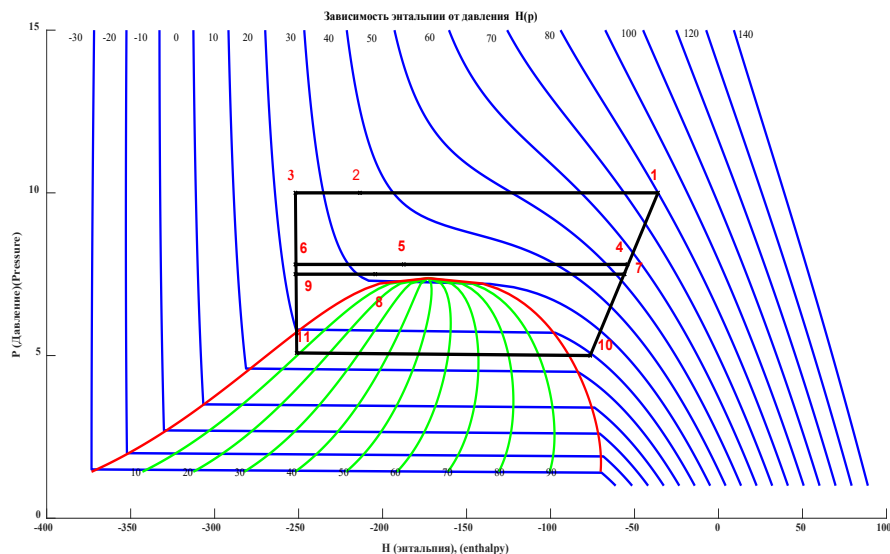
**Спасибо за внимание !**



## Термодинамические циклы теплового насоса для отдельных температур воздуха

На рис. приведены три цикла БТН при температурах наружного воздуха минус 16°C (тт. 1-2-3-11-10), 0°C (тт. 4-5-6-11-10), 8°C (тт. 7,8,9,11,10).

Приведенные циклы предназначены для работы с температурным графиком качественного регулирования теплового режима 75-30. Точки 10-11 соответствуют испарителю, 10-1,10-4, 10-7 – компрессору, 1-2, 4-5, 7-8 – первой ступени газоохладителя, 2-3, 5-6, 8-9 – второй ступени газоохладителя.



Перегрев испарителя предлагается регулировать за счет регулирования температуры воздуха, омывающего испаритель при заданной температуре обратной сетевой воды (ОСВ).

В схеме предусмотрено стабилизировать положение рабочих точек испарителя в цикле за счет: регулирования расхода ОСВ и наружного воздуха, а также за счет регулирования расхода воздуха, подаваемого на вторую ступень газоохладителя.