

Липецкий государственный технический университет
Физико-технологический факультет
Кафедра промышленной теплоэнергетики



Выпускная квалификационная работа
«Моделирование работы теплообменного аппарата узла
регенерации БКО ВРУ №4 ПАО “НЛМК”»

Выполнил: Нитченко К.А.
Студент группы ТЭ-14-1
Руководитель: Шарапов А.И.

Цель работы

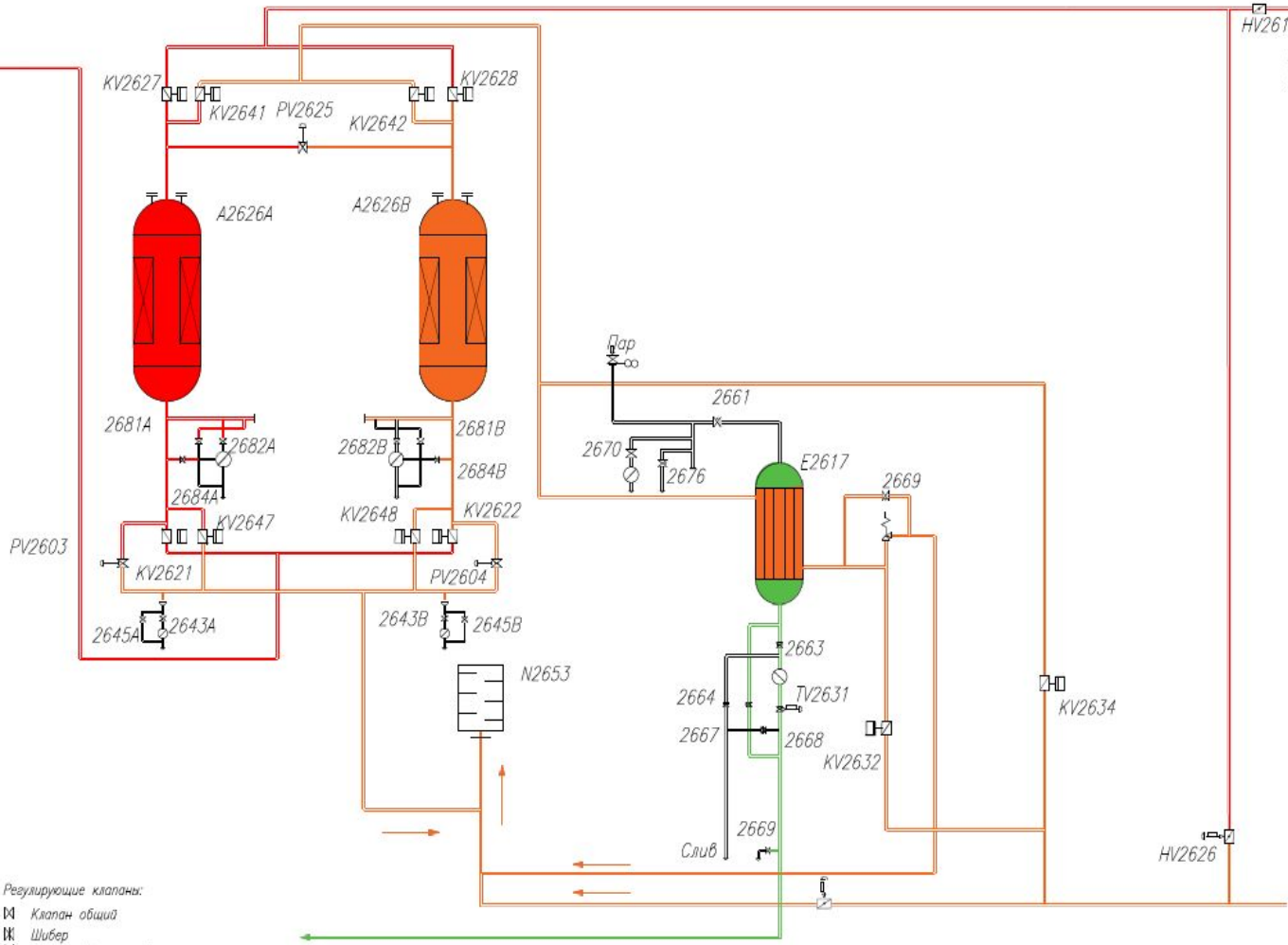


- Рассмотреть режим работы узла блока комплексной очистки ВРУ №4
- Разработка математической модели испарителя
- Сравнительный анализ режимов работы и выбор оптимального

ABO

HV2615
Воздух на разделение

— Вода, конденсат
— Воздух
— Отбросной азот



Название и условные обозначения оборудования:
 A2626B Адсорбер с молекулярным ситом
 A2626A Адсорбер с молекулярным ситом
 J3957 Эжектор
 E2617 Подогреватель регенерир. газа
 S8446 Фильтр побочного потока
 N2653 Шумоглушитель регенерирующего газа

Прочее:
 ○ Очковая заглушка открыта
 ○ Очковая заглушка закрыта
 ▬ Конец трубопровода с коллаком
 ▬ Конец трубопровода с фланцем
 |— Фильтр

Регулирующие клапаны:
 □ Клапан общий
 □ Шлибер
 □ Прокладной запорный клапан
 □ Регулирующий клапан

Датчики для измерения расхода:
 ||— Диафрагма
 □ Магнитно-индуктивный токомер
 □ Общее обозначение расходомера
 □ Датчик трубки скоростного напора

Арматура:
 □ Запорная арматура общего назначения
 □ Запорная задвижка
 □ Прокладной запорный клапан
 □ Запорный клапан
 □ Запорная арматура с определенным режимом регулирования
 □ Запорный клапан
 □ Обратная заслонка
 □ Арматура с фланцевым соединением

Исполнительные приводы:
 □ Мембрана с позиционером и дополнительным маховиком
 □ Мембрана
 □ Мембрана с позиционером
 □ Двигатель
 □ Поршень

Принципиальная схема работы узла блока комплексной очистки ВРУ «Linde»

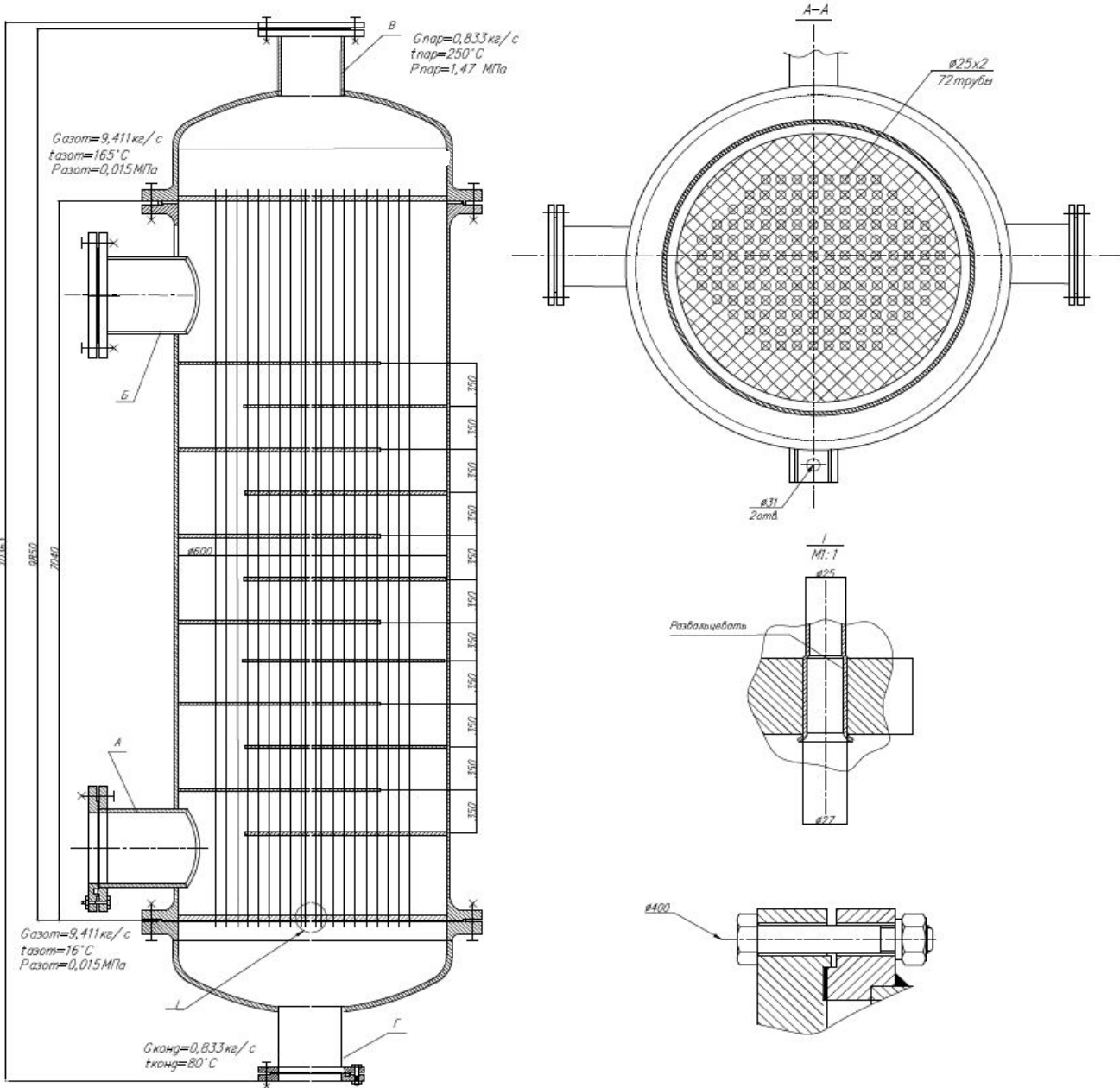


Таблица штуцеров

| Обозначения | Наименование | Кол. | Диаметр условный, мм | Давление условное, МПа |
|-------------|-----------------------|------|----------------------|------------------------|
| А | Вход отбросного азота | 1 | 300 | 1,5 |
| Б | Вход отбросного азота | 1 | 300 | 1,5 |
| В | Вход пара | 1 | 200 | 0,1 |
| Г | Выход конденсата | 1 | 200 | 0,1 |

Техническая характеристика

| Показатели | | Трубное пространство | Межтрубное пространство |
|---|-----------------|----------------------|-------------------------|
| Среда | Наименование | Пар-конденсат | Азот |
| | Токсичность | Нетоксична | Токсична |
| | Взрывоопасность | Невзрывоопасна | Невзрывоопасна |
| | Агрессивность | Неагрессивна | Неагрессивна |
| | Температура, °С | 80 (на входе) | 165 (на входе) |
| Рабочее давление, МПа | | 1,5 | 0,015 |
| Поверхность теплообмена, м ² | | 494,316 | |

Технические требования

- Аппарат подлежит действию пробной (испытательной) РВ.
- При изготовлении, испытании и поставке аппарата должны выполняться требования:
 - ГОСТ 12.2.003-74 "Оборудование производственное. Общие требования безопасности";
 - ОСТ 26-291-79 "Сварки и аппараты стальные сварные. Технические требования."
- Аппарат испытывать на прочность и герметичность гидравлически в вертикальном положении по давлению:
 - межтрубное пространство - 0,1 МПа;
 - трубное пространство - 3 МПа.
- Сварные соединения должны соответствовать требованиям ОСТ 26-01-82-77 "Сварка в химическом машиностроении".
- Сварные швы в объеме 100% контролировать рентгеновским методом.
- Размеры для справок.
- Чертеж разработан на основании ГОСТ 15122-79.

Многоходовой теплообменный аппарат и его основные элементы

Тепловой баланс азотного испарителя.

Греющий теплоноситель

Участок FI

$$Q_I = D_{\text{пар}} \cdot (h_{\text{п.п}} - h_s) \quad (1)$$

Участок FII

$$Q_{II} = D_{\text{пар}} \cdot r \quad (2)$$

r - скрытая теплота парообразования [кДж/кг]

Участок FIII

$$Q_{III} = D_{\text{пар}} \cdot c_{\text{конд}} \cdot (T_s - T_{\text{конд}}) \quad (3)$$

$$\Sigma Q = Q_I + Q_{II} + Q_{III} \quad (4)$$

Нагреваемый теплоноситель

Участок FI

$$Q_I = D_{N_2} \cdot c_{N_2} \cdot (T_1 - T'_{N_2}) \quad (5)$$

Участок FII

$$Q_{II} = D_{N_2} \cdot c_{N_2} \cdot (T_2 - T_1) \quad (6)$$

Участок FIII

$$Q_{III} = D_{N_2} \cdot c_{N_2} \cdot (T''_{N_2} - T_2) \quad (7)$$

$$\Sigma Q_{N_2} = Q_I + Q_{II} + Q_{III} \quad (8)$$



Исходные данные для моделирования азотного испарителя



Режим №1

| ПАР | D кг/час | D кг/с | P, кгс/см ² | P, Мпа | t ₁ , °C | t _s , °C | t ₂ , °C | АЗОТ | D м ³ /час | D кг/с | P, кгс/см ² | P, Мпа | t ₂ , °C |
|--------------|------------|--------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------|---------------------|
| | 3000 | 0,833 | 15 | 1,47 | 250 | 200,5231 | 80 | | 31000 | 9,411 | 0,153 | 0,015 | 165 |
| Ипар, КДж/кг | Is, КДж/кг | C, КДж/кг·°C | w(I), м/с | ρ(пар), кг/м ³ | w(II), м/с | r, КДж/кг | w(I), м/с | w(II), м/с | w(III), м/с | t ₁ , °C | | | |
| 2920,377 | 2791,702 | 4,266 | 30 | 11,164 | 0,2 | 1936,921 | 16 | 9 | 6 | 16 | | | |

Режим №2

| ПАР | D кг/час | D кг/с | P, кгс/см ² | P, Мпа | t ₁ , °C | t _s , °C | t ₂ , °C | АЗОТ | D м ³ /час | D кг/с | P, кгс/см ² | P, Мпа | t ₂ , °C |
|--------------|------------|--------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------|---------------------|
| | 3000 | 0,833 | 10 | 0,98 | 200 | 183,3216 | 50 | | 31000 | 9,411 | 0,12 | 0,012 | 170 |
| Ипар, КДж/кг | Is, КДж/кг | C, КДж/кг·°C | w(I), м/с | ρ(пар), кг/м ³ | w(II), м/с | r, КДж/кг | w(I), м/с | w(II), м/с | w(III), м/с | t ₁ , °C | | | |
| 2822,220 | 2779,788 | 4,266 | 30 | 7,898 | 0,2 | 2001,965 | 16 | 6 | 4 | 30 | | | |

Режим ПАО "НЛМК"

| ПАР | D кг/час | D кг/с | P, кгс/см ² | P, Мпа | t ₁ , °C | t _s , °C | t ₂ , °C | АЗОТ | D м ³ /час | D кг/с | P, кгс/см ² | P, Мпа | t ₂ , °C |
|--------------|------------|--------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------|---------------------|
| | 3000 | 0,833 | 13 | 1,274 | 230 | 194,2352 | 60 | | 31000 | 9,411 | 0,16 | 0,016 | 165 |
| Ипар, КДж/кг | Is, КДж/кг | C, КДж/кг·°C | w(I), м/с | ρ(пар), кг/м ³ | w(II), м/с | r, КДж/кг | w(I), м/с | w(II), м/с | w(III), м/с | t ₁ , °C | | | |
| 2880,445 | 2787,876 | 4,266 | 30 | 9,937 | 0,2 | 1961,395 | 16 | 7 | 4 | 30 | | | |

Расчет

| | | |
|---|---|---|
| Q(I) = 107,229 кВт | Q(II) = 1614,101 кВт | Q(III) = 428,409 кВт |
| <i>Трубное пространство</i> | | |
| Участок(I) | Участок(II) | Участок(III) |
| а) Критерий Рейнольдса | Критерий Рейнольдса | а) Критерий Рейнольдса |
| Re = 262500 | Re = 26923,077 | Re = 47857,794 |
| б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение |
| Nu = 0,021·Re ^{0,8} ·Pr ^{0,43} | Nu = 0,021·Re ^{0,8} ·Pr ^{0,43} | Nu = 0,021·Re ^{0,8} ·Pr ^{0,43} |
| Nu = 454,488 | Nu = 70,751 | Nu = 129,373 |
| в) Коэффициент теплопередачи | коэффициент теплопередачи промежуточный | в) Коэффициент теплопередачи |
| $\alpha^*(I) = Nu \cdot \lambda_{\text{пар}} / d_{\text{вн}}$ | $\alpha' = Nu \cdot \lambda_{\text{конд}} / d_{\text{вн}}$ | $\alpha^*(III) = Nu \cdot \lambda_{\text{пар}} / d_{\text{вн}}$ |
| $\alpha^*(I) = \mathbf{844,050}$ Вт/м ² ·К | $\alpha' = \mathbf{2238,751}$ | $\alpha^*(III) = \mathbf{4208,934}$ Вт/м ² ·К |
| г) Коэффициент теплопередачи | $\alpha^*(II) = 7 \cdot \alpha' \cdot (\nu_{\text{пар}} / \nu_{\text{жидк}} - 1)^{0,5}$ | |
| | $\alpha^*(II) = \mathbf{15567,740}$ | |
| <i>Межтрубное пространство</i> | | |
| Участок(I) | Участок(II) | Участок(III) |
| а) Критерий Рейнольдса | а) Критерий Рейнольдса | а) Критерий Рейнольдса |
| Re = 15625,000 | Re = 16328,012 | Re = 14018,692 |
| б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение |
| Nu = 0,41·Re ^{0,6} ·Pr ^{0,36} · ξ | Nu = 0,41·Re ^{0,6} ·Pr ^{0,36} · ξ | Nu = 0,41·Re ^{0,6} ·Pr ^{0,36} · ξ |
| Nu = 69,922 | Nu = 57,407 | Nu = 67,570 |
| в) Коэффициент теплоотдачи | в) Коэффициент теплоотдачи | в) Коэффициент теплоотдачи |
| $\alpha(I) = Nu \cdot \lambda_{\text{пар}} / d_{\text{эк}}$ | $\alpha(II) = Nu \cdot \lambda_{\text{пар}} / d_{\text{вн}}$ | $\alpha(III) = Nu \cdot \lambda_{\text{пар}} / d_{\text{вн}}$ |
| $\alpha(I) = \mathbf{88,102}$ Вт/м ² ·К | $\alpha(II) = \mathbf{55,799}$ | $\alpha(III) = \mathbf{53,164}$ Вт/м ² ·К |
| k(I) = 65,807 Вт/м ² ·К | <u>коэффициент теплопередачи</u> | k(III) = 46,452 Вт/м ² ·К |
| F(I) = 25,631 м ² | <u>площадь поверхности теплообмена</u> | F(III) = 82,236 м ² |
| h(I) = 0,357 м | <u>высота каждой зоны аппарата</u> | h(III) = 1,309 м |
| k(II) = 48,941 Вт/м ² ·К | F(II) = 386,450 м ² | |
| | h(II) = 5,377 м | |

Результаты расчета программой основных характеристик испарителя при режиме работы №1

Расчет

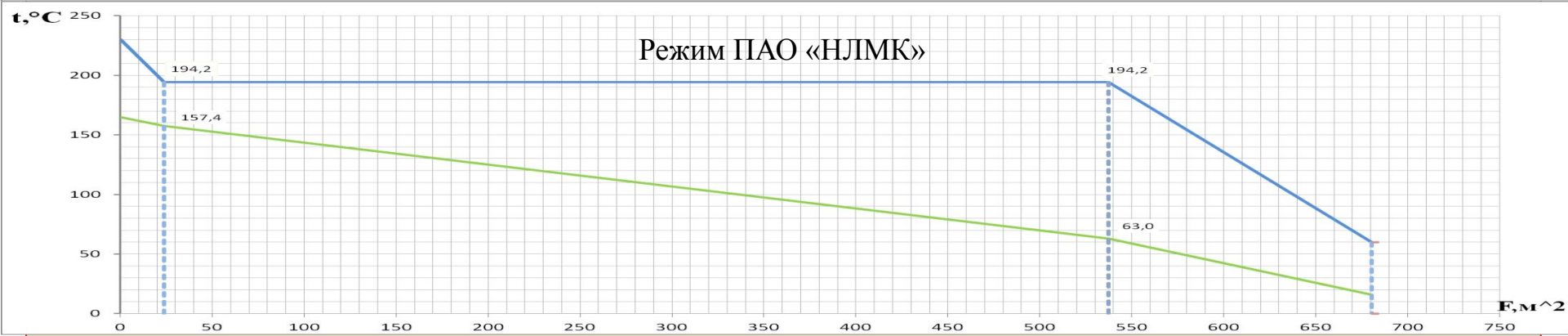
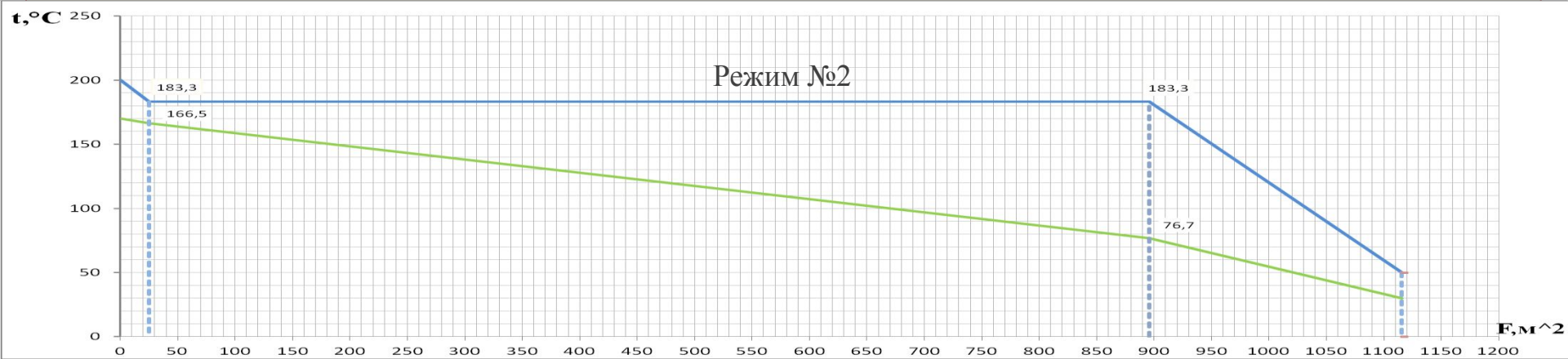
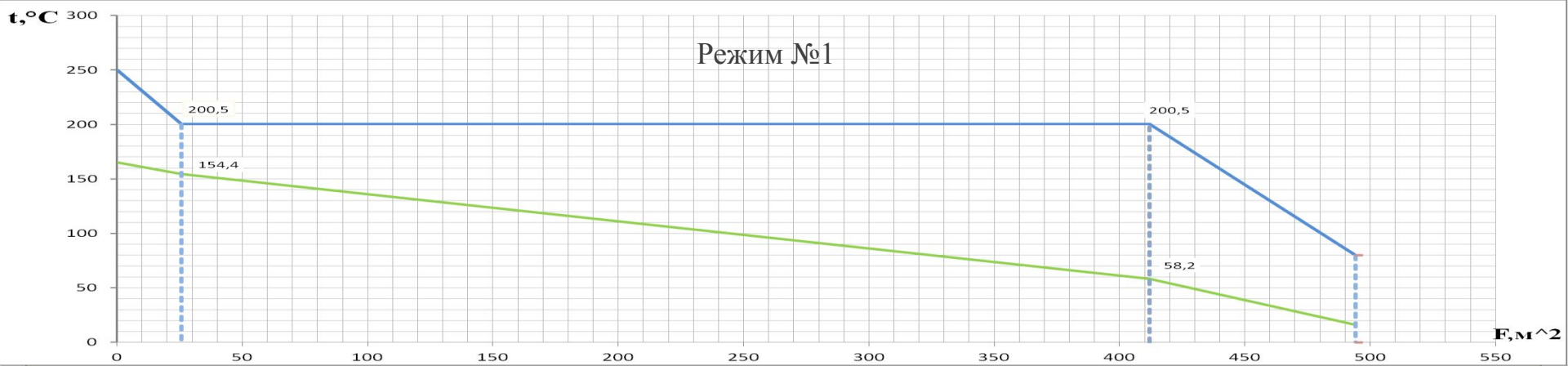
| | | |
|---|---|--|
| Q(I) = 35,360 кВт | Q(II) = 1668,305 кВт | Q(III) = 473,903 кВт |
| <i>Трубное пространство</i> | | |
| Участок(I) а) Критерий Рейнольдса | Участок(II) Критерий Рейнольдса | Участок(III) а) Критерий Рейнольдса |
| Re = 262500 | Re = 26923,077 | Re = 47857,794 |
| б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение |
| Nu = $0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$ | Nu = $0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$ | Nu = $0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$ |
| Nu = 454,488 | Nu = 70,751 | Nu = 129,373 |
| в) Коэффициент теплопередачи | коэффициент теплопередачи промежуточный | в) Коэффициент теплопередачи |
| $\alpha^*(I) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ | $\alpha' = Nu \cdot \lambda_{конд} / d_{вн}$ | $\alpha^*(III) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ |
| $\alpha^*(I) = 844,050 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ | $\alpha' = 2238,751$ | $\alpha^*(III) = 4208,934 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ |
| | г) Коэффициент теплопередачи | |
| | $\alpha^*(II) = 7 \cdot \alpha' \cdot (v_{пар} / v_{жидк} - 1)^{0,5}$ | |
| | $\alpha^*(II) = 18869,748$ | |
| <i>Межтрубное пространство</i> | | |
| Участок(I) а) Критерий Рейнольдса | Участок(II) а) Критерий Рейнольдса | Участок(III) а) Критерий Рейнольдса |
| Re = 13392,857 | Re = 10885,341 | Re = 9345,794 |
| б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение |
| Nu = $0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \xi$ | Nu = $0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \xi$ | Nu = $0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \xi$ |
| Nu = 63,745 | Nu = 45,010 | Nu = 52,979 |
| в) Коэффициент теплоотдачи | в) Коэффициент теплоотдачи | в) Коэффициент теплоотдачи |
| $\alpha(I) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{эк}$ | $\alpha(II) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ | $\alpha(III) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ |
| $\alpha(I) = 80,319 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ | $\alpha(II) = 43,750$ | $\alpha(III) = 41,684 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ |
| $k(I) = 61,365 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ | $k(II) = 39,439 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ | $k(III) = 37,442 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ |
| $F(I) = 25,306 \text{ м}^2$ | $F(II) = 870,188 \text{ м}^2$ | $F(III) = 219,669 \text{ м}^2$ |
| $h(I) = 0,249 \text{ м}$ | $h(II) = 8,565 \text{ м}$ | $h(III) = 2,407 \text{ м}$ |

Результаты расчета программой основных характеристик испарителя при режиме работы №2

Расчет

| Q(I) = 77,141 кВт | Q(II) = 1634,496 кВт | Q(III) = 477,150 кВт |
|--|---|--|
| <i>Трубное пространство</i> | | |
| Участок(I) а) Критерий Рейнольдса | Участок(II) Критерий Рейнольдса | Участок(III) а) Критерий Рейнольдса |
| Re = 262500 | Re = 26923,077 | Re = 47857,794 |
| б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение |
| Nu = $0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$ | Nu = $0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$ | Nu = $0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}$ |
| Nu = 454,488 | Nu = 70,751 | Nu = 129,373 |
| в) Коэффициент теплопередачи | Коэффициент теплопередачи промежуточный | в) Коэффициент теплопередачи |
| $\alpha^*(I) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ | $\alpha' = Nu \cdot \lambda_{конд} / d_{вн}$ | $\alpha^*(III) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ |
| $\alpha^*(I) = 844,050 Вт/м^2 \cdot К$ | $\alpha' = 2238,751$ | $\alpha^*(III) = 4208,934 Вт/м^2 \cdot К$ |
| | г) Коэффициент теплопередачи | |
| | $\alpha^*(II) = 0,7 \cdot \alpha' \cdot (v_{пар} / v_{жидк} - 1)^{0,5}$ | |
| | $\alpha^*(II) = 16682,149$ | |
| <i>Межтрубное пространство</i> | | |
| Участок(I) а) Критерий Рейнольдса | Участок(II) а) Критерий Рейнольдса | Участок(III) а) Критерий Рейнольдса |
| Re = 15625,000 | Re = 12699,565 | Re = 9345,794 |
| б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение | б) Критериальное уравнение |
| Nu = $0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \xi$ | Nu = $0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \xi$ | Nu = $0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \xi$ |
| Nu = 69,922 | Nu = 49,372 | Nu = 52,979 |
| в) Коэффициент теплоотдачи | в) Коэффициент теплоотдачи | в) Коэффициент теплоотдачи |
| $\alpha(I) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{эк}$ | $\alpha(II) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ | $\alpha(III) = Nu \cdot \lambda_{пар} / d_{вн}$ |
| $\alpha(I) = 88,102 Вт/м^2 \cdot К$ | $\alpha(II) = 47,989$ | $\alpha(III) = 41,684 Вт/м^2 \cdot К$ |
| $k(I) = 65,807 Вт/м^2 \cdot К$ | <u>коэффициент теплопередачи</u> $k(II) = 42,837 Вт/м^2 \cdot К$ | $k(III) = 37,442 Вт/м^2 \cdot К$ |
| $F(I) = 23,636 м^2$ | <u>площадь поверхности теплообмена</u> $F(II) = 513,605 м^2$ | $F(III) = 143,418 м^2$ |
| $h(I) = 0,292 м$ | <u>высота каждой зоны аппарата</u> $h(II) = 6,352 м$ | $h(III) = 1,975 м$ |

Результаты расчета программой основных характеристик испарителя при режиме работы ПАО «НЛМК»



Характеристика изменения температур рабочих сред

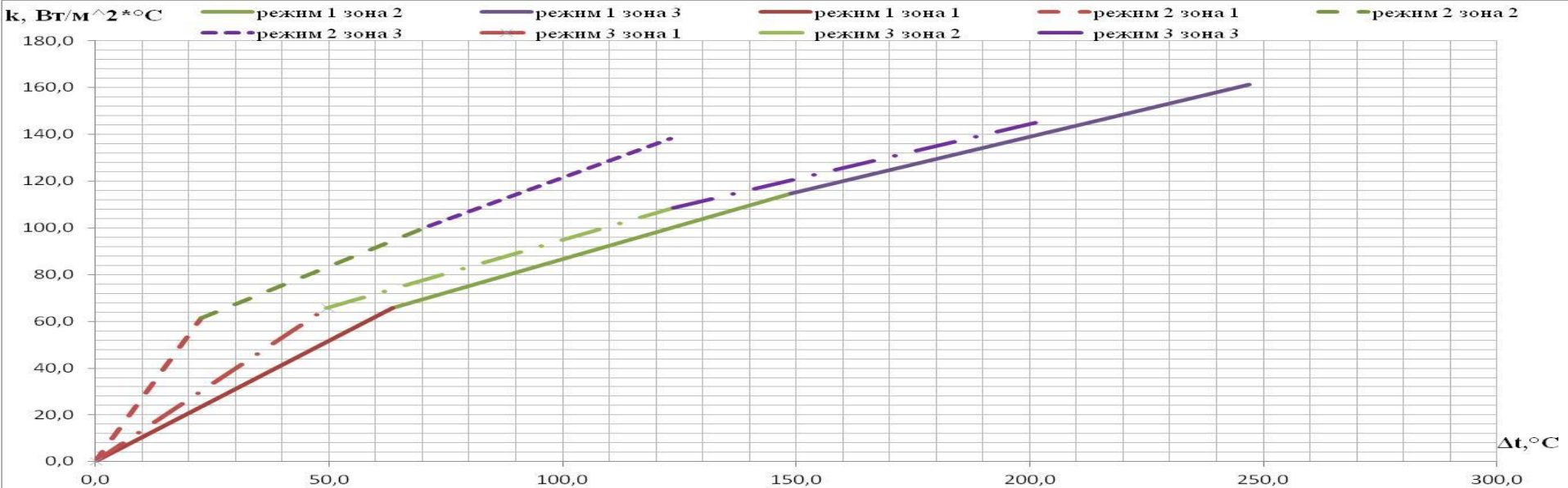


График зависимости коэффициента теплопередачи от логарифмического напора

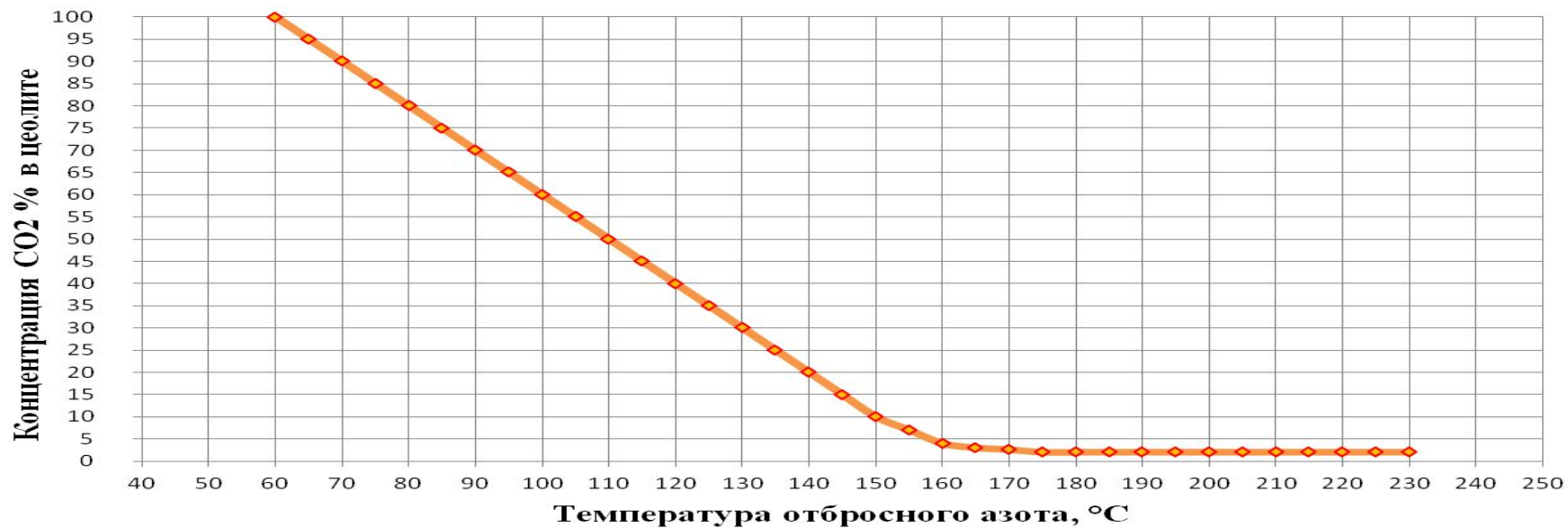
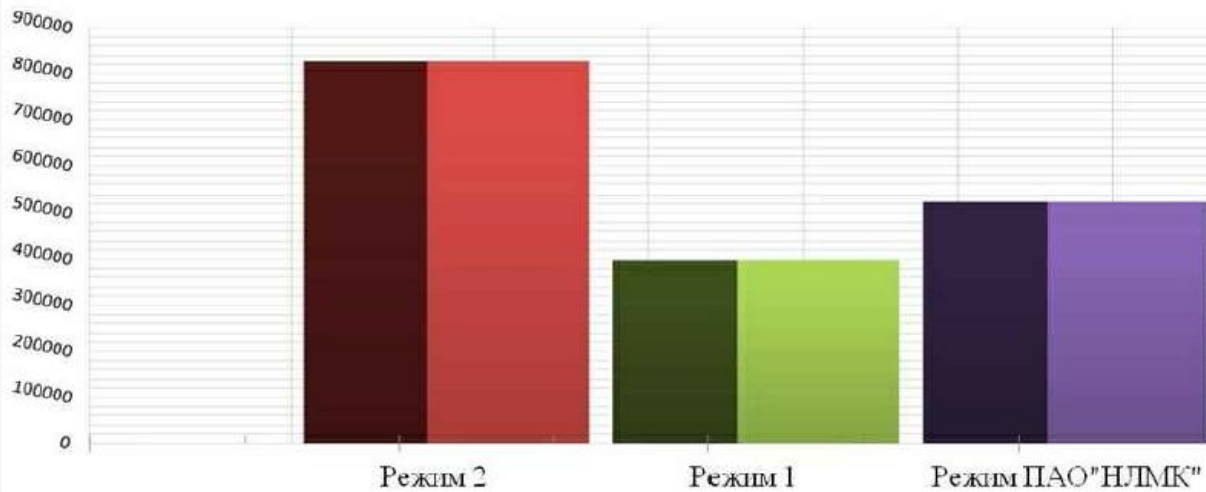


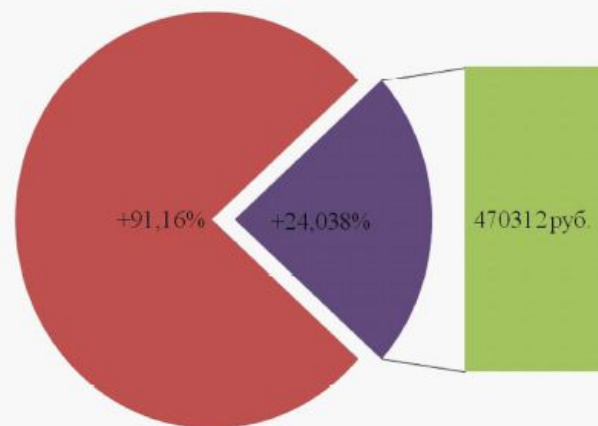
График зависимости остаточной концентрации углекислоты от температуры азота

Сравнительный анализ приведенных затрат

Ц,руб



Процентное соотношение выгоды



| Режим | Металлоемкость, кв | Эксплуатационные затраты, тыс.руб. | Капитальные затраты, тыс.руб. | Приведенные затраты, тыс.руб. |
|-------|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 578,343 | 123306 | 347006 | 470312 |
| 2 | 1307,550 | 114502 | 784528 | 899030 |
| НЛМК | 797,731 | 104726 | 478638 | 583364 |

Выводы



- Были произведены расчеты режимов работы азотного испарителя E2617, в результате которых мы определили основные термодинамические и конструктивные параметры. В результате технического и экономического анализа было доказано, что первый режим более эффективен для технологического производства.