

ОЦЕНКА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С УЧЁТОМ ПОКАЗАТЕЛЯ NTU

Тремкина О.В.

Угланов Д.А.

Шихалев В.И.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086,
Российская Федерация

tereshchenko.ov@ssau.ru

В данной работе проведена оценка рабочих характеристик теплообменных аппаратов и определено влияние различных факторов на массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов энергетических установок и комплексов. Установлены закономерности влияния температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов на рабочие характеристики теплообменных аппаратов низкотемпературных энергетических установок.

Ключевые слова: низкотемпературная энергетическая установка; теплообменный аппарат; показатель NTU; массогабаритные характеристики

1 Введение

При проектировании теплообменных аппаратов (ТО) необходимо провести оценку их массогабаритных и рабочих характеристик для заданных условий работы. Проектирование и расчёт ТО для низкотемпературных энергетических установок (НЭУ) требует продолжительного количества времени и является довольно сложной и комплексной задачей. В связи с этим актуальными становятся вопросы совершенствования и повышения точности методов проектирования и расчёта ТО.

В данной работе предлагается проводить предпроектную оценку рабочих характеристик ТО с учётом показателя NTU (number of transfer units) [1]. Показатель NTU используется при проведении анализа тепло- и массообмена в ТО. Использование показателя NTU позволяет установить зависимость между характеристиками тепло-, массообмена и геометрическими, физическими, а также эксплуатационными характеристиками ТО [2].

В работах [3], [4] был ранее рассмотрен низкотемпературный паросиловой цикл Ренкина, использующий низкопотенциальную энергию (НЭ) криопродукта (ри-

сунок 1 [4]) и разработана методика определения характеристик цикла НЭУ, учитывающая природу рабочего тела, верхний и нижний уровни температур, необратимость процесса передачи теплоты (температурные напоры между источником и рабочим телом), оптимизацию поверхностей теплопередачи, расход криопродукта.

Разработка методических подходов и конкретных расчётных методик обычно основывается на классических методах энергетических балансов и КПД, а также эксергетическом методе [3]. В данной работе представлено уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ, которое заключается в использовании оценки рабочих характеристик теплообменных аппаратов с учётом показателя NTU, показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел k_F и введении расходного коэффициента Z_G [1].

2 Уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ

Показатель NTU учитывает коэффициент теплопередачи, площадь поверхности теплообмена, расход и теплоёмкость рабо-

чего вещества, а также геометрические, конструктивные параметры теплообменных аппаратов и, как следствие, массогабаритные характеристики.

Объектом исследования выбран теплообменный аппарат, входящий в состав паросиловой низкотемпературной энергетической установки, в которой в качестве рабочего тела используется сжиженный природный газ. Было проведено расчётное исследование характеристик теплообменных аппаратов при изменении температурного напора Δt_r в диапазоне от 0 до 30 К, нижнего температурного уровня T_K – от 90 до 180 К и расхода рабочего тела – от 1 до 5 кг/с.

Разработан алгоритм (1)–(17) получения формулы показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел $(k_r F_r)_{\text{реал}}$, учитывающей в том числе и относительную величину коэффициента теплоёмкости. Алгоритм основан на фундаментальных работах известных учёных [5–9] и авторских разработках [1, 10].

Среднеарифметический температурный напор определяется по формуле (1).

$$\Delta t_{cp} = \frac{((T_r + \Delta t_r) - T_K) - (T_r - \frac{T_r + T_K}{2})}{\ln(\frac{(T_r + \Delta t_r) - T_K}{T_r - \frac{T_r + T_K}{2}})}, \quad (1)$$

где T_r – верхний температурный уровень, К; T_K – нижний температурный уровень, К; Δt_r – температурный напор, К.

Зная среднеарифметический температурный напор, можно определить по формуле (2) теоретический показатель влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел [1, 5].

$$(k_r F_r)_{\text{теор}} = \frac{C_{pPT} \cdot (T_r - T_K) + r_{PT}}{\Delta t_{cp}}, \quad (2)$$

где C_{pPT} – изобарная теплоёмкость рабочего тела, Дж/кг·К; r_{PT} – удельная теплота парообразования рабочего тела, Дж/кг.

Мощность тепловой машины, с одной стороны, определяется через параметры воздуха по формуле (3), с другой стороны, определяется через параметры рабочего вещества по формуле (4).

$$W = C_{pB} \cdot G_B \cdot \Delta T_B = C_{pB} \cdot G_B (T_r + \Delta t_r - \frac{T_r + T_K}{2}); \quad (3)$$

$$W = G_{PT} (C_{pPT} \cdot \Delta T_{PT} + r_{PT}) = G_{PT} (C_{pPT} \cdot (T_r - T_K) + r_{PT}), \quad (4)$$

где G_{PT} – расход рабочего тела, кг/с; G_B – расход воздуха, кг/с; C_{pB} – изобарная теплоёмкость воздуха, Дж/кг·К; ΔT_B – степень нагрева воздуха в теплообменном аппарате, К.

С учётом формул (3) и (4) максимальный коэффициент теплоёмкости вычисляется по формуле (5).

$$C_{\max} = G_B \cdot C_{pB} = \frac{G_{PT} (C_{pPT} \cdot (T_r - T_K) + r_{PT})}{T_r + \Delta t_r - \frac{T_r + T_K}{2}}. \quad (5)$$

Минимальный коэффициент теплоёмкости определяется по формуле (6).

$$C_{\min} = G_{PT} \cdot C_{pPT}. \quad (6)$$

$$NTU = \frac{(k_r F_r)_{\text{теор}}}{C_{\min}}. \quad (7)$$

На рисунках 1–4 представлены зависимости показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при разных температурных напорах Δt_r для расходов рабочего тела от 1 до 5 кг/с.

Зависимости, представленные на рисунках 1–4, показывают, что с увеличением расхода рабочего тела, температурного напора Δt_r и низшей температуры рабочего тела уменьшается показатель NTU, из чего можно сделать вывод, что при увеличении расхода рабочего тела, температурного напора Δt_r и низшей температуры рабочего тела снижается эффективность и увеличи-

ваются массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов.

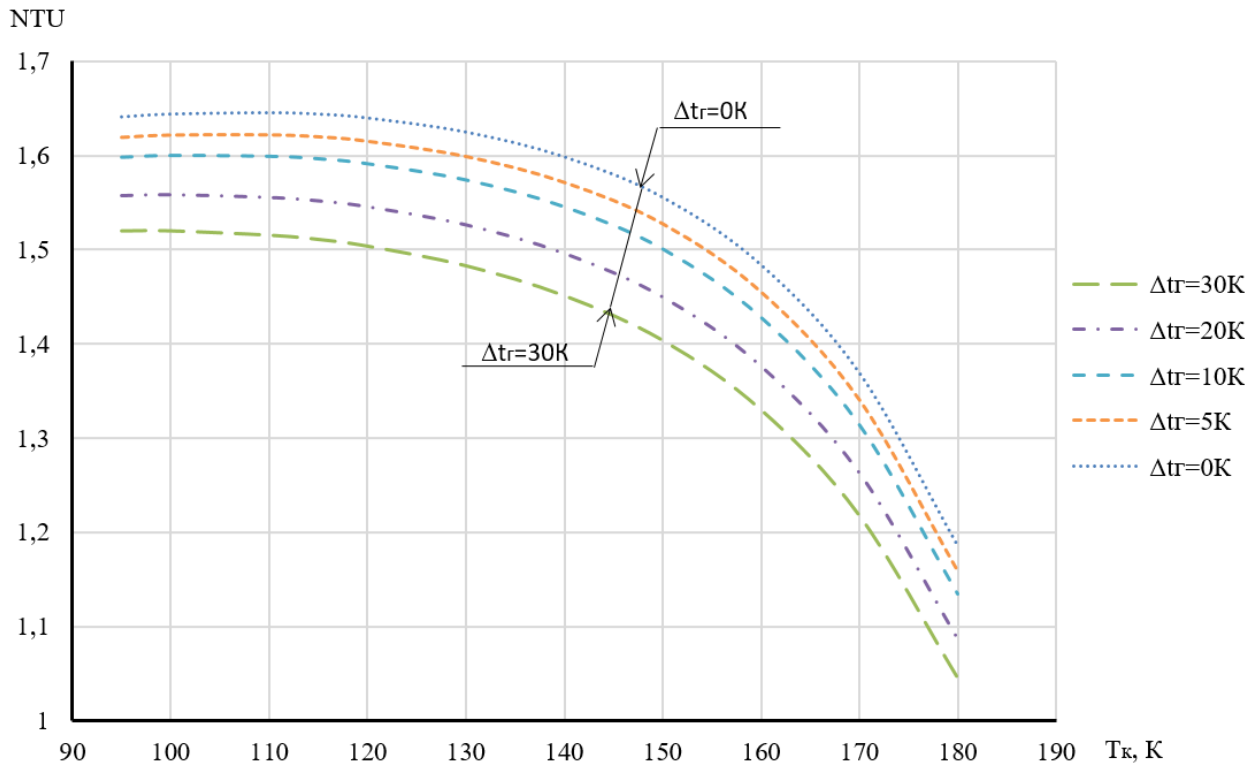


Рисунок 1. Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 K для расхода рабочего тела от 1 до 2 кг/с

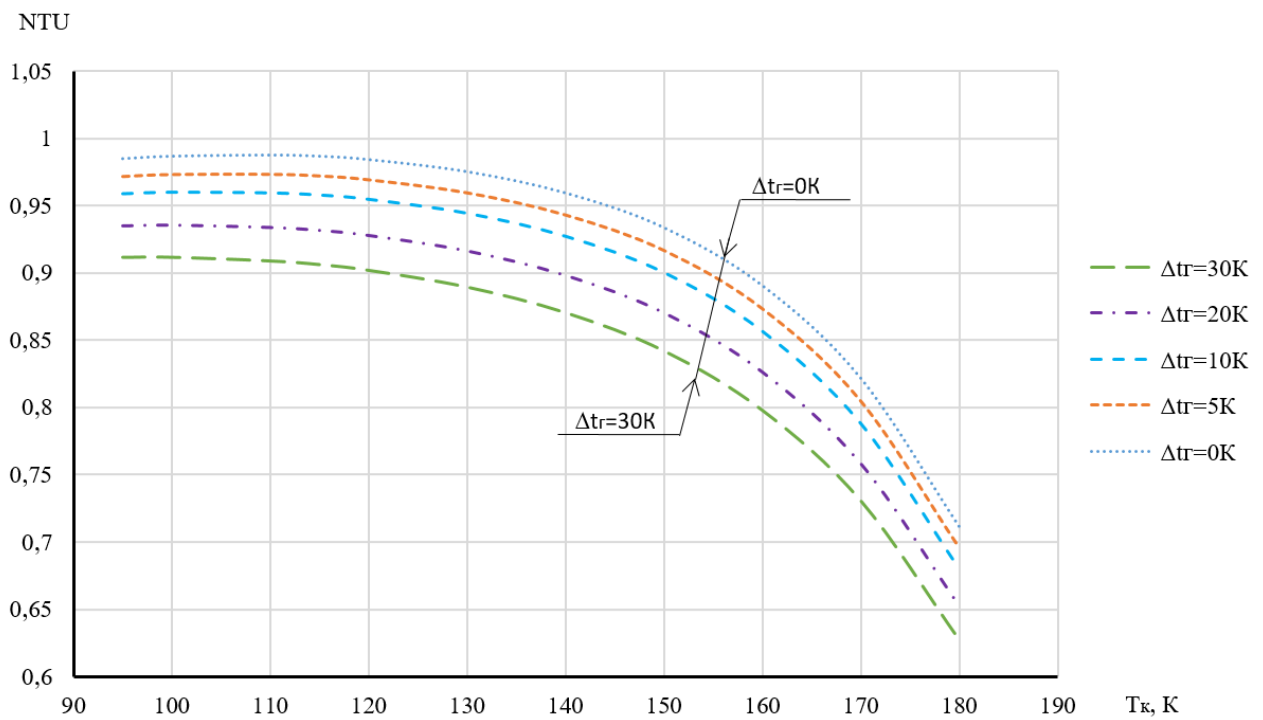


Рисунок 2. Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 K для расхода рабочего тела от 2 до 3 кг/с

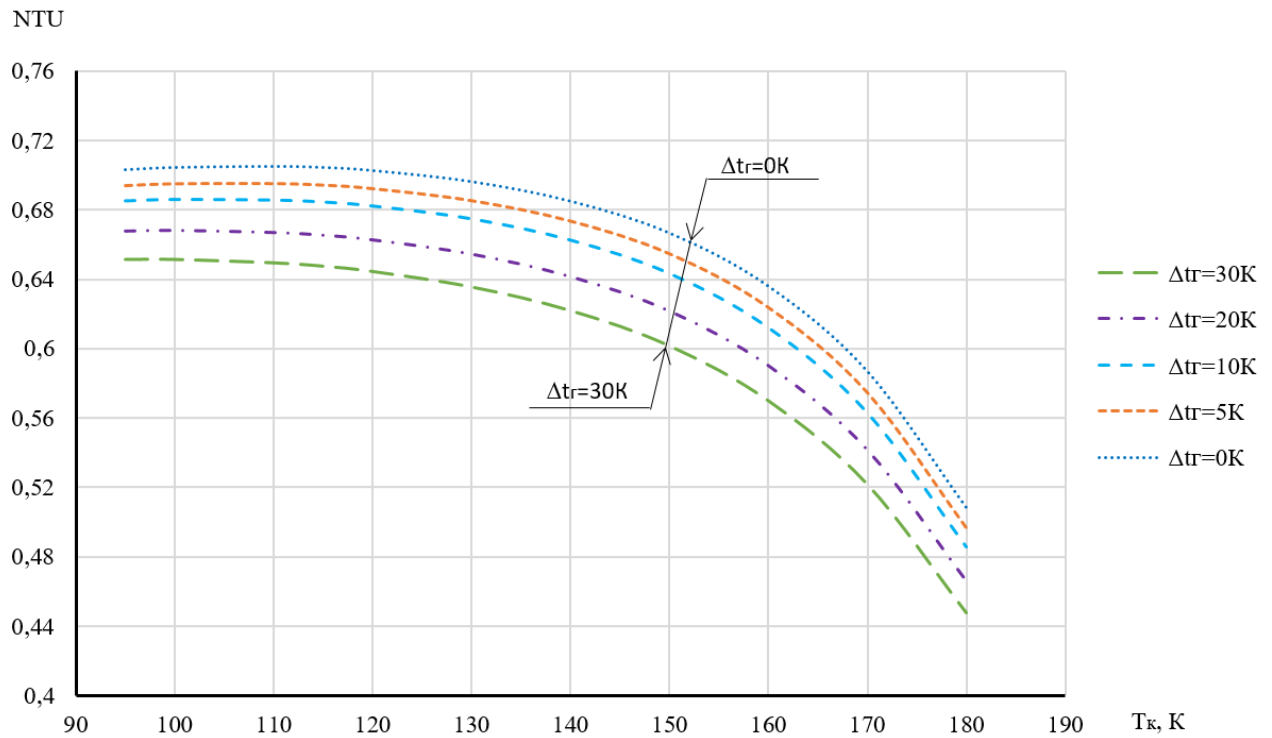


Рисунок 3. Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 K для расхода рабочего тела от 3 до 4 кг/с

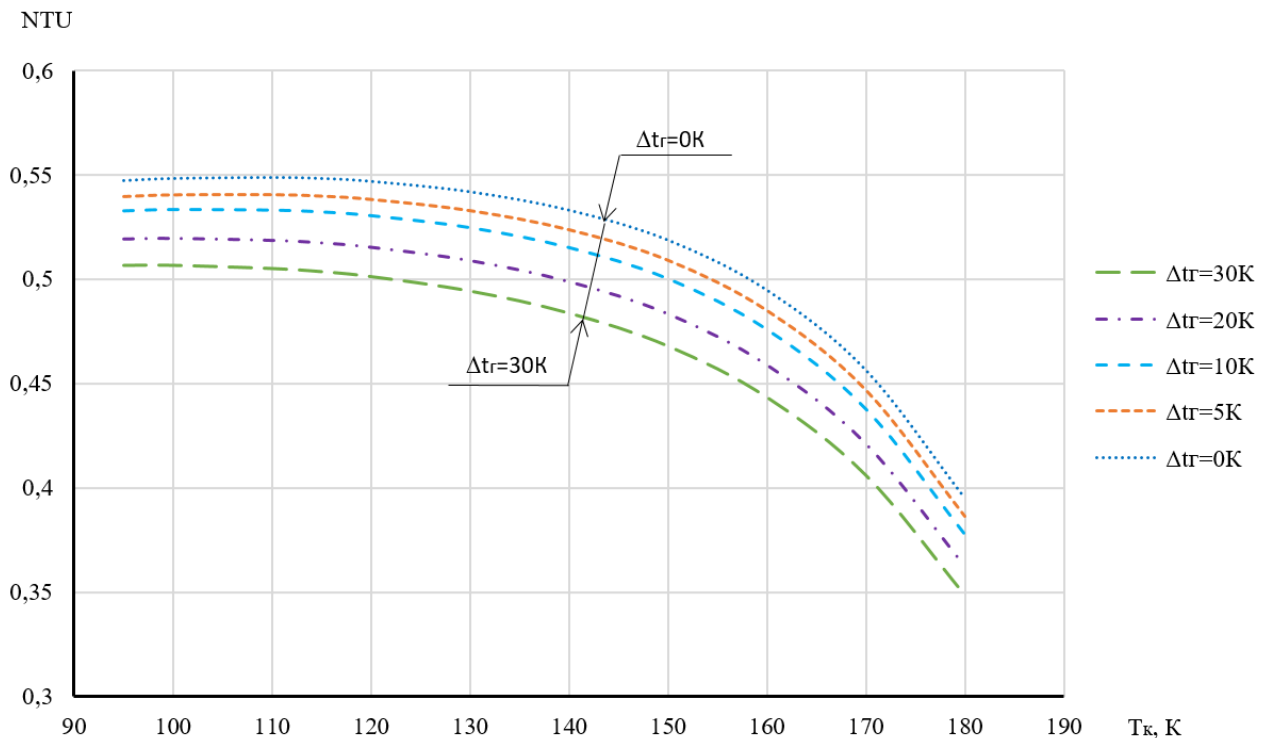


Рисунок 4. Зависимость показателя NTU от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 K для расхода рабочего тела от 4 до 5 кг/с

Относительная величина коэффициентов теплоёмкости (8) представляет собой отношение минимального коэффициента теплоёмкости и максимального коэффици-

ента теплоёмкости. В зависимости от полученного значения относительной величины коэффициентов теплоёмкости выби-

рается формула для расчёта относительной скорости теплопередачи (9)–(11).

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}. \quad (8)$$

Если $C_r=0$, то $\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$; (9)

Если $C_r=1$, то $\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$; (10)

Если $0 < C_r < 1$, то
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU \cdot (1 - C_r))}{1 - C_r \cdot \exp(-NTU \cdot (1 - C_r))}. \quad (11)$$

Показатель влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел определяется по формуле (12).

$$(k_r F_r)_{\text{реал}} = \varepsilon \cdot z_G \cdot (k_r F_r)_{\text{ид}}, \quad (12)$$

где Z_G – расходный коэффициент, зависящий от геометрических, конструктивных и расходных параметров теплообменных аппаратов.

$(k_r F_r)_{\text{реал}}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$

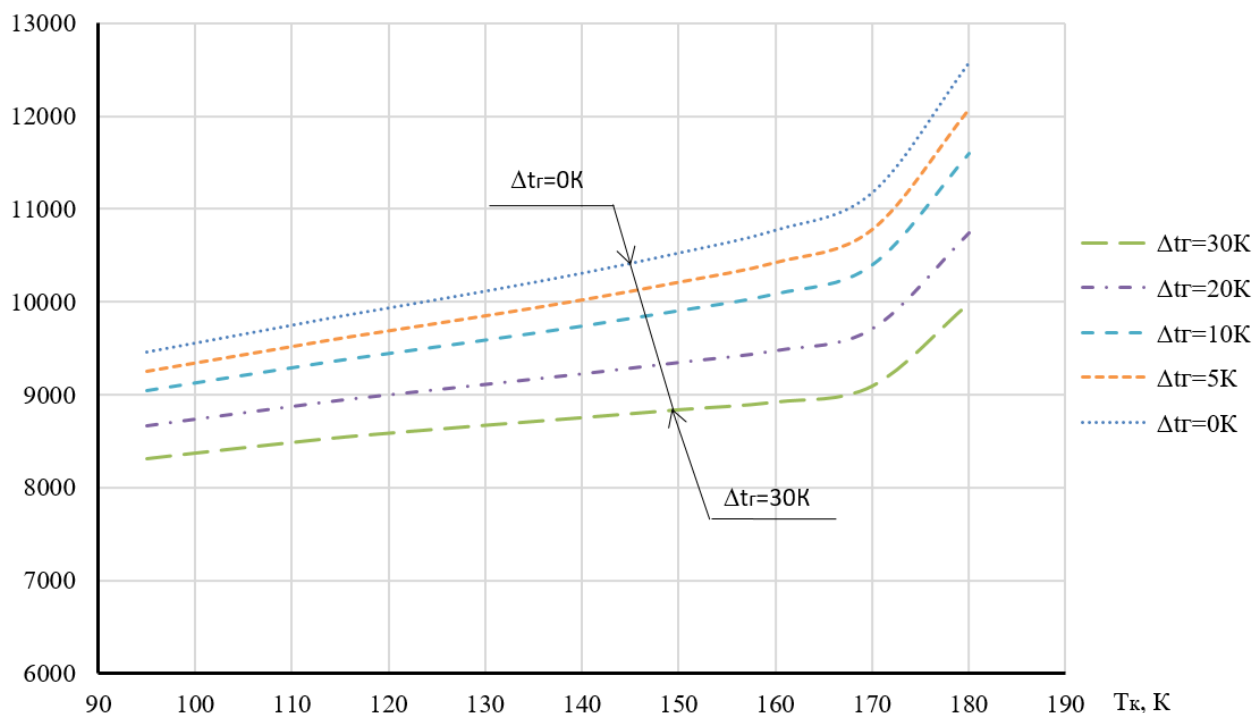


Рисунок 5. Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 1 до 2 кг/с

Обработка данных, полученных в ходе расчётных исследований, позволяет сделать вывод, что расходный коэффициент как функция расхода рабочего тела в зависимости от диапазонов его значений вычисляется согласно уравнениям (13)–(17).

При расходе рабочего тела от 0 до 1 кг/с:

$$z_G = G; \quad (13)$$

при расходе рабочего тела от 1 до 2 кг/с:

$$z_G = G; \quad (14)$$

при расходе рабочего тела от 2 до 3 кг/с:

$$z_G = G + 1; \quad (15)$$

при расходе рабочего тела от 3 до 4 кг/с:

$$z_G = G + 2,5; \quad (16)$$

при расходе рабочего тела от 4 до 5 кг/с:

$$z_G = G + 4. \quad (17)$$

Зависимости показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при разных температурных напорах Δt_r для расходов рабочего тела от 1 кг/с до 5 кг/с представлены на рисунках 5–8.

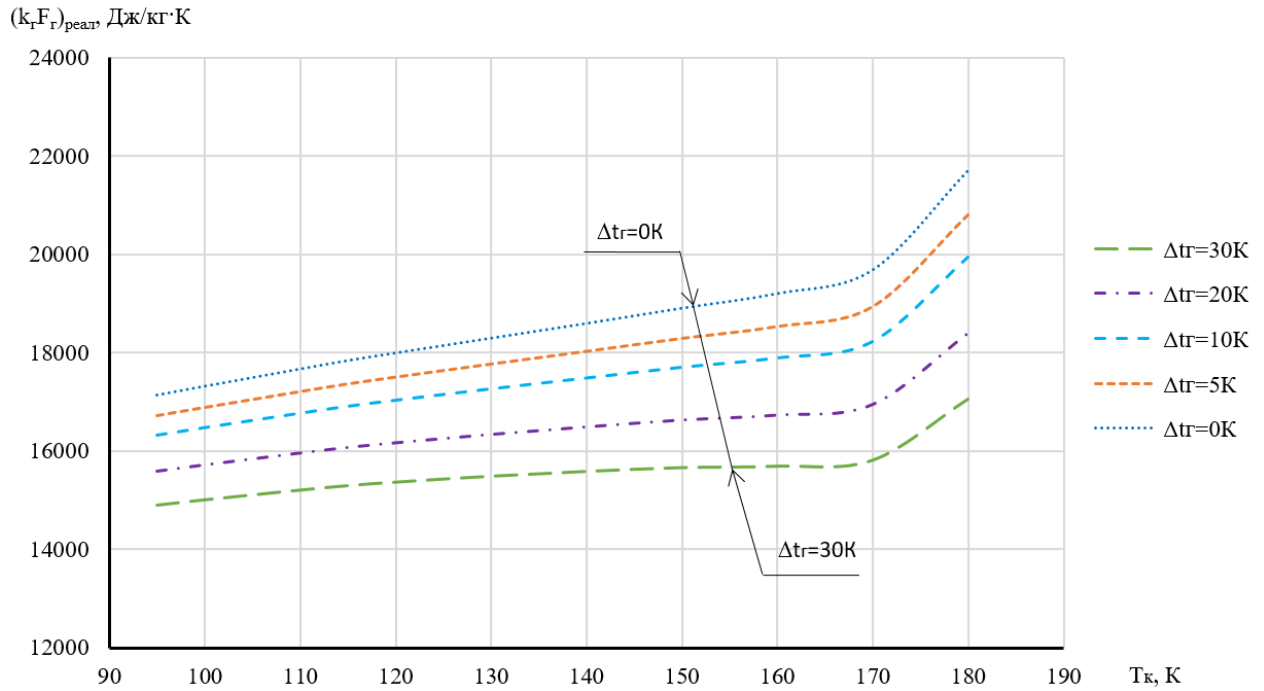


Рисунок 6. Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 2 до 3 кг/с

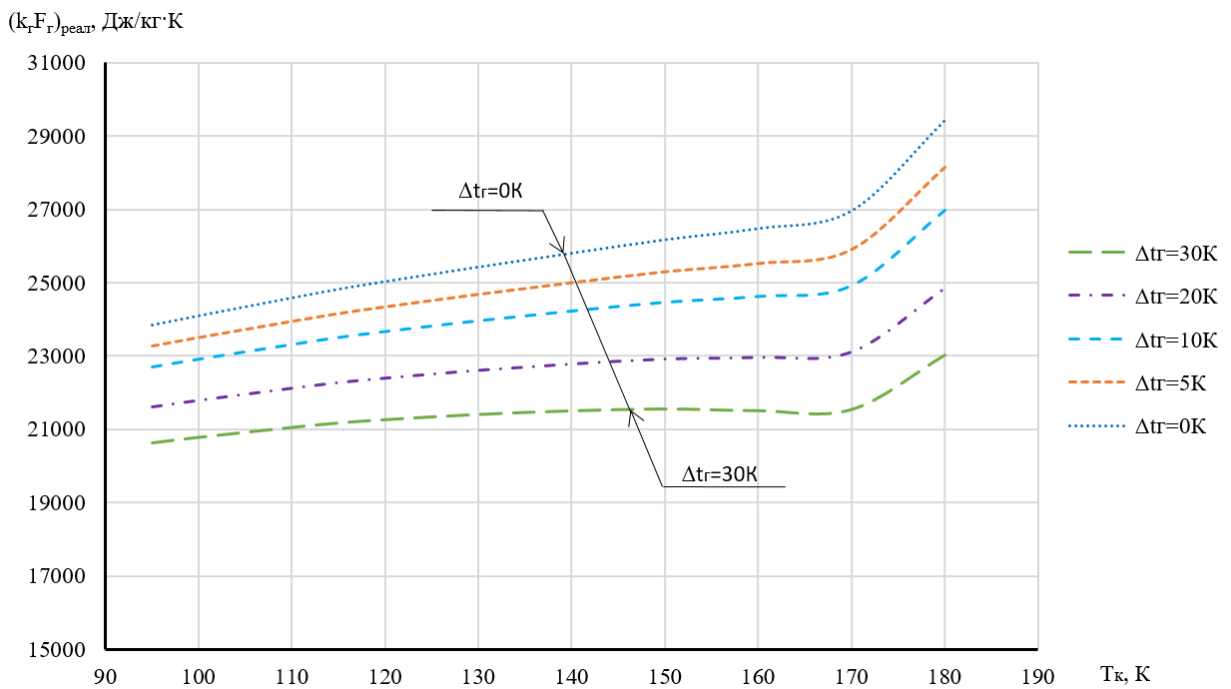


Рисунок 7. Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от низшей температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 3 до 4 кг/с

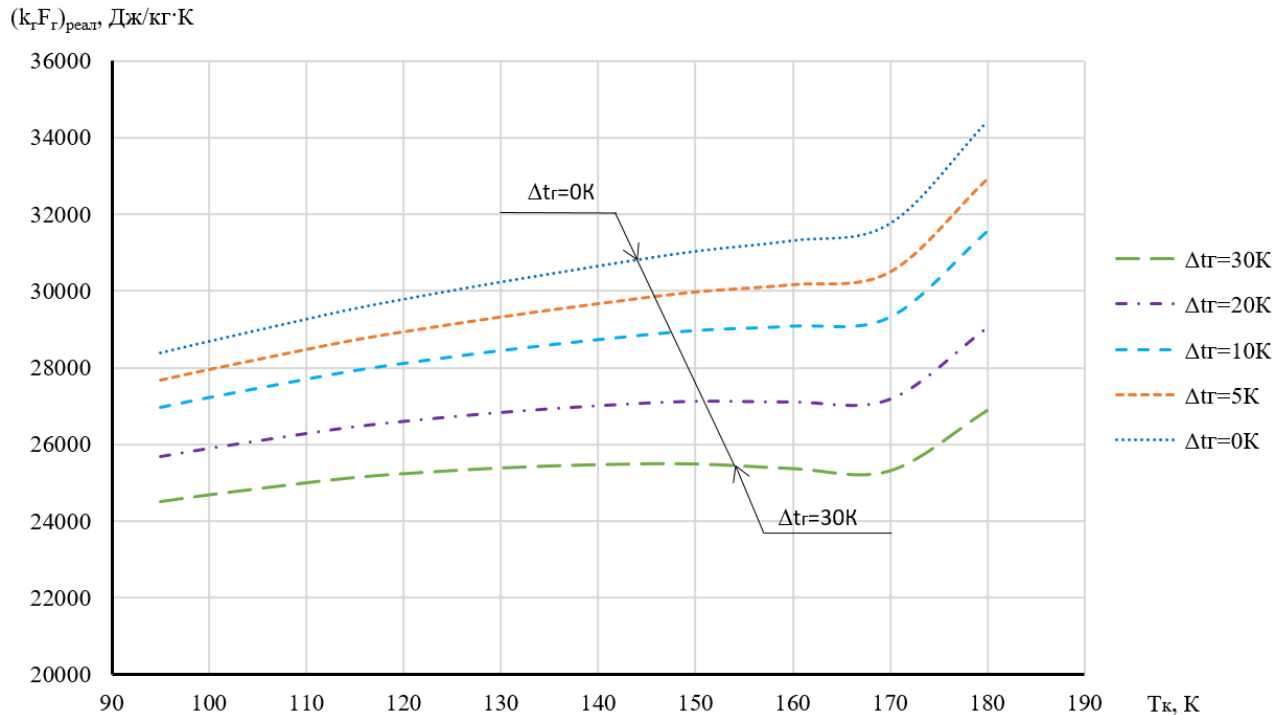


Рисунок 8. Зависимость показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел от нижней температуры рабочего тела при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 4 до 5 кг/с

При проведении анализа зависимостей показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел kF от нижней температуры рабочего тела T_k при температурных напорах Δt_r от 0 до 30 К для расхода рабочего тела от 1 до 5 кг/с отмечается значительное увеличение показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел с увеличением нижней температуры и расхода рабочего тела и незначительное уменьшение с увеличением температурного напора.

3 Заключение

Уточнением методики определения характеристик цикла НЭУ и её отличительной особенностью является введение в рассмотрение совокупности параметров: показателя NTU , с помощью которого проводится оценка рабочих характеристик теплообменных аппаратов, показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел kF , с помощью которого проводится оценка эффективности нагрева и испарения криопродукта в теп-

лообменных аппаратах, и расходного коэффициента Z_G , с помощью которого проводится оценка геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов.

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при увеличении нижней температуры рабочего тела увеличиваются массогабаритные характеристики и стоимость, а также снижается эффективность теплообменных аппаратов. Следовательно, показатель NTU может быть применим для предпроектной оценки рабочих характеристик теплообменных аппаратов, и его использование в методике определения характеристик цикла низкотемпературных энергетических установок позволит наиболее точно определять энергетическую эффективность системы.

4 Благодарности

Работа выполнена при поддержке средств финансирования Программы развития Самарского университета на 2021-

2030 гг. в рамках программы развития «Приоритет-2030».

Список использованных источников

[1] Тремкина, О.В. Совершенствование метода определения характеристик низкотемпературных энергоустановок летательных аппаратов : дис. ... канд. техн. наук: 2.5.15. / Тремкина Ольга Витальевна. – Самара, 2023. – 178 с.

[2] Zhang, L-Z. Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts / L-Z. Zhang // 2013. – P. 391.

[3] Угланов, Д.А. Энергоэффективные системы преобразования низкопотенциальной энергии криопродуктов: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.03 / Угланов Дмитрий Александрович. – Санкт-Петербург, 2022. – 688 с.

[4] Довгялло, А.И. Эффективность цикла Ренкина при условии получения максимальной мощности применительно к низкотемпературной энергетической установке, использующей криопродукт как рабочее тело / А.И. Довгялло, Д.А. Угланов, К.Е. Воротынцева, И.А. Архаров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2020. – № 6. – С. 3-7.

[5] Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.

[6] Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – Москва: Энергия, 1975. – 488 с.

[7] Берман, С.С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок / С.С. Берман. – Москва: Машгиз, 1959. – 423 с.

[8] Берман С.С. Расчёт теплообменных аппаратов / С.С. Берман. – Москва: Госэнергоиздат, 1962. – 240 с.

[9] Грязнов Н.Д. Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок / Н.Д. Грязнов, В.М. Епифанов, В.Л. Иванов, Э.А. Манушин. – Москва: Машиностроение, 1985. – 360 с.

[10] Благин, Е.В. Оценка влияния различных факторов на эффективность работы низкотемпературных энергетических установок / О.В. Тремкина, О.А. Манакова, Д.А. Угланов, Е.В. Благин, Р.А. Паньшин // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», посвящённая 110-летию со дня рождения генерального конструктора Н.Д. Кузнецова. – 2021. – Т. 2. – С. 212-213.

[11] Тремкина, О.В. Разработка и создание беспилотных летательных аппаратов с криогенной силовой установкой / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Х. Аднан // Тепловые процессы в технике. – 2022. – Т. 14., № 6. – С. 255-260.

**ASSESSMENT OF PERFORMANCE
CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGERS
TAKEN INTO ACCOUNT OF NTU INDICATOR**

Tremkina O.V.

Uglanov D.A.

Shikhalev V.I.

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086,
Russian Federation

tereshchenko.ov@ssau.ru

In this work, the performance characteristics of heat exchangers were assessed and the influence of various factors on the weight and size characteristics of heat exchangers of power plants and complexes was determined. The patterns of influence of temperature pressures, properties of the working fluid, temperature levels of heat sources, operating characteristics of the cycle, heat transfer coefficients, heat transfer surface area, flow rate, heat capacity of the working substance, geometric and design parameters of heat exchangers on the performance characteristics of heat exchangers of low-temperature power plants have been established.

Keywords: low-temperature power plant; heat exchanger; NTU indicator; weight and size characteristics

References

- [1] Tremkina, O.V. (2023), Improving the method for determining the characteristics of low-temperature power plants of aircraft: dissertation, Ph.D. Thesis, Samara University, Samara. (in Russian).
- [2] Zhang, L-Z, (2013), *Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts*.
- [3] Uglanov, D.A. (2022), Energy-efficient systems for converting low-potential energy of cryogenic products, D. Sc. Thesis, St. Petersburg. (in Russian).
- [4] Dovgyallo, A.I., Uglanov, D.A., Vorotyntseva, K.E. and Arkharov, I.A. (2020) "Efficiency of the Rankine cycle subject to obtaining maximum power in relation to a low-temperature power plant using a cryoproduct as a working fluid", *Chemical and oil and gas engineering*, no. 6, pp. 3-7. (in Russian).
- [5] Mikheev, M.A. (1977), *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer], Energy, Moscow. (in Russian).
- [6] Isachenko, V.P. (1975), *Teploperedacha* [Heat transfer], Energy, Moscow. (in Russian).
- [7] Berman, S.S. (1959), *Teploobmennye apparaty i kondensatsionnye ustroystva turbostanovok* [Heat exchangers and condensation devices of turbine units], Mashgiz, Moscow. (in Russian).
- [8] Berman, S.S. (1962), *Raschet teploobmennyykh apparatov* [Calculation of heat exchangers], Gosenergoizdat, Moscow. (in Russian).
- [9] Gryaznov, N.D., Epifanov, V.M., Ivanov, V.L. and Manushin, E.A. (1985) *Teploobmennye ustroystva gazoturbinnyyh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchange devices of gas turbine and combined installations], Mashinostroenie [Mechanical Engineering], Moscow. (in Russian).
- [10] Tremkina, O.V., Manakova O.A., Uglanov D.A., Blagin E.V. and Pan'shin R.A. (2021), "Assessing the influence of various factors on the efficiency of low-temperature power plants", *International scientific and technical conference "Problems and prospects for the development of engine building", dedicated to the 110th anniversary of the birth of general designer N.D. Kuznetsova*, vol. 2, pp. 212-213. (in Russian).
- [11] Tremkina, O.V., Uglanov, D.A. and Adenan, H. (2022) "Development and creation of unmanned aerial vehicles with a cryogenic power plant", *Thermal processes in technology*, vol. 14., no. 6, pp. 255-260. (in Russian).