

## Стенд для исследования смесительного теплообменника-испарителя низкопотенциальной энергоустановки

© К.А. Апсит, С.И. Хуциева, А.Н. Паркин, В.А. Воронов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены метод и оборудование для экспериментального исследования процессов тепломассообмена в смесительном аппарате, где теплообмен происходит на границе раздела двух фаз. Данный процесс необходим для передачи теплоты к кипящему веществу. Эффективность теплопередачи в аппарате исследуемой конструкции выше, чем в аппаратах, реализующих теплообмен через стенку. В случае применения смесительных теплообменных аппаратов можно добиться недорекуперации, близкой к нулю. В силу сложности математической модели процесса кипения в смесительном аппарате данный процесс изучен слабо. Спроектирован и изготовлен лабораторный стенд для качественного наблюдения эффекта выпаривания углеводородов в среде горячего теплоносителя. В установке заложена возможность тестирования различных типов теплообменных аппаратов с целью оценки их эффективности. Разработана методика проведения эксперимента на предполагаемых параметрах работы парорасширительного органического цикла Ренкина.*

**Ключевые слова:** смесительный теплообменный аппарат, органический цикл Ренкина, теплообмен, недорекуперация.

**Постановка задачи.** По данным министерства энергетики Российской Федерации за 2014 г., установленная мощность парка действующих электростанций по типам генерации имеет следующую структуру: 21 % — это объекты гидроэнергетики, 11 % — атомные электростанции и 68 % — тепловые электростанции. При этом, по данным Американского совета по энергоэффективной экономике (American Council for an Energy-Efficient Economy — ACEEE), КПД тепловых электростанций России крайне низок [1].

Таким образом, в тепловой энергетике сохраняет актуальность вопрос более рационального и полного использования теплоты сгорания топлива (уголь, газ). Применение установок, работающих на низкопотенциальной теплоте, например, по органическому циклу Ренкина (ORC) позволяет использовать для генерации электрической мощности теплоту с температурным уровнем +100...+150 °С, использование которой в паротурбинной установке (ПТУ) неэффективно [2–4].

**Описание физической сущности процесса.** Схема ORC-установки включает минимум два теплообменных аппарата (ТОА), расширительную машину и насос. Эффективность установок определяется сово-

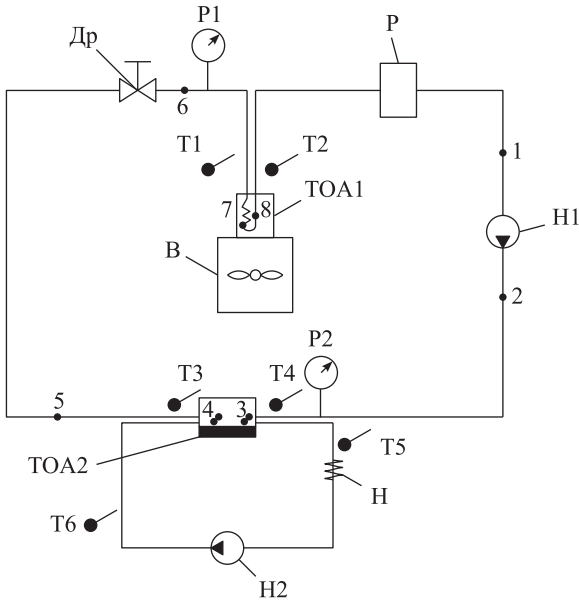
купностью эффективности их компонентов. Насос и турбина хорошо изучены, их КПД находится на максимально возможном уровне, однако при определении КПД установки более половины потерь приходится на ТОА. Данные потери обусловлены разностью температур, необходимой для передачи теплоты при конечной площади ТОА. Таким образом, актуальной является задача обеспечения эффективности ТОА подобной установки, позволяющего снизить недорекуперацию в нем до минимального значения при заданных габаритах аппарата. Данная задача легко решается в случае применения смесительного аппарата, в котором теплообмен происходит на границе раздела фаз [5]. Исследуемая конструкция широко используется при решении ряда специальных задач космической теплотехники, однако применительно к наземным условиям и, в частности условиям работы в составе ОРС-установок, изучена слабо, что подчеркивает важность экспериментальной отработки предлагаемой конструкции [6–9].

**Эксперимент.** Для оценки возможности использования смесительного ТОА в парогенерирующем контуре ОРС-установки предложен стенд (рис. 1), схема которого показана на рис. 2. Оборудование стенда включает теплообменник-конденсатор, теплообменник-испаритель (исследуемый смесительный ТОА), дроссельный клапан, насосы, ресивер, нагреватель и измерительные приборы. Приборная часть содержит термометры и манометры.



**Рис. 1.** Стенд для исследования смесительного ТОА

Стенд позволяет качественно исследовать возможность организации процесса кипения на поверхности раздела двух жидких фаз в объеме жидкости для сведения к минимуму недорекуперации на теплом конце в ТОА2.



**Рис. 2.** Схема стенда для исследования смешительного ТОА:

Др — дроссельный вентиль; P1, P2 — манометры; P — ресивер;  
 T1–T6 — термометры; В — вентилятор; TOA1 — теплообменник-конденсатор;  
 TOA2 — теплообменник-испаритель; Н1 — насос;  
 Н2 — масляный насос; Н — нагреватель

Рабочее вещество циркулирует по замкнутому контуру. Перед ТОА1 для регулирования давления рабочего вещества на его входе установлен дроссельный вентиль. В ТОА1 рабочее вещество конденсируется и насосом Н1 подается в ТОА2, где кипит за счет получения теплоты из второго контура, по которому циркулирует масло, подаваемое в ТОА2 насосом Н2. Термометры T1 и T4 размещены на входе рабочего вещества в ТОА1 и ТОА2 соответственно, T2 и T3 — на выходе из них, а термометры T6 и T5 — на входе масла в ТОА2 и на выходе из него соответственно. Манометры P1 и P2 установлены перед ТОА1 и ТОА2 соответственно.

При проектировании стенда был выполнен конструкторский расчет теплообменника-конденсатора (ТОА1). На основании результатов конструкторского расчета спроектирован и изготовлен теплообменник-конденсатор, который конструктивно представляет собой витой змеевик, установленный в теплоизолированном воздуховоде, на вход которого нагнетателем подается охлаждающий воздух (рис. 3).

Теплообменник-испаритель представляет собой смешительный ТОА (рис. 4), в который поступает жидкое рабочее вещество (фреон R141b), которое в дальнейшем кипит за счет получения теплоты от масла.

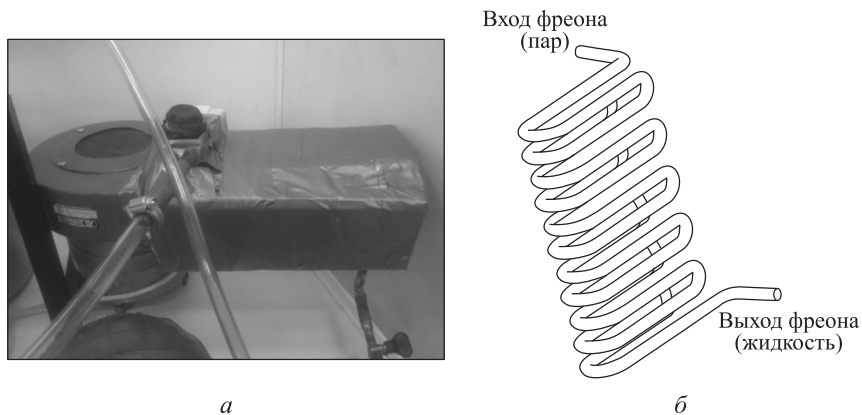


Рис. 3. Общий вид (а) и схема (б) теплообменника-конденсатора

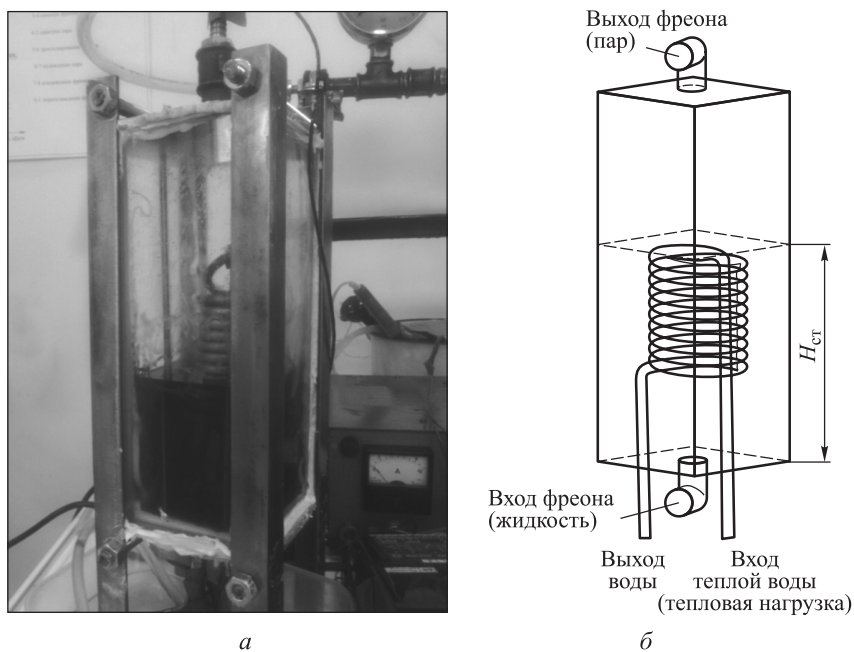


Рис. 4. Общий вид (а) и схема (б) теплообменника-испарителя:  
 $H_{ст}$  — высота столба масла

Фреон R141b выбран для экспериментальной отработки вследствие его доступности в лаборатории. Температура кипения фреона R141b при нормальном атмосферном давлении 305 К (рис. 5).

	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Liquid Density (kg/m <sup>3</sup> )	Vapor Density (kg/m <sup>3</sup> )	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)	Liquid Cp (kJ/kg-K)	Vapor Cp (kJ/kg-K)
1	304.82	0,10000	1220,8	4,8000	236,23	459,11	1,1252	1,8564	1,1631	0,80986

Рис. 5. Свойства фреона R141b на линии насыщения

Принятые при расчете схемы стенда допущения:

- свойства фреона осредняются по температуре процесса;
- масло с фреоном образуют идеальный раствор, тепловые эффекты смешения отсутствуют;
- масло отсутствует в паровой фазе;
- потери теплоты и гидравлические потери в контуре не учитываются;
- КПД насоса имеет постоянную величину;
- мощность насоса в тепловом балансе не учитывается.

**Расчет цикла.** Реализуемые в схеме стенда термодинамические процессы показаны на рис. 6, точки соответствуют указанным на схеме цикла (см. рис. 2).

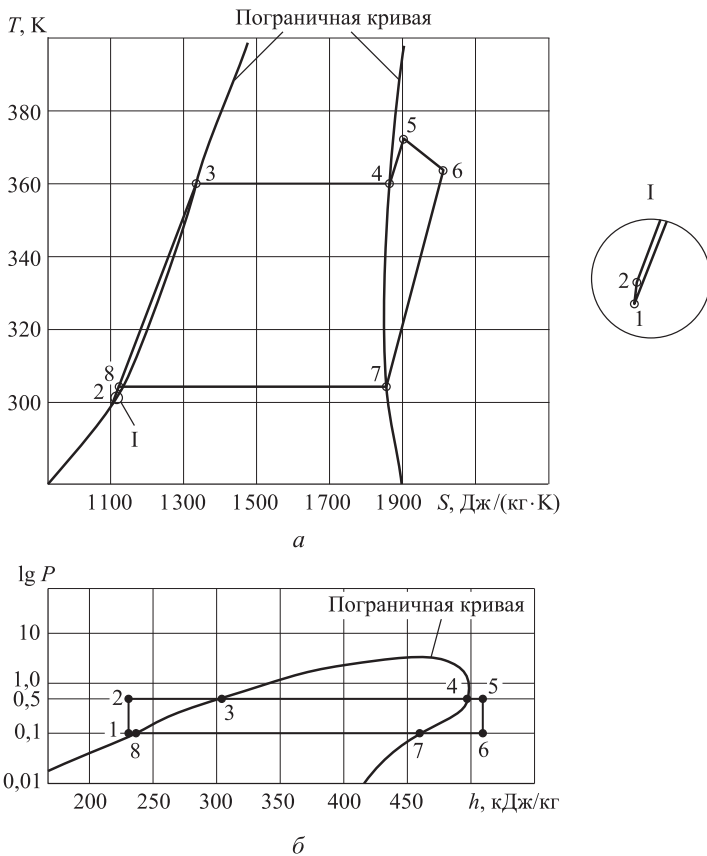


Рис. 6. Термодинамический цикл в координатах  $T-S$  (а) и  $\lg P-h$  (б)

Отдельным участкам кривой соответствуют следующие процессы:

- 1–2 — сжатие фреона насосом;
- 2–5 — нагрев фреона в испарителе (2–3 — подогрев жидкости,
- 3–4 — кипение, 4–5 — перегрев пара);
- 5–6 — дросселирование фреона;

6–1 — охлаждение фреона в конденсаторе (6–7 — охлаждение пара, 7–8 — конденсация, 8–1 — переохлаждение жидкости).

Расчет цикла выполнен в программе Aspen HYSYS. Схема, использованная для расчета, приведена на рис. 7.

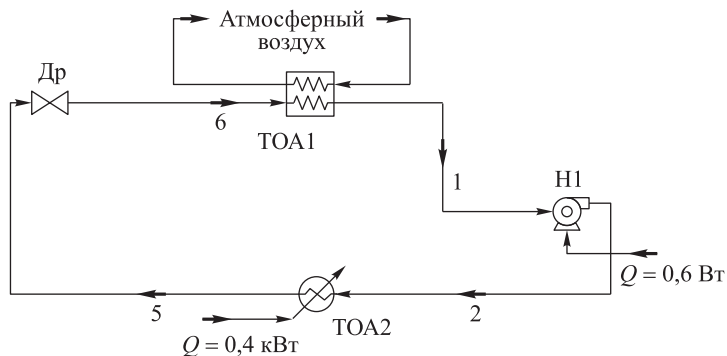


Рис. 7. Расчетная схема стенда

Начальные данные для расчета схемы стенда:

- рабочее вещество — фреон R141b;
  - температура после конденсатора (точка 1)  $T_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - температура после испарителя (точка 5)  $T_5 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - давление в конденсаторе  $P_1 = 1\text{ атм}$ ;
  - давление в испарителе  $P_2 = 5\text{ атм}$ ;
  - расход фреона  $G = 5\text{ кг/ч}$ ;
  - количество подводимой к испарителю теплоты  $Q = 400\text{ Вт}$ ;
- Результаты расчета представлены в таблице.

#### Расчет цикла в программе Aspen HYSYS

Точка	Давление, МПа	Температура, К	Доля пара
1	0,1	300	0
2	0,5	300,25	0
3–4 (кипение)	0,5	360	0→1
5	0,5	373	1
6	0,1	366,1	1
7–8 (конденсация)	0,1	304	1→0

Для измерения основных параметров в установке использованы следующие приборы:

- датчик температуры Pt-50 (рис. 8);



Рис. 8. Датчик температуры Pt-50

• восьмиканальный измеритель-регулятор ТРМ138В (рис. 9).  
Отображает на цифровом индикаторе полученные значения температур;

- манометры.



Рис. 9. Восьмиканальный измеритель-регулятор ТРМ138В

**Методика измерений.** Варьируемые величины:

- температура конденсации;
- температура кипения;
- расход рабочего тела.

Температура конденсации варьируется с помощью частотного преобразователя, который изменяет частоту вращения вентилятора конденсатора, что позволяет регулировать коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции и, как следствие, регулировать тепловой поток.

Температура кипения варьируется посредством переключения режима работы питающего устройства циркуляционного насоса, что позволяет за один и тот же промежуток времени передавать маслу большее количество теплоты за счет увеличения коэффициента теплоотдачи.

Расход рабочего тела варьируется посредством изменения частоты вращения электродвигателя привода насоса.

Цель измерений — получение эмпирической зависимости минимально необходимой высоты  $H_{ст}$  столба масла в смесительном аппарате от рабочих температур цикла, обеспечивающей недорекуперацию

между уходящим газообразным фреоном и маслом на границе раздела фаз в пределах 0,2 К.

**Результаты.** Спроектирован и собран стенд для демонстрации процесса бесповерхностного кипения. По описанной методике предполагается проведение серии экспериментов, нацеленных на проверку исходных гипотез, а также на оценку работоспособности и характеристик смесительного теплообменника. Прозрачный корпус аппарата позволяет осуществлять визуальный контроль работы установки. Стенд можно использовать также для проведения лабораторных работ со студентами младших курсов, в том числе со студентами, проходящими практику в СЭЛФ (Студенческой экспериментальной лаборатории физики). Модульная конструкция установки позволяет менять и модернизировать отдельные ее узлы, открывая возможность сравнительного анализа различных вариантов конструкции (замена ТОА на аппарат типа труба в трубе, витой аппарат; разная организация смесительного массообмена — варианты форсунок, разные схемы подачи рабочих веществ и т. д.) [10].

В дальнейшем планируется:

- 1) проведение анализа результатов эксперимента с целью оптимизации характеристик пары рабочих фреон — промежуточный теплоноситель и подбор веществ, подходящих для работы в цикле Ренкина;
- 2) модернизация стенда с возможностью замены узлов цикла для оценки эффективности применения различных типов теплообменных аппаратов в качестве испарителя;
- 3) создание на базе стенда лабораторной работы по основам курса тепломассообмена.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Леонов В.П., Воронов В.А., Апсит К.А., Ципун А.В. Цикл Ренкина с низкотемпературным источником теплоты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 2 (38). URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1368.html> (дата обращения 10.05.2015).
- [2] Quoilin S., Van Den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. Technoeconomic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22, pp. 168–186.
- [3] Янчошек Л., Кунц П. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации. *Турбины и дизели*, 2012, март–апрель, с. 50–53.
- [4] Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. *Котельные установки и парогенераторы*. Москва-Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003, 592 с.
- [5] Архаров А.М., Архаров И.А., Шевич Ю.А. *Теплотехника*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004, 711 с.
- [6] Архаров А.М. *Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014, 507 с.
- [7] Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. *Криогенные системы. Т. 1: Основы теории и расчета*. Москва, Машиностроение, 1996, 576 с.



- [8] Кутателадзе С.С. *Основы теории теплообмена*. Москва, Атомиздат, 1979, 416 с.
- [9] Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. Москва, Энергия, 1973, 320 с.
- [10] Воронов В.А., Хуциева С.И. Разработка экспериментального стенда и методики исследования влияния объемных электрических зарядов на интенсивность конвективного теплообмена в токопроводящих средах. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 3.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Апсит К.А., Хуциева С.И., Паркин А.Н., Воронов В.А. Стенд для исследования смесительного теплообменника-испарителя низкопотенциальной энергоустановки.

*Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1430.html>

**Апсит Константин Александрович** родился в 1993 г. Магистрант кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 2 публикаций. Область научных интересов: альтернативная энергетика, машины низкотемпературной техники. e-mail: [kosta\\_02@mail.ru](mailto:kosta_02@mail.ru)

**Хуциева София Иосифовна** родилась в 1995 г. Студентка кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 2 публикаций. Область научных интересов: математическое моделирование в криогенной технике. e-mail: [khutsieva.sofia2012@yandex.ru](mailto:khutsieva.sofia2012@yandex.ru)

**Паркин Алексей Николаевич** родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Ассистент кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 публикаций. Область научных интересов: высокоэффективные установки низкопотенциальной энергетике. e-mail: [parkin.aleksey@gmail.com](mailto:parkin.aleksey@gmail.com)

**Воронов Владимир Андреевич** родился в 1989 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Аспирант кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 публикаций. Область научных интересов: машины низкотемпературной техники, холодильной техники. e-mail: [breadcrumbs@mail.ru](mailto:breadcrumbs@mail.ru)

## Test bench for researching of the mixing heat-exchanger-evaporator of the low grade power plant

© K.A. Apsit, S.I. Khutsieva, A.N. Parkin, V.A. Voronov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes a method and equipment for experimental research of heat and mass transfer in a mixing apparatus, where heat exchange occurs at the interface of the two phases. The process is necessary for heat transfer to the boiling substance. The efficiency of heat transfer in the investigated device structure is higher than in devices implementing heat transfer through the wall. In the case of mixing heat exchangers it is possible to achieve close to zero under recuperation. Due to the complexity of the mathematical model describing the process of boiling in a mixing apparatus, this process is poorly understood. The studied process can be used in all industries that require the heat transfer to the boiling liquid. The test bench for the qualitative observation of the hydrocarbon evaporation in the environment of a hot heat-exchange liquid is designed and manufactured. The setup involves the ability to test different types of heat exchangers in order to assess their efficiency. The technique of the experiment carrying out on the expected steam expanding organic Rankine cycle operating parameters is developed.*

**Keywords:** mixing heat exchanger, organic Rankine cycle, heat exchange, close to zero underrecuperation.

## REFERENCES

- [1] Leonov V.P., Voronov V.A., Apsit K.A., Tsipun A.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, issue 2 (38). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1368.html> (accessed 10.05.2015).
- [2] Quoilin S., van den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22, pp. 168–186.
- [3] Yanchoshek L., Kunts P. *Turbiny i Dizeli – Turbines and Diesel Engines*, 2012, March–April, pp. 50–53.
- [4] Lipov Yu.M., Tretyakov Yu.M. *Kotelnye ustanovki i parogeneratory* [Boilers and Steam Generators]. Moscow-Izhevsk, SRC Regular and Chaotic Dynamics Publ., 2003, 592 p.
- [5] Arkharov A.M., Arkharov I.A., Shevich Yu.A. *Teplotekhnika* [Heat Engineering]. Moscow, BMSTU Publ., 2004, 711 p.
- [6] Arkharov A.M. *Osnovy kriologii. Entropiyno-statisticheskiy analiz nizkotemperaturnykh sistem* [Fundamentals of Cryology. Entropy-Statistical Analysis of Low-Temperature Systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 507 p.
- [7] Arkharov A.M., Marfenina I.V., Mikulin E.I. *Kriogennyye sistemy. Osnovy teorii i rascheta* [Cryogenic system. Basic Theory and Analysis]. Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, 576 p.
- [8] Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Principal Theory of Heat Transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 416 p.
- [9] Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of Heat Transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 320 p.
- [10] Voronov V.A., Khutsieva S.I. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik — Youth Science and Technology Gazette*, 2015, no. 3.

**Apsit K.A.** (b. 199), M. Sci. student at the Department “Refrigerating and Cryogenic Technology. Air Conditioning and Life Support Systems”; engineer in the Center of Research and Education “Power Engineering”, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [kosta\\_02@mail.ru](mailto:kosta_02@mail.ru)

**Khutsieva S.I.** (b. 1995), student of the Department “Refrigerating and Cryogenic Technology. Air Conditioning and Life Support Systems”; engineer in the Center of Research and Education “Power Engineering”, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [khutsieva.sofia2012@yandex.ru](mailto:khutsieva.sofia2012@yandex.ru)

**Parkin A.N.** (b. 1983) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2006. Assistant Lecturer in the Department “Refrigerating and Cryogenic Technology. Air Conditioning and Life Support Systems”, Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of high effective installations for low-potential power engineering. e-mail: [parkin.aleksey@gmail.com](mailto:parkin.aleksey@gmail.com)

**Voronov V.A.** (b. 1989) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2012. Postgraduate student at the Department “Refrigerating and Cryogenic Technology. Air Conditioning and Life Support Systems”; engineer in the Center of Research and Education “Power Engineering”, Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of machines for low-temperature engineering and refrigeration. e-mail: [breads@mail.ru](mailto:breads@mail.ru)