

УДК 681.58

## Управление состоянием хладагента в конденсаторе холодильной парокомпрессионной установки для интенсификации теплоотдачи\*

В.И. ГУЖОВ<sup>1</sup>, А.И. САЖИН<sup>2</sup>, И.А. САЖИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, д. т. н., профессор, e-mail: vig@edu.nstu.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент, e-mail: Andriano92@mail.ru

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, к. т. н., доцент, e-mail: fadd@fb.nstu.ru

Рассматривается рабочий цикл в координатах давление – энтальпия реальной парокомпрессионной холодильной установки. Определены теплофизические параметры хладагента на входе, выходе, в промежуточных сечениях трубы конденсатора. Рассмотрены два случая возможных комбинаций режимов течения хладагента в конденсаторе. Вычислены значения комплексов Кутателадзе – Сорокина и Бейкера. Проведен анализ режимов течения хладагента с помощью диаграмм Кутателадзе – Сорокина и Бейкера. Получены значения чисел Нуссельта, коэффициентов теплоотдачи и величин удельной на единицу площади теплоты, отбираемой у хладагента, находящегося в разных режимах течения (первый: дисперсный – преобладание газовой фазы, второй: кольцевой, третий: расслоенный – преобладание жидкой фазы). Анализ процесса теплоотдачи показывает существенные различия чисел Нуссельта для разных режимов течения хладагента в конденсаторе. Показана возможность увеличения размера области с наибольшей теплоотдачей. Расширение участка кольцевого режима течения повышает эффективность конденсатора парокомпрессионной холодильной установки, происходит снижение потерь на трение, уменьшение температуры хладагента, исключается наличие газовой фазы на выходе из конденсатора. Предложена система автоматического управления состоянием хладагента для интенсификации теплоотдачи, содержащая датчики состояния хладагента, блок обработки поступающей информации и формирования команд управления, исполнительные устройства для изменения концентрации фаз. Представлены теоретические основы для построения систем автоматического регулирования интенсификацией теплоотдачи в парокомпрессионных холодильных установках.

**Ключевые слова:** управление техническими системами, холодильная установка, конденсатор, рабочий цикл, хладагент, карты режимов течения, диаграммы Кутателадзе – Сорокина и Бейкера, газовая фаза, число Нуссельта, теплоотдача

### ВВЕДЕНИЕ

Улучшение эксплуатационных характеристик холодильных машин производится постоянно. Конструкция современных парокомпрессионных теплообменных установок полностью отражает прогрессивные технологии, применяются новые материалы, электроника, внедряются более эффективные, экологически безопасные хладагенты и оптимизируются параметры отдельных агрегатов [2, 3, 4]. Процессы испарения и конденсации рабочего тела, реализующиеся в парокомпрессионных холодильных машинах, исследованы в многочисленных работах [1, 5, 6]. Теоретически определены и экспериментально проверены параметры основных режимов течения газожидкостных потоков [1, 5, 6, 7, 8]. Вопросы численного моделирования тепломассопереноса и гидродинамики турбулентных двухфазных потоков течения в трубе рассмотрены в [16]. Данные, полученные в работе [16], можно использовать для анализа интенсификации тепломассопереноса в теплообменных аппаратах различного назначения. Предложены методики изменения теплофизических параметров двухфазных систем путем использования вихревых эффектов [9], естественной конвекции и наножидкостей.

\* Статья получена 14 января 2013.

В настоящее время возможно одновременное определение и регулирование режима течения газожидкостного потока в конкретном сечении, например, конденсатора реальной холодильной машины [2, 3, 18, 19]. Известно, что вид режима течения потоков газожидкостной смеси в трубопроводах определяется с помощью карт режимов течения [6, 7, 14]. Причем сравнение экспериментальных и полученных по методикам Кутателадзе – Сорокина, Бейкера параметров доказывает принципиальную возможность реализации алгоритма регулирования режимов течения газожидкостного потока. Например, расширение участка кольцевого режима течения повышает эффективность конденсатора парокомпрессионной холодильной установки (происходит уменьшение потери на трение, увеличение теплоотдачи).

В данной работе выполнен анализ теплофизических параметров, характеризующих хладагент в конденсаторе реальной холодильной установки и предложена система автоматического управления состоянием хладагента для улучшения процесса теплоотдачи.

### 1. КАРТЫ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ

При моделировании процесса конденсации рабочего тела применяются карты течения газожидкостных потоков. Методики Кутателадзе – Сорокина [1], Бейкера [6] позволяют достоверно определить режим течения двухфазной среды в зависимости от конкретных параметров хладагента и геометрии трубопровода. Карта течений газожидкостных систем Кутателадзе – Сорокина соответствует экспериментальным и расчетным данным [1, 2, 3, 17] и построена в координатах комплексов  $K - N$  [1], при вычислении которых необходимо знать (или задать) параметры двухфазного потока (приведенные скорости фаз, их плотности, коэффициент поверхностного натяжения в определенном сечении конденсатора). Рассмотрены два случая возможных комбинаций режимов течения хладагента в конденсаторе. 1-й случай – наличие возможной области кольцевого режима течения (не более 2/3 общей длины трубопровода конденсатора), и 2-й случай – когда в конденсаторе существенно увеличена область кольцевого режима течения двухфазной среды (более 70 % от общей длины).

В качестве примера, который не уменьшает общность рассуждений, рассмотрен реальный цикл парокомпрессионной холодильной установки в координатах  $\lg P - i$  ( $P$  – давление,  $i$  – энтальпия) [2]. Массовый расход при холодопроизводительности 32 (кВт) равен  $G_{R22} = 0,179$  (кг/с). Площадь сечения трубы конденсатора диаметром  $D = 0,025$  (м) составляет  $S_0 = 4,909 \cdot 10^{-4}$  (м<sup>2</sup>). Точка 4 цикла [2] соответствует началу процесса конденсации (вход в конденсатор), в которой температура хладона R22 равна  $T_4 = 303K$ , давление  $P_4 = 11,92 \cdot 10^5$  (Па). Выход из конденсатора на диаграмме  $\lg P - i$  обозначен точкой 5. Сплошная линия диаграммы цикла, соответствующая процессу конденсации [2], условно разделена на десять участков для анализа состояния газожидкостного потока хладагента. Массовое газосодержание ( $X_{ГАЗ}$ ) изменяется от 1 (точка 4) до 0 (точка 5) с шагом 0,1. Исключение составляет промежуточная точка в первом участке. Здесь относительное массовое газосодержание равно  $X_{ГАЗ} = 0,95$ . Расчетные значения критической температуры ( $T_{4K}$ ), коэффициента поверхностного натяжения ( $\sigma_{T4}$ ), удельного объема газовой фазы ( $v_4$ ), плотности газовой фазы  $\rho_4$  приняты в соответствии с параметрами состояния смеси [4]. Плотность и коэффициент динамической вязкости жидкой фазы R22 вычислены следующим соотношением приведенным [4]. Ниже рассмотрен пример применения комплексов Кутателадзе – Сорокина к определению вида течения газожидкостного потока. Следуя [1], приведенные скорости фаз вычисляются следующим образом (для газовой и жидкой соответственно):

$$W_{GAS4} = \frac{G_{R22} \cdot X_{ГАЗ}}{\rho_4 \cdot S_0}; \quad W_{ЖИД4} = \frac{G_{R22} \cdot (1 - X_{ГАЗ})}{\rho_{L4} \cdot S_0}. \quad (1)$$

Комплексы Кутателадзе – Сорокина имеют вид

$$K = \left( \frac{g \cdot (\rho_{L4} - \rho_4)}{\rho_4^2 \cdot \sigma_{T4}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot W_{GAS4}, \quad (2)$$

$$N = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{(\rho_{L4} - \rho_4)^4 \cdot \sigma_{T4}^2}{\rho_{L4}^2 \cdot g^5 \cdot D^6} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( 1 + 31 \cdot g \frac{\sigma_{T4}^2}{\rho_4} \cdot \left( \frac{\rho_{L4}}{(\rho_{L4} - \rho_4)} \right)^{0.55} \right) \cdot W_{ЖИД4}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Таблица 1

Значения комплексов Кутателадзе – Сорокина

$X_{ГАЗ}$	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,95
K	1,701	5,103	8,505	10,206	11,907	16,160
N	11,984	10,486	7,490	5,992	4,494	0,749

Следуя [2, 3, 4, 16], изменение газосодержания по мере прохождения конденсатора от точки 4 до точки 5 носит параболический закон. Полученные значения комплексов позволяют определить координаты точек на карте течений Кутателадзе – Сорокина [1], соответствующие дисперсному режиму течения при газосодержании 0,9 – 0,7, дисперсно-кольцевому – 0,7 – 0,1 и 1,0 – 0,09 – пограничному состоянию ближе к снарядному режиму течения.

Рассмотрим методику Бейкера [6] определения параметров газожидкостного потока. В качестве комплексов приняты следующие соотношения:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_{L4}}{1000} \right) \cdot \left( \frac{\rho_4}{1,2} \right) \right]^{-0.5}, \quad \psi = \left[ \left( \frac{73}{\sigma_{T4}} \right) \cdot \left( \frac{\mu_{T4}}{1} \right) \cdot \left( \frac{1000}{\rho_{L4}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где  $G_f, G_g \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \right]$  – массовые расходы жидкой и газовой фаз соответственно. Размерность коэффициента поверхностного натяжения  $\left[ \frac{\text{дин}}{\text{см}} \right]$ , коэффициента динамической вязкости  $[\text{сПз}]$ .

Таким образом, следуя диаграмме Бейкера, в рассматриваемом конденсаторе кольцевой режим течения реализован для значений газосодержания от 0,3 до 0,7, при газосодержании 0,2 и 0,1 – снарядный режим течения. Следует отметить, что возможность реализации снарядного и раздельного режимов течения на выходе из конденсатора установлена аналитически и экспериментально [2, 3, 17]. В целом методики Бейкера и Кутателадзе – Сорокина могут быть использованы для регулирования режимов течения газожидкостного потока хладагента.

Таблица 2

Значения комплексов Бейкера

$X_{X4}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,95
$\frac{G_g}{\lambda} \cdot 10^4$	1,836	3,672	5,508	7,343	9,179	11,02	12,85	17,44
$G_f \cdot \lambda \cdot \psi / G_g$	31,349	13,933	8,128	5,225	3,483	2,322	1,493	0,189

## 2. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛООБМЕНА

Вычисления значений чисел Нуссельта для разных режимов течения хладагента в конденсаторе проведены по методикам [1, 5, 15]. Получены величины удельной на единицу площади теплоты, отбираемой у хладагента, находящегося в разных режимах течения (первый: дисперсный – преобладание газовой фазы, второй: кольцевой, третий: расслоенный – преобладание жидкой фазы). Анализ процесса теплоотдачи показывает существенные различия чисел Нуссельта для разных режимов течения хладагента в конденсаторе [1, 5, 15]. Например, отношение числа Нуссельта газожидкостного и числа Нуссельта газового потоков равно 3,5. Проведено сравнение процессов теплообмена в конденсаторе холодильной установки с увеличением области кольцевого режима течения и без ее увеличения (как практически реализуется во всех теплообменных устройствах). Расширение области кольцевого режима течения хладагента в конденсаторе может привести к изменению теплоотдачи до 20 %. Показана возможность понижения температуры хладагента при его конденсации.

Предлагается для повышения эффективности работы конденсатора (увеличения теплоотдачи) парокомпрессионных холодильных установок применить систему автоматического регулирования режимов течения газожидкостного потока, состоящую из следующих блоков:

- датчики измерения параметров газожидкостного потока,
- цифровой или аналоговый блок обработки поступающей информации и формирования команд управления,
- устройства для изменения концентрации фаз, расположенные на входе и выходе конденсатора. Датчики системы автоматического регулирования целесообразно разместить по длине трубы конденсатора периодическим образом с шагом, не превышающим ее десятой части. Достаточно измерять температуру и газосодержание потока, следуя методикам Бейкера [6] и Кутателадзе – Сорокина [1]. Остальные параметры газожидкостной системы заранее известны либо вычисляются для каждого сечения трубы, в котором произведено измерение. Процесс обработки поступающей измерительной информации, формирование команд управления производится в блоке автоматического регулирования. Устройства для изменения концентрации фаз должны быть подвижными. Величина перемещений – не менее 20 % общей длины трубы конденсатора. Конкретные устройства подробно описаны в [3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ режимов течения хладагента в конденсаторе холодильной установки показал возможность увеличения ее эффективности. Методики Кутателадзе – Сорокина, Бейкера позволяют достоверно определить режим течения двухфазной среды и могут быть использованы в системе регулирования процесса теплоотдачи в конденсаторе парокомпрессионной теплообменной установки. В систему автоматического регулирования режимов течения газожидкостного потока должны быть включены датчики измерения параметров газожидкостного потока, блок обработки поступающей информации и формирования команд управления, устройства для изменения концентрации фаз, расположенные на входе и выходе конденсатора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
- [2] Маке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Ж.-Л. Учебник по холодильной технике: [пер. с фр.]. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 1160 с.
- [3] Лэнгли Б.К. Холодильная техника и кондиционирование воздуха. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 479 с.
- [4] Фреоны метанового ряда: справ. данные / В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.А. Кременевская, И.И. Перельштейн, Е.К. Петров; под ред. С.Л. Ривкина. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 264 с.
- [5] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
- [6] Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н.С. Кольцевые двухфазные течения. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
- [7] Борис А.А., Лягов А.В. Определение режима течения потоков газожидкостной смеси в трубопроводах на установках путевого сброса воды Арланской группы месторождений ОАО «АНК Башнефть» [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело. – 2012. – №2. – С. 66–78. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Boris/Boris\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Boris/Boris_1.pdf) (дата обращения: 27.12.2013).

- [8] Бердников В.С., Митин К.А. Сопряженный конвективный теплообмен в вертикальном слое жидкости // Вестн. НГУ. Серия: Физика. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 70–79.
- [9] Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: Наука, 1987. – 272 с.
- [10] Терехов В.И., Калинин С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы: (обзор). Ч. 1. Теплопроводность наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 1. – С. 1–18.
- [11] Choi S.U.S. Nanofluids: From Vision to Reality Through Research // J. of Heat Transfer. – 2009. – Vol. 131, № 3. – P. 033106-1–033106-9.
- [12] Terekhov V.I., Ekaid, A.L. Natural convection between vertical parallel plates with asymmetric heating and cooling // Proc. of the 6th Baltic Heat Transfer Conference (Aug. 24-26, 2011, Tampere, Finland). – 2011. – № 185. – P. 11.
- [13] Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements / W. Yu, D.M. France, J.L. Routbort, S.U.S. Choi // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 29, № 5. – P. 432–460.
- [14] Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
- [15] Rifert V.G., Ozimay S.S. The analysis of the regimes of phases flow and of methods of calculation of heat transfer during the condensation inside the horizontal tubes // Heat Transfer in Condensation: Proc. of the Eurotherm Seminar, Oct. 4–5 1995, Paris (France). – Paris, 1995. – P. 78–85.
- [16] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассообмен и гидродинамика в газокапельных потоках. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 284 с.
- [17] Усачев А.П., Рулев А.В. Определение интенсивности теплообмена в проточных испарителях пропан-бутановых смесей с кипением жидкой фазы [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело. – 2012. – С. 376-385. – URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Usachev/Usachev\\_6.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Usachev/Usachev_6.pdf) (дата обращения: 27.12.2013).
- [18] Воевода А.А., Вороной В.В. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Науч. вестн. НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.
- [19] Воевода А.А., Вороной В.В., Шоба Е.Б. Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной на примере трёх массовой // Науч. вестн. НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–22.

*Гужов Владимир Иванович*, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптические и информационные технологии. Имеет более 150 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: [vig@edu.nstu.ru](mailto:vig@edu.nstu.ru)

*Сажин Андрей Игоревич* – студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [Andriano92@mail.ru](mailto:Andriano92@mail.ru)

*Сажин Игорь Александрович*, доцент кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета, доцент, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований – гидравлика газожидкостных систем. Имеет 15 публикаций. E-mail: [sajinia@ngs.ru](mailto:sajinia@ngs.ru)

### ***Control of the refrigerant state in the condenser of the refrigeration vapor compression system for heat transfer enhancement\****

V.I. GUZHOV<sup>1</sup>, A.I. SAZHIN<sup>2</sup>, I.A. SAZHIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor, e-mail: [vig@edu.nstu.ru](mailto:vig@edu.nstu.ru)

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student, e-mail: [Andriano92@mail.ru](mailto:Andriano92@mail.ru)

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, he Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor, e-mail: [fadd@fb.nstu.ru](mailto:fadd@fb.nstu.ru)

The real duty cycle of the vapor compression refrigeration system is considered. Thermophysical parameters of the refrigerant at the inlet, outlet and in the intermediate sections of the condenser tubes are given. The values of the Kutateladze-Sorokin and Baker complexes are calculated. The analysis of refrigerant flow regimes using the Kutateladze – Sorokin and Baker diagrams is made. The values of the Nusselt numbers and heat transfer coefficients are defined. The possibility of increasing the size of the area with the highest emissivity is proved. The expansion of the annular flow regime size increases the efficiency of the condenser of the vapor compression refrigeration system and leads to a reduction in friction loss. Decreasing the refrigerant temperature eliminates the gas phase at the condenser outlet. A system of automatic control of the refrigerant state for the heat transfer enhancement containing refrigerant state sensors, a processing unit of incoming information and the formation of control instructions, and actuators to change the concentration phase, is proposed.

**Keywords:** control of technical systems, refrigeration unit, condenser, the duty cycle, the refrigerant flow regime maps, Kutateladze - Sorokin and Baker diagrams, gas phase, Nusselt number, heat

\* Manuscript received on 14 January 2013.

## REFERENCES

- [1] Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 416 p.
- [2] Cauchepin J.-L., Maake W., Eckert H.-J. *Manuel Technique du Froid. Bases-composants-calculs. Montage, Conduite, Maintenance des installations frigorifiques*. Paris, PYC Edition, 1993, 1204 p. (Russ. ed.: Macke B., Eckert G.-J., Cauchy J.-L. *Uchebnik po kholodil'noi tekhnike*. Translated from french. Moscow, MSU Publ., 1998. 1160 p.).
- [3] Langley B.K. *Refrigeration and air conditioning*. Reston, Virginia, Reston Publ. Company, Inc., 1978. (Russ. ed.: Langley B.K. *Kholodil'naia tekhnika i konditsionirovanie vozdukh*. Moscow, Light and Food Industry Publ., 1981. 479 p.).
- [4] Altunin V.V., Geller V.Z., Kremenevskaya E.A., Perelstein I.I., Petrov E.K. *Teplofizicheskie svoystva freonov. T. 1. Freony metanovogo riada. Spravochnye dannye* [Thermophysical properties of CFCs. Vol. 1. Freons of the methane series. Reference data]. Moscow, House of Standards Publ., 1980. 232 p.
- [5] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel E.K. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energy Publ., 1975. 486 p.
- [6] Hewitt J. and Hall-Taylor N.S. *Annular two-phase Flow*. New York, Oxford, 1970, Pergamon Press. (Russ. ed.: Hewitt J. and Hall-Taylor N. *Kol'tsevye dvukhfaznye techeniia*. Moscow, Energy Publ., 1974. 408 p.).
- [7] Boris A.A., Lyagov A.V. *Opredelenie rezhima techeniia potokov gazozhidkostnoi smesi v truboprovodakh na ustanovkakh putevogo sbrosa vody Arlanskoii gruppy mestorozhdenii OAO ANK Bashneft'* [Determination of flow regime in gas-liquid mixture flows on pipelines installations track water discharge Arlan group of fields of Bashneft']. *Oil and Gas Business*, 2012, no. 2. Available at: [http://www.ogbus.ru/authors/Boris/Boris\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Boris/Boris_1.pdf) (Accessed 27 December 2013).
- [8] Berdnikov V.S., Mitin K.A. *Sopriazhennii konvektivnyi teploobmen v vertikal'nom sloe zhidkosti* [Conjugate convective heat transfer in a vertical fluid layer]. *Vestnik NGU [Vestnik Novosibirsk State University. Series: Physics]*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 70-79.
- [9] Kutateladze S.S., Voltchkov E.P., Terekhov V.I. *Aerodinamika i teplomassoobmen v ogranichennykh vikhrevykh potokakh* [Aerodynamics and heat transfer in confined vortex flows]. Novosibirsk, 1987. 272 p.
- [10] Terekhov V.I., Kalina S.V., Lemanov V.V. *Mekhanizm teploperenosa v nanozhidkostiakh: sovremennoe sostoianie problem. (Obzor). Ch. 1. Teploprovodnost' nanozhidkosti* [Mechanism of heat transfer in nanofluids: current state of the problem. (Review). Pt. 1. The thermal conductivity of nanofluids]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 1-18.
- [11] Choi S.U.S. *Nanofluids. From Vision to Reality Through Research*. *J. of Heat Transfer*, 2009, vol. 131, no. 3, pp. 033106-1-033106-9.
- [12] Terekhov V.I., Ekaid, A.L. *Natural convection between vertical parallel plates with asymmetric heating and cooling*. Proc. of the 6th Baltic Heat Transfer Conference (August 24-26, 2011, Tampere, Finland). Tampere, 2011, no. 185, pp. 11.
- [13] Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. *Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements*. *Heat Transfer Engineering*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 432-460.
- [14] Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 296 p.
- [15] Rifert V.G., Ozimay S.S. *The analysis of the regimes of phases flow and of methods of calculation of heat transfer during the condensation inside the horizontal tubes*. *Heat Transfer in Condensation. Proc. of the Eurotherm Seminar*, Oct. 4-5 1995, Paris (France). Paris, 1995, pp. 78-85.
- [16] Terekhov V.I., Pakhomov M.A. *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapel'nykh potokakh* [Heat and mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet flows]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 284 p.
- [17] Usachev A.P., Rulev A.V. *Opredelenie intensivnosti teploobmena v protochnykh ispariteliakh propan-butanovykh smesei s kipieniem zhidkoi fazy* [Determination of the intensity of heat transfer in a flow evaporators propane-butane mixture with boiling liquid phase inside pipe]. *Oil and Gas Business*, 2012, no. 6, pp. 376-385. Available at: [http://www.ogbus.ru/authors/Usachev/Usachev\\_6.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Usachev/Usachev_6.pdf) (Accessed 27 December 2013).
- [18] Voevoda A.A., Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulatorov zadannoi struktury* [Polynomial method for calculating multi-channel controllers of a given structure]. *Nauch. vestn. NGTU [Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University]*, 2013, vol. 2, no. 51, pp. 214-218.
- [19] Voevoda A.A., Voronoi V.V., Shoba E.V. *Modal'nyi sintez mnogokanal'nogo reguljatora ponizhennogo porjadka s ispol'zovaniem «ob-ratnoj» proizvodnoj na primere trjohmassovoi sistemy* [Modal synthesis of multi-channel low-order controller using the "reverse" derivative principle for three-mass system]. *Nauchnyi vestnik NGTU [Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University]*, 2012, no. 46, vol. 1, pp. 15-22.