

DOI: 10.24143/1812-9498-2019-2-16-23
УДК [622.276.53]:[621.548:621.311.24]:[532:536.24]

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОГИДРОЦИКЛОНЕ ДЛЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ НЕФТИ

Н. Д. Шишкин, М. А. Марышева

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Предложена модернизация конструкции термогидроциклона (ТГЦ), в которой охлаждение, застывание и нагрев осуществляются в одном непрерывном процессе. Сокращается время полного цикла очистки нефти от парафина, повышаются производительность и КПД установки. Приведена технологическая схема ТГЦ непрерывного действия. Рассмотрены общие предпосылки и упрощающие допущения для математического моделирования процессов фазового перехода (плавления и затвердевания). Аналитически решены дифференциальные уравнения по теплообмену при плавлении и затвердевании в коническом слое парафина. Получены формулы для определения толщины конического слоя новой фазы, времени образования новой твёрдой фазы и средней плотности теплового потока в коническом слое на стенке ТГЦ. Учтено влияние центробежных сил инерции. Формулы для расчёта основных параметров обобщены в виде степенных критериальных уравнений, связывающих критерии Фурье (Fo), Косовича (Ko) и Померанцева (Po) при квазикондуктивном нестационарном теплообмене в ТГЦ.

Ключевые слова: парафинистая нефть, депарафинизаторы нефти, термогидроциклон, товарный парафиновый продукт, интенсивность теплообмена, толщина слоя парафина.

Для цитирования: *Шишкин Н. Д., Марышева М. А.* Аналитическое исследование теплообмена в термогидроциклоне для промышленной депарафинизации нефти // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2019. № 2 (68). С. 16–23. DOI: 10.24143/1812-9498-2019-2-16-23.

Введение

В мировой добыче нефти с каждым годом увеличивается доля тяжёлых нефтей, обогащённых высокоплавкими парафиновыми углеводородами. При добыче и транспортировке таких нефтей, особенно в холодных климатических условиях, могут возникать серьёзные проблемы из-за накоплений асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), состоящих на 85–95 % из парафина, на поверхности нефтепромыслового оборудования. Эти отложения уменьшают общую продуктивность скважины, производительность нефтепроводов и оборудования для подготовки нефти, как следствие, эффективность добычи нефти в целом [1–5]. Поэтому достаточно актуальной представляется разработка депарафинизатора на основе термогидроциклона (ТГЦ) с частичным удалением АСПО (главным образом парафина, используемого в дальнейшем как дополнительного, более дорогого, чем сама нефть, продукта) [6, 7]. Следует, однако, отметить, что циклический характер процессов кристаллизации и плавления создаёт значительные трудности для эксплуатации ТГЦ периодического действия. Мы предлагаем усовершенствовать ТГЦ, сделав его работу непрерывной.

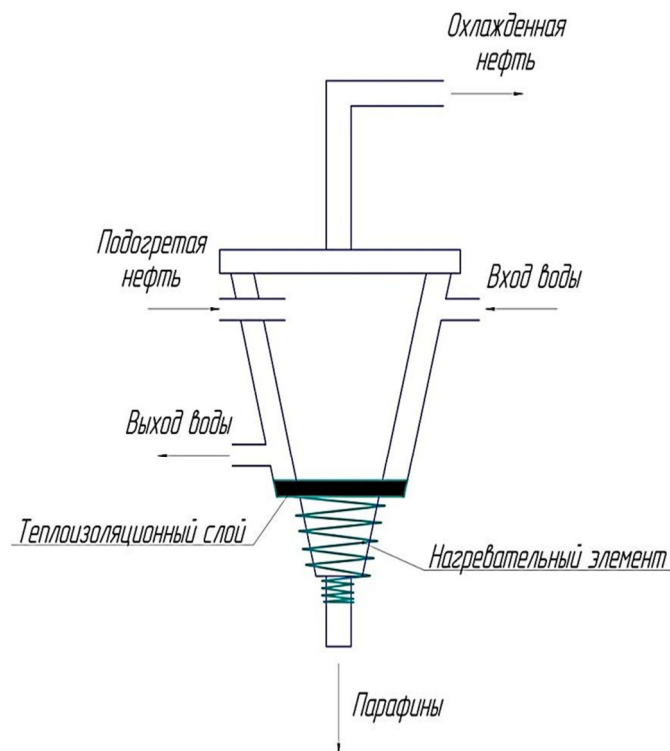
Ранее на основе экспериментального исследования гидродинамических параметров процесса оседания частиц парафина была выполнена оценка размеров кристаллов парафина в ТГЦ, определены удельная производительность и эффективность ТГЦ. Однако для уточнения технологических параметров и конструктивных размеров ТГЦ необходимо, наряду с гидравлическими, изучить и тепловые процессы фазового перехода застывания (кристаллизации) парафина при охлаждении стенки ТГЦ и плавления при нагревании стенки. Это особенно важно для ТГЦ непрерывного действия для реализации процессов оседания и кристаллизации частиц парафина на стенках гидроциклона, плавления этого слоя и удаление его из ТГЦ.

Целью настоящей работы является аналитическое исследование теплообмена в ТГЦ.

Задачи исследования: модернизация конструкции ТГЦ для осуществления непрерывной работы за счёт реализации непрерывного одновременного процесса кристаллизации и плавления парафина в одном корпусе ТГЦ, а также аналитическое исследование теплообмена при кристаллизации парафина с учётом интенсификации теплообмена за счёт центробежных сил инерции для твёрдых частиц, оседающих на охлаждаемую поверхность.

Модернизация конструкции термогидроциклона

Предложенное совершенствование технологической схемы ТГЦ заключается в совмещении процессов охлаждения, застывания и нагрева парафинистых отложений в один непрерывный процесс. Для этого в нижней части модернизированного ТГЦ предлагается уменьшить размер охлаждающей рубашки и установить на её место нагревательный элемент, поддерживающий оптимальный температурный режим (рис.).



Технологическая схема ТГЦ непрерывного действия

Данное усовершенствование ТГЦ позволяет сократить время полного цикла очистки нефти от парафина, тем самым повысив производительность и КПД установки.

Для проектирования ТГЦ непрерывного действия прежде всего необходимо аналитическое исследование теплообмена при кристаллизации парафина с учётом интенсификации теплообмена за счёт центробежных сил инерции для твёрдых частиц, оседающих на охлаждаемую поверхность.

Общие предпосылки и упрощающие допущения для математического моделирования процессов фазового перехода в коническом слое парафина на стенках термогидроциклона

Рассмотрим общие предпосылки и упрощающие допущения для математического моделирования процессов фазового перехода (плавления и затвердевания). Процесс агрегатного превращения локализуется во фронте превращения вещества в виде прослойки твёрдой и жидкой фазы. Фазовые переходы сопровождаются не только кондуктивным, но и конвективным теплообменом. Учёт увеличения интенсивности теплообмена в жидкой фазе, по сравнению с кондуктивным теплообменом, возможен с помощью коэффициента конвекции. Этот коэффициент при наличии естественной конвекции, как представлено в работе [8], при значениях критерия Рэлея $Ra > 10^3$ определялся по формуле

$$\epsilon_k = 0,18 \text{Ra}^{0,25}.$$

В ТГЦ увеличение интенсивности теплообмена в жидкой фазе при затвердевании парафина на его охлаждаемой стенке обусловлено наличием центробежных сил инерции. Отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести называют фактором разделения, а применительно к ТГЦ можно назвать модифицированным критерием Фруда [9, 10]:

$$\text{Fr}_ц = \frac{2U}{Dg},$$

где U – тангенциальная скорость потока жидкости (парафинистой нефти) в верхней части ТГЦ, м/с; D – диаметр верхней части ТГЦ, м; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Можно предположить, что коэффициент увеличения интенсивности теплообмена за счёт центробежных сил инерции:

$$\epsilon_ц = A \text{Fr}_ц^n, \quad (1)$$

где A – эмпирический коэффициент; n – показатель степени влияния $\text{Fr}_ц$ на интенсивность теплообмена. Коэффициент A и показатель степени n могут быть определены только на основе экспериментальных исследований.

Поскольку интенсивность поглощения (выделения) теплоты в зоне фазового превращения существенно превышает подвод (отвод) теплоты из неё за счёт теплопроводности, а точнее – квазикондуктивности центробежных сил инерции, то размеры такой зоны стремятся к минимуму. Процесс агрегатного состояния парафина локализуется в узком объёме, так называемом фронте превращения вещества. Во фронте превращения вещества тепловой поток от поверхности раздела в новую фазу:

$$Q_1 = Q_\phi + Q_2,$$

где Q_ϕ , Q_2 – тепловой поток фазового превращения и тепловой поток, подводимый к фронту из исходной фазы.

Градиент температур в исходной фазе практически равен нулю, и поэтому тепловой поток $Q_2 \approx 0$. Градиент температур в новой фазе зависит от вида распределения температур, определяемого геометрией слоя парафина. В коническом слое, как в цилиндрическом слое, может быть принято логарифмическое распределение температур. Градиент температур в новой фазе может быть принят равным градиенту температур при стационарной теплопроводности. Рассмотрим процессы плавления (затвердевания) в коническом слое парафина.

Анализ теплообмена при плавлении и затвердевании в коническом слое парафина

Тепловой поток при фазовом переходе на границе раздела фаз конического, как и цилиндрического слоя, может быть определён по формуле

$$Q_\phi = 2\pi R L r \rho \left(\frac{dR}{d\tau} \right), \quad (2)$$

где R , L – текущее значение радиуса и длина конического слоя, м; $dR/d\tau$ – скорость продвижения новой фазы в радиальном направлении, м/с; r – удельная теплота кристаллизации (плавления), Дж/(кг·К); ρ – плотность новой фазы, кг/м³.

Тепловой поток в новую фазу:

$$Q_1 \approx 2\pi\lambda L \frac{\Delta t}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (3)$$

где R_1 , R_2 – начальное и конечное значение радиус-вектора цилиндрического слоя, м; λ – коэффициент теплопроводности новой фазы, Вт/(м·К); Δt – разность температур, К.

Приравнивая правые части уравнений (2) и (3), разделяя переменные и интегрируя в пределах толщины новой фазы

$$\ln \frac{R_2}{R_1} \int_{R_1}^{R_2} R dR = \frac{\lambda}{r \rho} \Delta t \int_0^{\tau} d\tau,$$

получаем

$$R_2^2 - R_1^2 = \frac{2\lambda\Delta t\tau}{\ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Учитывая, что толщина слоя $\delta_K = R_2 - R_1$, разность квадратов радиус-векторов $R_2^2 - R_1^2 = (R_2 + R_1)(R_2 - R_1)$, а также вводя относительную толщину цилиндрического слоя $\Delta_K = \frac{\delta_K}{R_1}$, определяем толщину конического слоя новой фазы:

$$\delta_K = \Psi_{\delta K} \sqrt{\frac{2\lambda\Delta t\tau_K}{r\rho}} = \Psi_{\delta K} \sqrt{\frac{2ac\Delta t\tau_K}{r}}, \quad (4)$$

где $\Psi_{\delta K}$ – геометрический параметр конического слоя; Δt – разность температур, К; a – коэффициент температуропроводности новой фазы, м²/с; c – удельная теплоёмкость новой фазы, Дж/(кг·К); τ_K – время образования новой фазы, с.

Геометрический параметр определяется по формуле

$$\Psi_{\delta K} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{2}{\Delta_K}\right) \ln(1 + \Delta_K)}}. \quad (5)$$

Из формулы (4) может быть выражено время образования новой фазы в зависимости от толщины слоя новой фазы, разности температур и теплофизических свойств слоя парафина:

$$\tau_K = \frac{1}{2} \Psi_{\tau K} \frac{r\delta_K^2}{ac\Delta t}, \quad (6)$$

где $\Psi_{\tau K}$ – геометрический параметр, учитывающий влияние формы слоя парафина на время процесса, определяемый по формуле

$$\Psi_{\tau K} = \left(1 + \frac{2}{\Delta_K}\right) (1 + \Delta_K). \quad (7)$$

Средняя плотность теплового потока в коническом слое со средним радиусом $R_{CP} = 0,50(R_1 + R_2)$ в момент времени τ_K :

$$q_K^{CP} = \Psi_{qK} \sqrt{\frac{ac\rho^2\Delta t\tau_K}{2}}, \quad (8)$$

где Ψ_{qK} – геометрический параметр, учитывающий влияние формы слоя парафина на плотность теплового потока, определяемый по формуле

$$\Psi_{qK} = \frac{2}{\left(1 + \frac{2}{\Delta_K}\right) \ln(1 + \Delta_K)} = \frac{2}{\Psi_{\tau K}^2} = 2\Psi_{\delta K}^2. \quad (9)$$

Обобщение полученных зависимостей (4)–(9) для определения толщины конического слоя новой фазы δ_K , времени образования новой твёрдой фазы τ_K и средней плотности теплового потока в коническом слое q_K^{CP} на стенке ТГЦ с учётом коэффициента увеличения интенсивности теплообмена за счёт центробежных сил инерции, определяемого по формуле (1), возможно на основе критериальных зависимостей в соответствии с теорией подобия.

Критериальные зависимости для процесса отложения парафина в термогидроциклоне

Как и в работе [8], критериальные зависимости для процесса в ТГЦ связывают критерии Фурье (Fo), Косовича (Ko) и Померанцева (Po) при квазикондуктивном нестационарном теплообмене. Критерий Fo , характеризующий связь между физическими свойствами, размерами тела и скоростью изменения в нём полей температуры при квазикондуктивном нестационарном теплообмене, определяется по формуле

$$Fo = \frac{a\tau_k}{\delta_k^2}.$$

Критерий Ko , характеризующий соотношение между теплотой фазового перехода и теплотой переохлаждения вновь образующейся фазы, определяется по формуле

$$Ko = \frac{r}{c \Delta t}.$$

Критерий Po , характеризующий соотношение между интенсивностью внутренних источников теплоты при фазовом переходе и теплотой, передаваемой теплопроводностью, определяется по формуле

$$Po = \frac{r\rho\delta_k^2}{\tau_k\lambda\Delta t}.$$

Опыт исследований теплообмена подтверждает, что практически сколь угодно сложный теплообмен может быть описан критериальными уравнениями степенного вида [11]. Зависимость критерия Fo от критерия Ko с учётом выражения для коэффициента конвекции $\epsilon_{\text{ц}}$ можно представить в виде критериального уравнения

$$Fo = B Ko^m Fr_{\text{ц}}^n,$$

где B – числовой коэффициент; m, n – показатель степени.

Зависимость критерия Po от критериев Ko и Fo , а следовательно, с учётом поправки $\epsilon_{\text{ц}}$ на конвективный (за счёт центробежных сил) характер теплообмена в зазоре, критериальное уравнение для определения критерия Po может быть представлено в виде степенной зависимости вида

$$Po = CKo^p Fo^s Fr_{\text{ц}}^n,$$

где C – числовой коэффициент; p, s – показатели степени.

В дальнейшем будет произведена проверка полученных аналитических зависимостей для определения толщины конусного слоя, времени процессов фазовых переходов в процессе воздействия центробежных сил на поток на основе проведения экспериментов по затвердеванию и плавлению на лабораторной установке. Будут также определены числовые коэффициенты и показатели степени в критериальных уравнениях. Это позволит уточнить ранее полученные на основе исследования гидродинамических параметров процесса оседания частиц парафина значения конструктивных размеров и технологических параметров ТГЦ не только периодического, но и непрерывного действия.

Выводы

1. Предложенная модернизация конструкции ТГЦ позволяет совместить процессы охлаждения, застывания и нагрева в один непрерывный процесс. Термогидроциклон позволяет сократить время полного цикла очистки нефти от парафина, тем самым повысив производительность и КПД установки.

2. На основе аналитических решений дифференциальных уравнений по теплообмену при плавлении и затвердевании в коническом слое парафина получены формулы для определения толщины конического слоя новой фазы, времени образования новой твёрдой фазы и средней плотности теплового потока в коническом слое на стенке ТГЦ с учётом коэффициента увеличения интенсивности теплообмена за счёт центробежных сил инерции.

3. Полученные формулы для расчёта основных параметров обобщены в виде степенных критериальных уравнений, связывающих критерии Фурье (Fo), Косовича (Ko) и Померанцева (Po) при квазикондуктивном нестационарном теплообмене в ТГЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каюмов М. Ш., Тронов В. П., Гуськов И. А., Липаев А. А. Учёт особенностей образования асфальтосмолопарафиновых отложений на поздней стадии разработки нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2006. № 3. С. 48–49.
2. Петрова Л. М., Форс Т. Р., Юсупова Т. Н., Мухаметшин Р. З., Романов Г. В. Влияние отложения в пласте твёрдых парафинов на фазовое состояние нефтей в процессе разработки месторождений // Нефтехимия. 2005. Т. 45. № 3. С. 189–195.
3. Тронов В. П. Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. М.: Недра, 1970. 192 с.
4. Исламов М. К. Разработка и внедрение удалителей асфальто-смолистых и парафиновых отложений на нефтяном оборудовании: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2005. 125 с.
5. Баймухаметов М. К. Совершенствование технологий борьбы с АСПО в нефте-промысловых системах на месторождениях Башкортостана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2005. 16 с.
6. Марышева М. А., Шишкин Н. Д. Разработка конструкций и оценка параметров промысловых депарафинизаторов с получением товарной битумпарафиновой смеси // Материалы 61-й Междунар. конф. науч.-пед. работников Астрахан. гос. техн. ун-та (Астрахань, 24–28 апреля 2017 г.). Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. № гос. регистрации 0321702684. URL: <http://astu.org/Content/Page/5833> (дата обращения: 08.04.2019).
7. Коренский В. В., Шишкин Н. Д., Мамитов Д. С. Экспериментальное определение параметров термогидроциклона для депарафинизации нефти // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. 260 с.
8. Шишкин Н. Д., Цымбалюк Ю. В. Фазопереходные тепловые аккумуляторы с высокотеплопроводными инклюзивами. Астрахань: Саратов. науч. центр РАН, 2006. 120 с.
9. Башаров М. М., Сергеева О. А. Устройство и расчёт гидроциклонов: учеб. пособие. Казань: Вест-фалика, 2012. 92 с.
10. Адельшин А. Б., Селюгин А. С. Математическая модель гидродинамики потоков в напорном гидроциклоне // Изв. вузов. Сер.: Строительство. 1991. № 12. С. 71–75.
11. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 326 с.

Статья поступила в редакцию 22.04.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шишкин Николай Дмитриевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры технологических машин и оборудования; n.shishkin-53@mail.ru.

Марышева Марина Александровна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры технологических машин и оборудования; vjuvfhbyf@mail.ru.



ANALYTICAL STUDY OF HEAT TRANSFER IN THERMOHYDROCYCLON FOR COMMERCIAL DEWAXING OF OIL

N. D. Shishkin, M. A. Marysheva

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article considers modernization of the design of thermohydrocyclone (THC), where cooling, solidification and heating mechanisms are carried out in one continuous process. This reduces the time of the complete cycle of oil removal from paraffin, increases the productivity

and efficiency of the plant. The technological scheme of continuous operation THC is presented. The general factors and simplifying allowances for mathematical modeling of phase transition processes (melting and solidification) are considered. Differential equations for heat transfer in the course of paraffin melting and solidification in a conical layer have been solved analytically. Formulas for determining thickness of the conical layer of the new phase, time of formation of a new solid phase, and average density of the heat flow in the conical layer on a THC wall have been derived. The effect of centrifugal inertia forces is taken into account. The formulas for calculating the basic parameters are summarized in the form of power criterion equations linking Fourier criteria (Fo), Kosovich criteria (Ko) and Pomrantsev criteria (Po) under the quasiconductive non-stationary heat exchange in THC.

Key words: paraffinic oil, oil deparaffinizers, thermohydrocyclone, commercial paraffin product, heat exchange intensity, thickness of paraffin layer.

For citation: Shishkin N. D., Marysheva M. A. Analytical study of heat transfer in thermohydrocyclone for commercial dewaxing of oil. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2019;2 (68): 16-23. (In Russ.) DOI: 10.24143/1812-9498-2019-2-16-23.

REFERENCES

1. Kayumov M. Sh., Tronov V. P., Gus'kov I. A., Lipaev A. A. Uchyot osobennostej obrazovaniya asfal'tosmoloparaffinovyh otlozhenij na pozdnej stadii razrabotki neftyanyh mestorozhdenij [Taking into account features of forming asphalt-resin-paraffin deposits at late stage of oil field development]. *Neftyanoe hozyajstvo*, 2006, no. 3, pp. 48-49.
2. Petrova L. M., Fors T. R., Yusupova T. N., Muhametshin R. Z., Romanov G. V. Vliyanie otlozheniya v plaste tvyordyh paraffinov na fazovoe sostoyanie neftej v processe razrabotki mestorozhdenij [Influence of depositing hard paraffins in formation on phase state of oils during field development]. *Neftekhimiya*, 2005, vol. 45, no. 3, pp. 189-195.
3. Tronov V. P. *Mekhanizm obrazovaniya smolo-paraffinovyh otlozhenij i bor'ba s nimi* [Mechanism of formation of resin-paraffin deposits and their control]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 192 p.
4. Islamov M. K. *Razrabotka i vnedrenie udalitelej asfal'to-smolistyh i paraffinovyh otlozhenij na neftyanom oborudovanii: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and implementation of removers of asphalt-resinous and paraffin deposits on oil equipment: diss. cand. tech. sci.]. Ufa, 2005. 125 p.
5. Bajmuhametov M. K. *Sovershenstvovanie tekhnologij bor'by s ASPO v nefte-promyslovyyh sistemah na mestorozhdeniyah Bashkortostana: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving anti-paraffin control technologies in oilfield systems in fields of Bashkortostan: diss. abstr cand. tech. sci.]. Ufa, 2005. 16 p.
6. Marysheva M. A., Shishkin N. D. Razrabotka konstrukcij i ocenka parametrov promyslovyyh deparaffinizatorov s polucheniem tovarnoj bitumparaffinovej smesi [Development of designs and evaluation of parameters of commercial dewaxing agents to produce marketed bitumen-paraffin mixture]. *Materialy 61-j Mezhdunarodnoj konferencii nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Astrahan', 24-28 aprelya 2017 g.)*. Astrahan', Izd-vo AGTU, 2017. № gosudarstvennoj registracii 0321702684. Available at: <http://astu.org/Content/Page/5833> (accessed: 08.04.2019).
7. Korenskiy V. V., Shishkin N. D., Mamitov D. S. Eksperimental'noe opredelenie parametrov termogidrociklona dlya deparaffinizacii nefti [Experimental determination of thermohydrocyclone parameters for oil dewaxing]. *Novejshie tekhnologii osvoeniya mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspijskogo shel'fa*. Astrahan', Izd-vo AGTU, 2017. 260 p.
8. Shishkin N. D., Cymbalyuk Yu. V. *Fazoperekhodnye teplovyje akkumulyatory s vysokoteploprovodnyimi inkluzivami* [Phase-transition heat accumulators with highly conductive inclusions]. Astrahan', Saratovskij nauchnyj centr RAN, 2006. 120 p.
9. Basharov M. M., Sergeeva O. A. *Ustrojstvo i raschyot gidrociklonov: uchebnoe posobie* [Design and analysis of hydrocyclones: teaching guide]. Kazan', Vestfalika Publ., 2012. 92 p.
10. Adel'shin A. B., Selyugin A. S. Matematicheskaya model' gidrodinamiki potokov v napornom gidrociklone [Mathematical model of hydrodynamics of fluids in pressure hydrocyclone]. *Izvestiya vuzov. Seriya: Stroitel'stvo*, 1991, no. 12, pp. 71-75.
11. Miheev M. A. *Osnovy teploperedachi* [Basic principles of heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 326 p.

The article submitted to the editors 22.04.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shishkin Nikolay Dmitrievich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; n.shishkin-53@mail.ru.

Marysheva Marina Aleksandrovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Technological Machines and Equipment; vjyuvfhbyf@mail.ru.

