

УДК 662.986:662.643

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-37-42

## Повышение эффективности охлаждения оборотной воды в испарительных охладителях с псевдооживленным слоем

Н.О. Усмонов, Х.С. Исаходжаев

Проанализированы результаты экспериментальных исследований гидродинамики трехфазного псевдооживленного слоя. Приведены расчетные зависимости высоты трехфазного псевдооживленного слоя от плотности орошения для повышения эффективности охлаждения оборотных вод в испарительных охладителях. Определены оптимальные условия устойчивого режима работы и технологические показатели процесса охлаждения воды в трехфазном слое. Создана экспериментальная установка для проведения натурных опытов по испарительному охлаждению оборотной воды в трехфазном псевдооживленном слое и определен его фактический потенциал в реальных условиях. Установлена хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных и подтверждена достоверность выполненных исследований.

Предложена математическая модель процесса испарительного охлаждения оборотной воды в трехфазном псевдооживленном слое. На основе численной реализации установлены зависимости температур охлаждаемой воды и отработанного влажного воздуха на выходе из испарителя от относительной влажности  $\varphi$ , коэффициента орошения  $\mu$ , скорости воздуха  $W$ , температур окружающей среды  $t_o$  и входящей воды  $t_{в1}$ .

Разработаны алгоритм и программа для определения температуры выходящей воды  $t_{в2}$  и влажного воздуха  $t_{вв}$  на выходе из испарительного охладителя. Экспериментально установлена линейная зависимость энергетического коэффициента испарительного охладителя оборотной воды рассматриваемого типа от коэффициента орошения. Выявлена зависимость доли испаренной влаги в испарительном охладителе оборотной воды рассматриваемого типа от температуры охлаждаемой воды на входе в охладитель и коэффициента орошения. Предложен способ испарительного охлаждения воздуха, в котором реализована испарительная камера с трехфазным псевдооживленным слоем и регенеративным вращающимся теплообменником.

*Ключевые слова:* кондиционирование, трехфазный псевдооживленный слой, плотность орошения, испарительный охладитель, гидравлическое сопротивление, высота динамического слоя, воздушно-испарительный аппарат.

*Для цитирования:* Усмонов Н.О., Исаходжаев Х.С. Повышение эффективности охлаждения оборотной воды в испарительных охладителях с псевдооживленным слоем // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 37—42. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-37-42.

## Improving the Circulating Water Cooling Efficiency in Evaporative Fluidized-bed Coolers

N.O. Usmonov, Kh.S. Isakhodjayev

The article describes the results from experimental investigations into the hydrodynamics of a three-phase fluidized bed. Calculation dependences of the three-phase fluidized bed height on the spraying density, which can be used for achieving more efficient cooling of circulating water in evaporative coolers, are given. The optimal conditions for stable operation and the technological parameters characterizing the water cooling process in a three-phase fluidized bed are determined. An experimental setup for carrying out full-scale experiments on evaporative cooling of circulating water in a three-phase fluidized bed is constructed, and the actual potential of the evaporative water cooling technology under real conditions is determined. It is shown that the calculated and experimental data are in good agreement with each other, and validity of the accomplished investigations has been confirmed.

A mathematical model of the circulating water evaporative cooling process in a three-phase fluidized bed is proposed. Based on the numerical implementation of the proposed model, the dependences of cooled water and spent humid air temperatures at the evaporator outlet on relative humidity  $\varphi$ , spraying ratio  $\mu$ , air velocity  $W$ , and ambient air and inlet water temperatures  $t_o$  and  $t_{b1}$  have been established.

An algorithm and a program have been developed for determining the temperature of outlet water  $t_{b2}$  and humid air  $t_{bb}$  at the outlet of the evaporative cooler. A linear dependence of the circulating water evaporative cooler's energy coefficient on the spraying coefficient has experimentally been established for the considered cooler type. A dependence of the evaporated moisture fraction in the considered circulating water evaporative cooler on the cooled water temperature at the cooler inlet and on the spraying coefficient is established. An evaporative air cooling method is proposed, which is embodied by using an evaporative chamber with a three-phase fluidized bed and a regenerative rotating heat exchanger.

*Key words:* air conditioning, three-phase fluidized bed, spraying density, evaporative cooler, pressure drop, dynamic layer height, evaporative air apparatus.

*For citation:* Usmonov N.O., Isakhodjayev Kh.S. Improving the Circulating Water Cooling Efficiency in Evaporative Fluidized-bed Coolers. Bulletin of MPEI. 2019;2:37—42. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-37-42.

Интенсификация работы систем кондиционирования и охлаждения — актуальная проблема в практике испарительного охлаждения воды. Разработчиками предложен ряд решений интенсификации процесса охлаждения: выполнение части корпуса в виде диффузора, организация более высокой степени диспергирования воды, установка центробежных форсунок, изменение конструкции оросителей. Все эти меры дополнительно охлаждают воду еще на 1°C [1, 2].

Анализ работ показывает, что традиционные методы интенсификации процесса в воздушно-испарительных аппаратах (интенсивные режимы эксплуатации, компактные пучки, противоточная система охлаждения и т. д.) практически исчерпали себя и проблема очистки поверхности теплообмена от загрязнений в воздушно-испарительных теплообменниках не преодолена. Для повышения эффективности процесса охлаждения оборотной воды необходимо:

- интенсифицировать теплообмен при испарении охлаждающей воды, применяя новую технологию;
- обеспечить очистку поверхности аппарата от загрязнений;
- усиление теплообмена и очистки поверхности от загрязнений должны обеспечиваться при сравнительно невысоких затратах и габаритах оборудования.

Для решения поставленных задач целесообразно использовать трехфазный псевдооживленный слой. Результаты экспериментальных исследований теплообмена и эффективности процесса охлаждения воды на экспериментальных установках показали, что интенсификация теплообмена в аппарате с трехфазным

псевдооживленным слоем выше, чем в полном аппарате или в аппарате с неподвижной насадкой [1, 3 — 5].

Разработана и собрана экспериментальная установка для исследования гидродинамики трехфазного псевдооживленного слоя, определены оптимальные условия его устойчивого режима работы и технологические показатели процесса охлаждения воды в трехфазном слое.

Схема сконструированной установки приведена на рис. 1. Она состоит из колонны 1, систем подачи и сброса жидкости, подачи воздуха и измерительных приборов.

Рабочий участок выполнен из стекла для возможности визуального наблюдения процесса псевдооживления. Диаметр рабочего участка 104 мм, высота — 950 мм. В нижней части рабочего участка установлена опорная решетка 11 живым сечением 40%. Решетка имеет щелевые отверстия шириной 5 мм. На ней находится слой инертной насадки 17 — полые шары.

Диаметр шаров в процессе эксперимента варьировался (14 и 26 мм). В целях предотвращения уноса в верхней части рабочего участка установлено сепарирующее устройство — диск с отверстиями живым сечением 70%. В качестве оживающего газа взят атмосферный воздух. Он подавался вентилятором высокого давления в нижнюю часть рабочего участка под опорную решетку. На трубопроводе подачи воздуха установлена стандартная диафрагма 6, вторичным прибором к ней служит дифференциальный манометр. Правильность измерений расхода воздуха подтверждалась тарировкой, предварительно проведенной перед экспериментами. Расход воздуха регулировался

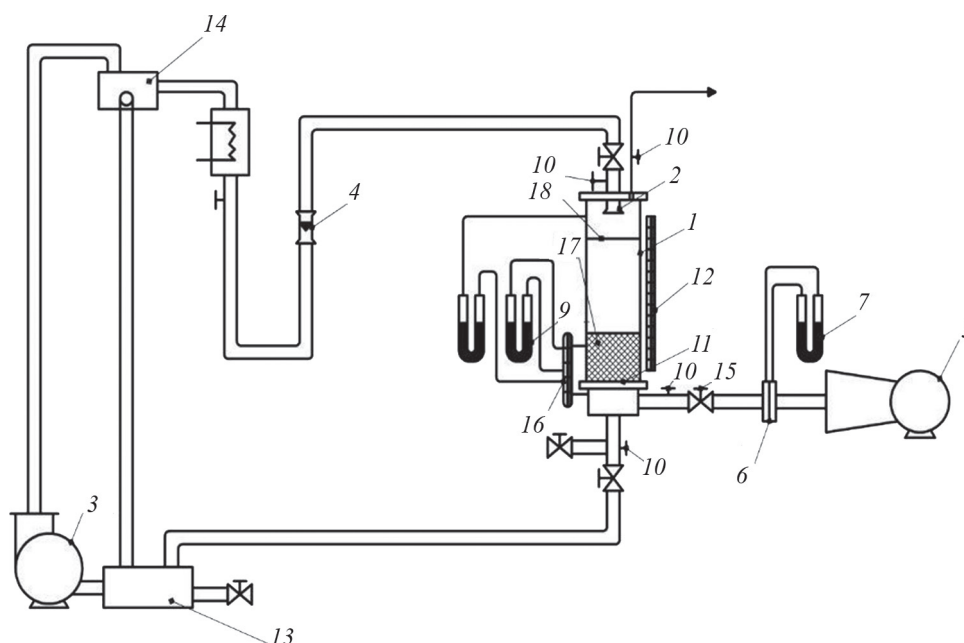


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с рабочим участком (основной элемент):

1 — колонна; 2, 10 — системы подачи и сброса жидкости; 3 — насос; 4 — ротаметр; 5 — воздушный вентилятор; 6 — диафрагма; 7, 8, 9 — дифференциальные манометры; 11 — опорная решетка; 12 — мерная линейка; 13, 14 — сливной и напорный баки; 15 — поворотная заслонка; 16 — уровень жидкости; 17 — инертная насадка

числом оборотов вентилятора, снабженного двигателем постоянного тока. Для регулировки расхода на трубопроводе подачи воздуха установлена поворотная заслонка 15. По высоте рабочего участка выставлена мерная линейка 12 для измерения высоты статического  $H_0$  и динамического  $H_d$  слоев насадки. В верхней части рабочего участка находится разбрызгивающее устройство. Вода в рабочий участок подается из напорного бака 14 с постоянным уровнем жидкости. На трубопроводе подачи воды установлен ротаметр, измеряющий расход жидкости. Вода из рабочего участка поступает в сливной бак 13. Воду в напорный бак подает насос 3. На рабочем участке установлены дифференциальные манометры 8, 9 для измерения гидравлического сопротивления опорной решетки, слоя насадки в состоянии покоя и в псевдооживленном состоянии, а также для измерения полного гидравлического сопротивления аппарата.

Эксперимент проходил в следующем порядке. Включался вентилятор, устанавливалась определенная скорость воздуха и измерялось гидравлическое сопротивление сухой распределительной решетки, затем скорость менялась и вновь фиксировалось соответствующее гидравлическое сопротивление.

Ознакомление с гидродинамическими исследованиями сопротивления сухой решетки в диапазоне  $F_{св} = 20...65\%$  в широком диапазоне изменения скорости потока показало, что у опорно-распределительных решеток со свободным сечением 30% и более сопротивление меняется незначительно, и можно определить сопротивление (с погрешностью 5%) по формуле Дарси [6]:

$$\Delta P = \xi_{р} \frac{\rho_{г} W_{г}^2}{2g}$$

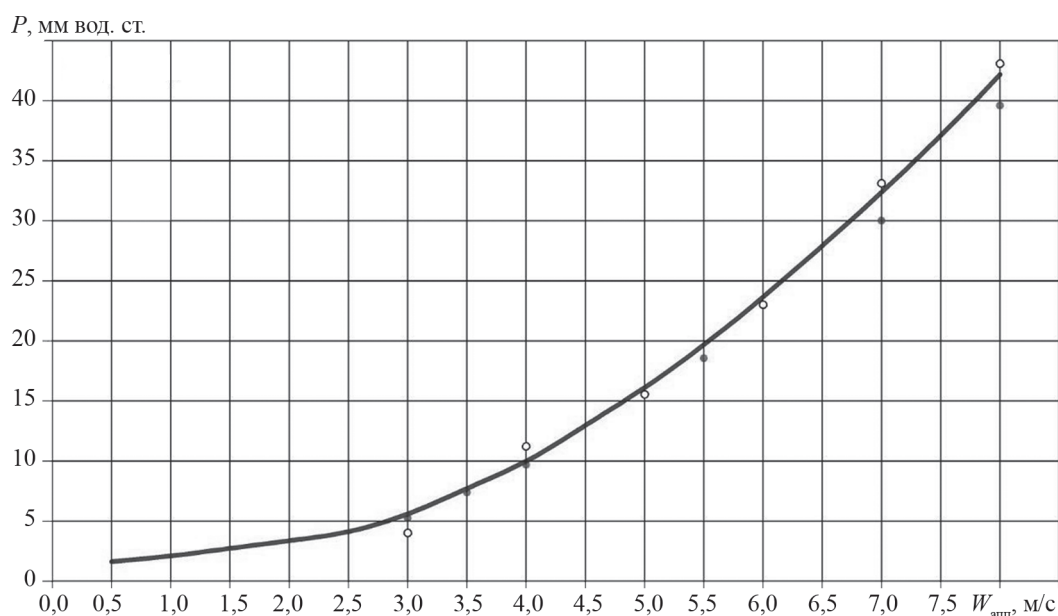


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления сухой решетки без насадки от скорости воздуха в аппарате:

— экспериментальные данные; • — данные по [8]; ○ — данные по [7]

После этого на решетку помещали шары определенного диаметра и заданной высоты слоя  $H_0$ , включали вентилятор и измеряли гидравлическое сопротивление сухой насадки сначала в спокойном состоянии. С увеличением скорости фиксировали гидравлическое сопротивление двухфазного псевдооживленного слоя, строили кривую псевдооживления и график зависимости скорости уноса от расхода воздуха.

В процессе экспериментов фиксировали высоту псевдооживленного слоя  $H_d$ , наблюдали пульсации высоты динамического слоя.

На рисунке 2 представлены результаты определения зависимости гидравлического сопротивления сухой распределительной решетки от скорости воздуха в аппарате. На графике нанесены данные В.И. Новикова, и рассчитанные по формуле Н.Г. Бляхера. Анализ показал хорошее совпадение экспериментальных и известных данных [7, 8].

После оценки погрешности эксперимента был начат основной этап с трехфазным слоем.

Включали орошение насадки и при постоянной плотности орошения фиксировали параметры трехфазного псевдооживленного слоя: гидравлическое сопротивление, скорости начала псевдооживления и уноса, высоту динамического слоя  $H_d$ , задержку жидкости в слое.

На рисунке 3 изображен график зависимости динамической высоты трёхфазного слоя от плотности орошения и скорости воздуха для случая, когда высота статического слоя равна 100 мм, а на рис. 4 — при статической высоте слоя насадки  $H_0 = 200$  мм.

Скорость в аппарате менялась в пределах от 1 до 4 м/с, плотность орошения составила  $10...30 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ .

Из анализа результатов экспериментов следует, что увеличение степени расширения псевдооживленного

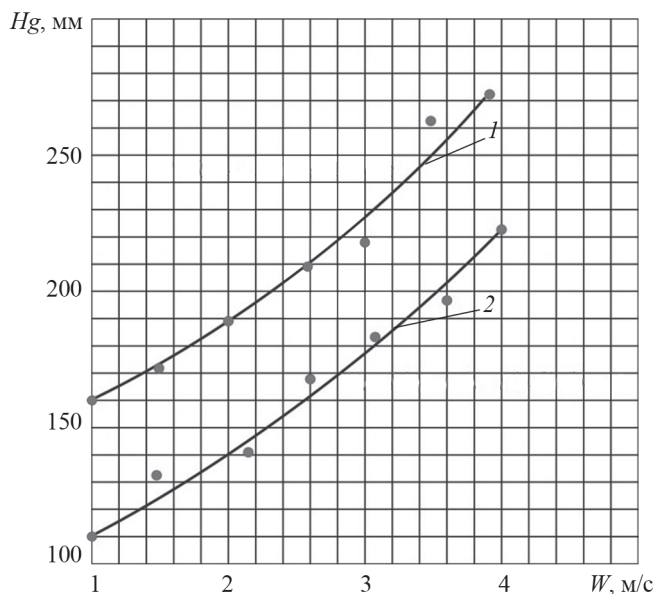


Рис. 3. Зависимость динамической высоты трехфазного псевдооживленного слоя от скорости воздуха и плотности орошения ( $H_0 = 100$ ):

— экспериментальные данные; • — данные по [8]; 1 —  $H_0 = 100$  мм,  $L = 30$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч; 2 —  $H_0 = 100$  мм,  $L = 10$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч

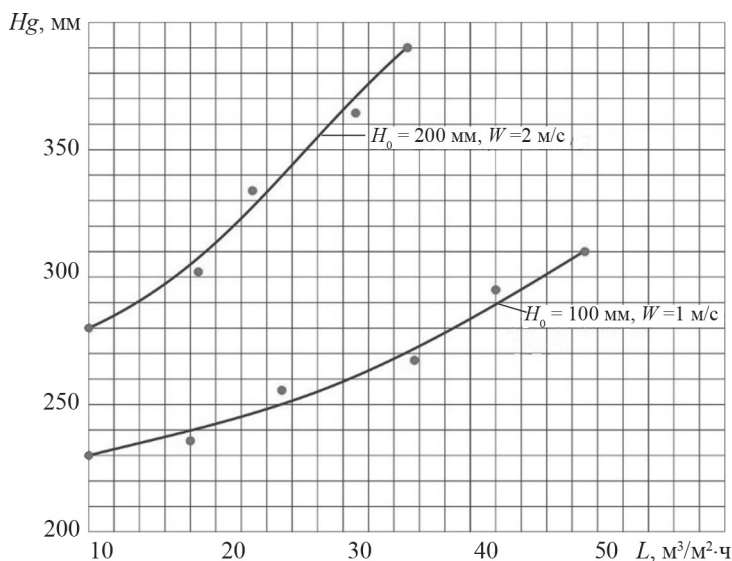


Рис. 4. Зависимость динамической высоты псевдооживленного слоя от скорости воздуха и плотности орошения ( $H_0 = 200$  мм,  $d = 14$  мм):

— экспериментальные данные; • — данные по [8]

слоя с ростом скорости и плотности орошения может достигнуть величины  $R = 5$  [9].

Полученные результаты сопоставлены с данными, рассчитанными по формуле Н. Крайнева [10]:

$$H_d = 0,13H_0^{0,9}L^{0,35}W^2.$$

Максимальное расхождение составило 14%, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Обработка экспериментальных данных по определению зависимости высоты трехфазного псевдооживленного слоя от скорости воздуха показала, что  $H_d \sim W^{0,6}$  и выражается уравнением:

$$H_d = 0,1W^{0,6}.$$

Максимальное расхождение опытных и расчетных данных — 7,4% [11].

Получено уравнение зависимости динамической высоты слоя от скорости и плотности орошения:

$$H_d = 0,22W^{0,6}L^{0,14}.$$

Таким образом, определены основные технологические параметры оптимальной работы испарительного охладителя для решения задачи охлаждения оборотной воды промышленных предприятий. Результаты экспериментов подтвердили расчетные данные исследований, а их расхождение не превышает 6,7%.

## Литература

## References

1. Вишнякова Н.В. Моделирование процесса охлаждения оборотной воды и реконструкция промышленных градирен: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Казань: Казанский химико-технологический ин-т им. С.М. Кирова, 2000.
2. Пономаренко В.С. О реконструкции вентиляторных градирен // Химическая промышленность. 1994. № 7. С. 45.
3. Колесников С.В. Разработка способов повышения эффективности оборотных систем: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2014.
4. Козак Ф.В. Исследование гидродинамики и массообмена в аппарате с псевдооживленным слоем орошаемой насадки: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Одесса: Одесский политехн. ин-т, 1979.
5. Исаходжаев Х.С. Охлаждение оборотной воды промышленных предприятий в псевдооживленном слое с твердой подвижной насадкой: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Ташкент: Ташкентский гос. техн. ун-т, 2018.
6. Куприянов В.Н., Кан С.В., Плановский А.Н., Яцко А.Д. Гидравлическое сопротивление аппарата с псевдооживленной шаровой насадкой // Труды Тамбовского ин-та химического машиностроения. 1969. № 3. С. 333—339.
7. Бляхер Н.Г., Живайкин Л.Я., Юровская Н.А. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с подвижной насадкой // Химическое и нефтяное машиностроение. 1967. № 2. С. 18—20.
8. Новиков В.И. Исследование гидравлических закономерностей аппарата с трехфазным псевдооживленным слоем инертной орошаемой насадки: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Казань: Казанский химико-технологический ин-т им. С.М. Кирова, 1972.
9. Фрякин Н.В. Исследование структуры потока и гидродинамических характеристик в аппаратах с псевдооживленным слоем орошаемой насадки: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский химико-технологический ин-т, 1978.
10. Левш И.П., Крайнев Н.И., Ниязов М.И. К расчету гидравлического сопротивления и высоты трехфазного псевдооживленного слоя // Узбекский химический журнал. 1967. № 5. С. 72—74.
11. Исаходжаев Х.С. Исследование зависимости высоты трехфазного псевдооживленного слоя от плотности орошения для повышения эффективности охлаждения оборотных вод в испарительных охладителях // Вестник ТашГТУ. 2017. № 3. С. 80—85.
12. Isakhodjayev Kh.S. Method of Calculation of Temperature of Reverse Water in The Course of Vaporizing Cooling // Europ. Appl. Sci. 2015. No.12. Pp. 35—39.

1. Vishnyakova N.V. Modelirovanie Protsessa Ohlazhdeniya Oborotnoy Vody i Rekonstruktsiya Promyshlennyh Gradiren: Avtoreferat Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Kazan': Kazanskiy Himiko-tehnologicheskii In-t im. S.M. Kirova, 2000. (in Russian).
2. Ponomarenko V.S. O Rekonstruktsii Ventilyatornyh Gradiren Himicheskaya Promyshlennost'. 1994;7:45. (in Russian).
3. Kolesnikov S.V. Razrabotka Sposobov Povysheniya Effektivnosti Oborotnyh Sistem: Avtoreferat Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Ivanovskiy Gos. Energeticheskii Un-t im. V.I. Lenina, 2014. (in Russian).
4. Kozak F.V. Issledovanie Gidrodinamiki i Massoobmena v Apparate s Psevdoozhizhennym Sloem Oroshaemoy Nasadki: Avtoreferat Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Odessa: Odesskiy Politekhn. In-t, 1979. (in Russian).
5. Isahodzhaev H.S. Ohlazhdenie Oborotnoy Vody Promyshlennyh Predpriyatiy v Psevdoozhizhennom Sloe s Tverdoy Podvizhnoy Nasadkoy: Avtoreferat Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Tashkent: Tashkentskiy Gos. Tekhn. Un-t, 2018. (in Russian).
6. Kupriyanov V.N., Kan S.V., Planovskiy A.N., Yatsko A.D. Gidravlichesкое Soprotivlenie Apparata s Psevdoozhizhennoy Sharovoy Nasadkoy. Trudy Tambovskogo In-ta Himicheskogo Mashinostroeniya. 1969;3: 333—339. (in Russian).
7. Blyaher N.G., Zhivaykin L.Ya., Yurovskaya N.A. Issledovanie Gidrodinamiki i Massoobmena v Apparatah s Podvizhnoy Nasadkoy. Himicheskoe i Neftyanoe Mashinostroenie. 1967;2:18—20. (in Russian).
8. Novikov V.I. Issledovanie Gidravlicheskih Zakonomernostey Apparata s Trekhfaznym Psevdoozhizhennym Sloem Inertnoy Oroshaemoy Nasadki: Avtoreferat Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Kazan': Kazanskiy Himiko-tehnologicheskii In-t im. S.M. Kirova, 1972. (in Russian).
9. Fryakin N.V. Issledovanie Struktury Potoka i Gidrodinamicheskikh Harakteristik v Apparatah s Psevdoozhizhennym Sloem Oroshaemoy Nasadki: Avtoreferat Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Ivanovskiy Himiko-tehnologicheskii In-t, 1978. (in Russian).
10. Levsh I.P., Kraynev N.I., Niyazov M.I. K Raschetu Gidravlicheskogo Soprotivleniya i Vysoty Trekhfaznogo Psevdoozhizhennoy Sloya. Uzbekskiy Himicheskii Zhurnal. 1967;5:72—74. (in Russian).
11. Isakhodzhaev H.S. Issledovanie Zavisimosti Vysoty Trekhfaznogo Psevdoozhizhennoy Sloya ot Plotnosti Orosheniya dlya Povysheniya Effektivnosti Ohlazhdeniya Oborotnyh Vod v Isparitel'nyh Ohladitelyah. Vestnik TashGTU. 2017;3:80—85. (in Russian).
12. Isakhodjayev Kh.S. Method of Calculation of Temperature of Reverse Water in The Course of Vaporizing Cooling. Europ. Appl. Sci. 2015;12:35—39.



**Сведения об авторах:**

**Усмонов Низомжон Орифович** — старший преподаватель кафедры теории основы теплотехники энергетического факультета Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан, e-mail: nizomiddin1981@mail.ru

**Исаходжаев Хайрилла Суннатиллаевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры теории основы теплотехники энергетического факультета Ташкентского государственного технического университета, Узбекистан

**Information about authors:**

**Usmonov Nizomzhon O.** — Senior Lecturer of Theory of Heat Engineering Dept. of Power Engineering Faculty, Tashkent State Technical University, Uzbekistan, e-mail: nizomiddin1981@mail.ru

**Isakhodjayev Khayrilla S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Theory of Heat Engineering Dept. of Power Engineering Faculty, Tashkent State Technical University, Uzbekistan

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 29.03.2018

**The article received to the editor:** 29.03.2018