МЕЛИОРАЦИЯ, РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И ОХРАНА ЗЕМЕЛЬ

Научная статья

УДК 628.16

doi: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-34-48

Эффективность и расходные характеристики гидроциклона с фильтрующим сливным патрубком

Мария Игоревна Ламскова¹, Максим Игоревич Филимонов²,
Андрей Евгеньевич Новиков³, Сергей Викторович Бородычев⁴

^{1, 2, 3}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,
Российская Федерация

^{2, 3}Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия,
Волгоград, Российская Федерация

⁴Волгоградский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация

¹lamskov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8475-9246>

²maksim.filimonov.work@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1805-5670>

³ae_novikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8051-4786>

⁴vkovniigim@yandex.ru

Аннотация. Цель: экспериментальное сравнение оптимальных режимов работы стандартного и модернизированного гидроциклонного аппарата для водоочистки на мелиоративных системах. **Материалы и методы:** проведены экспериментальные исследования, посвященные определению эффективности очистки воды от дисперсных частиц, для типового гидроциклона и усовершенствованной конструкции, в которой сливной патрубок дополнен насыпным фильтром. Модельной суспензией являлась вода с заданной концентрацией твердых частиц, размер и концентрация которых соответствовали фракционному составу примесей в природном водоеме. **Результаты и обсуждения.** В результате анализа воды природного водоисточника установлено, что массовая концентрация твердых частиц составляет 5 %, при этом 21 % от общей массы механических примесей составляют частицы размером 50 мкм и меньше. Оптимальным значением диаметра пескового патрубка типового гидроциклона ГНС-100 для разделения исследуемой суспензии является 10 мм. Такое конструктивное исполнение обеспечивает степень очистки 0,79, при этом соотношение расходов очищенной и шламовой воды составляет 3,6. Оптимальными параметрами работы гидроциклона предлагаемой конструкции является диаметр пескового патрубка 10 мм и засыпка фильтровального слоя 75 %. Такая комплектация обеспечивает эффективность разделения 0,91 при потерях воды со шламом 17 %. **Выводы:** предлагаемая конструкция гидроциклона со сливным патрубком, дополненным насыпным фильтром, позволяет повысить эффективность улавливания механических примесей на 12 % в сравнении с типовым аппаратом, что обусловлено совместной реализацией процессов гидроциклонирования и фильтрования через слой зернистой загрузки.

Ключевые слова: мелиоративные системы, орошение, гидроциклон, механические примеси, фильтрование, насыпной фильтр, водоочистка, эффективность очистки

Благодарность: статья подготовлена при поддержке гранта Президента РФ МК-2289.2020.8.

LAND RECLAMATION, RECULTIVATION AND LAND PROTECTION

Original article

Efficiency and discharge characteristics of hydrocyclone with a filter drain tube

Mariya Ig. Lamskova¹, Maksim Ig. Filimonov²,
Andrey E. Novikov³, Sergey V. Borodychev⁴

^{1, 2, 3}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

^{2, 3}All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd, Russian Federation

⁴Volgograd Branch of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation

¹lamskov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8475-9246>

²maksim.filimonov.work@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1805-5670>

³ae_novikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8051-4786>

⁴vkovniigim@yandex.ru

Abstract. Purpose: an experimental comparison of the optimal operating modes of standard and modernized hydrocyclone for water purification in reclamation systems. **Materials and methods:** experimental studies to determine the water purification efficiency from dispersed particles for standard and modernized hydrocyclone were carried out, in which the drain pipe is supplemented with a bulk filter. The water with a given concentration of solid particles, the size and concentration of which corresponded to the fractional composition of impurities in a natural reservoir was the simulative suspension. **Results and discussions.** As a result of the analysis of the water of a natural water source, it was found that the mass concentration of solid particles is 5 %, while 21 % of the total mass of mechanical impurities are particles with a size of 50 microns or less. The optimal value of the diameter of the sand pipe of a standard hydrocyclone GNS-100 for separating the investigated suspension is 10 mm. This design provides a purification degree of 0.79, while the ratio of purified and sludge water discharge is 3.6. The optimal parameters of the hydrocyclone of the proposed design are the diameter of the sand pipe 10 mm and the backfill of the filter layer 75 %. This configuration provides a 0.91 separation efficiency with a 17 % sludge water loss. **Conclusions:** the proposed design of a hydrocyclone with a drain pipe, supplemented with a bulk filter, makes it possible to increase the efficiency of trapping mechanical impurities by 12 % in comparison with a typical apparatus, which is due to the joint implementation of hydrocyclone processes and filtration through a layer of granular loading.

Keywords: reclamation systems, irrigation, hydrocyclone, mechanical impurities, filtration, bulk filter, water treatment, treatment efficiency

Acknowledgment: the work was performed under the grant of the President of the Russian Federation MK-2289.2020.8.

Введение. Мелиоративные системы нового поколения (мелкодисперсное, капельное и аэрозольное орошение) обеспечивают комплексное и целенаправленное регулирование водного режима почвы и оптимальные параметры микроклимата в агрофитоценозах, экономное расходование водных ресурсов, минимизируют вероятность развития ирригационно-

эрозионных почвенных процессов, способствуют устойчивому получению планируемых урожаев сельскохозяйственной продукции. Надежное функционирование микроводовыпусков капельных систем, а также распылительных насадок систем мелкодисперсного и аэрозольного дождевания зависит от работы узлов очистки поливной воды от механических примесей различной степени дисперсности [1, 2]. Традиционные системы водоподготовки предусматривают двух- и трехступенчатые схемы очистки: предварительная очистка на водозаборных сооружениях, удаление механических примесей на станциях водоподготовки, тонкая очистка на фильтрах перед подачей на распределительные водопроводы [3].

Отказаться от использования многоступенчатых схем водоподготовки мелиоративных систем возможно путем внедрения гидроциклонных аппаратов, характеризующихся высокими показателями производительности и эффективности очистки воды от механических примесей [4–6].

Перспективным направлением исследования процесса очистки воды в гидроциклоне является совершенствование существующих конструкций аппаратов с целью повышения эффективности улавливания тонкодисперсных примесей при сохранении расходных характеристик.

Основные направления оптимизации конструкций гидроциклонов для повышения сепарационной способности аппарата:

- разработка современных конструкций верхней разгрузочной части;
- подбор формы и размера питающего патрубка;
- подбор угла конусности и конструкции конической части;
- оптимизация конструкции сливного патрубка.

Совершенствование конструкции верхней разгрузочной части гидроциклонного аппарата направлено на возможность одновременного улавливания примесей с плотностью как больше плотности воды (песок, частицы ржавчины), так и меньше плотности воды (нефтепродукты, микроводоросли) и заключается в снабжении аппарата дополнительной сливной камерой

с отводным патрубком. Тяжелая фракция под действием центробежной силы направляется к стенке аппарата, далее по конической части опускается вниз и выводится через песковый патрубок. Легкая фракция концентрируется у оси аппарата и выводится через отводной патрубок в дополнительную сливную камеру в верхней части аппарата [7].

Перспективным решением, направленным на одновременное улавливание тяжелых и легких фракций, является дополнение гидроциклона кольцевым сорбционным фильтром, установленным коаксиально со сливным патрубком в верхней части аппарата на дисковой перегородке. При работе аппарата часть водного потока со всплывающими примесями направляется в верхнюю сборную камеру, при этом примеси задерживаются поверхностью сорбционного фильтра, а в камеру поступает уже очищенная вода [8].

Размер питающего патрубка определяет тангенциальную скорость потока жидкости в аппарате и в итоге эффективность извлечения примесей из воды. С уменьшением диаметра входного отверстия возрастает тангенциальная скорость потока, а вместе с ней центробежная сила, действующая на частицу. В результате увеличивается сепарационная способность аппарата, причем данный конструктивный параметр действует как на всплывающие частицы, так и на тяжелые фракции [7, 9, 10].

Вариант модернизации питающего патрубка представлен в патенте на полезную модель № 167820 [11]. Для регулирования расхода воды на входном патрубке устанавливается заслонка, образующая внутреннюю, прилегающую к сливному патрубку область течения жидкости и внешнюю, прилегающую к корпусу аппарата. При этом во внешнюю область подается исходная вода, а во внутреннюю – рециклом очищенная вода. Изменение площадей сечения входного патрубка в зависимости от соотношения расходов исходной и очищенной воды позволяет настраивать гидроциклон на заданную степень очистки, особенно при наличии тонко-

дисперсных фракций. При увеличении расхода фугата площадь внутренней зоны увеличивается, а внешней уменьшается, что приводит к сокращению пути и времени осаждения частиц и, следовательно, увеличению степени очистки воды от частиц дисперсной фазы.

В работе Н. А. Абдураманова [12] рассмотрено влияние формы питающего патрубка на разделяющую способность гидроциклона. Установлено, что полукруглая и квадратная форма входного отверстия обеспечивает лучшие показатели осветления воды при неизменных параметрах процесса.

Значительное влияние на эффективность работы гидроциклона оказывает конструкция конической части. Анализ процесса разделения системы «жидкость – твердое тело» при различных размерах конической части аппарата показал, что увеличение длины конуса значительно повышает эффективность оборудования, это обусловлено увеличением времени пребывания частицы в аппарате. Рекомендуемый угол конусности составляет 10–15°, дальнейшее его уменьшение и увеличение длины конической части не оказывает влияния на эффективность разделения [7, 13].

Более перспективным решением проблемы повышения сепарационной способности гидроциклонных аппаратов являются конструкции, в которых отделение примесей от воды происходит при совмещении процессов гидроциклонирования и фильтрования. В работах И. Г. Терновского, L. Svarovsky, A. Sirlene и др. [14–16] представлены конструкции аппарата с перфорированной конической частью. В таком исполнении гидроциклона во время его работы возникает дополнительный жидкостный поток, образующийся в процессе фильтрации через конус, что оказывает влияние на гидродинамику течения жидкости в аппарате, снижает технологичность процесса, так как возникает проблема отвода фильтрата и регенерации конической фильтровальной перегородки.

В работе А. Sirlene и др. [16] представлена конструкция фильтрующего гидроциклона, в котором отвод очищенной жидкости производится

через сливной патрубок конической формы, изготовленный из пористой керамической мембраны. Данная конструкция предназначена преимущественно для извлечения легких фракций из воды из-за трудоемкости регенерации мембраны при выделении механических примесей и высоких значений гидравлического сопротивления.

Повысить эффективность процесса гидроциклонирования возможно путем организации в сливном патрубке фильтрационного процесса [17].

Целью работы является экспериментальное сравнение режимов работы гидроциклона ГНС-100 с типовым исполнением сливного патрубка и с размещением в нем насыпного фильтра с цеолитовой загрузкой.

Материалы и методы. В качестве типового водоисточника орошения Волгоградской области был выбран Волго-Донской судоходный канал. Определение массовой концентрации механических примесей в пробах воды проводили гравиметрическим методом по РД 52.24.468-2005.

Гранулометрический состав механических примесей, находящихся в воде, определяли ситовым методом по ГОСТ 12536-2014.

Лабораторные опыты по очистке воды от механических примесей проводили с помощью экспериментальной установки, схема которой представлена на рисунке 1. Основным узлом установки выступает цилиндрико-конический гидроциклон 1 со сменным сливным патрубком 2. Такая конструкция гидроциклона обеспечивает определение эффективности отделения механических примесей из воды при различных конструктивных особенностях аппарата.

Перед проведением исследований в емкости 3 готовили исходную водную суспензию с заданной концентрацией твердых частиц, размер которых соответствовал фракционному составу примесей из природного водоема.

После приготовления исходной водной суспензии включали насос 6 и выставляли вентилем 8 рабочий расход жидкости, равный $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ [18].

При работе установки в режиме фильтрования кран 9 открыт, а кран 10 закрыт. Типовая конструкция аппарата обеспечивает выделение дисперсных примесей размером более 50 мкм. Тонкодисперсные примеси диаметром менее 50 мкм, а также частицы с малой плотностью захватываются потоком и уносятся из аппарата в результате восходящего движения воды вдоль оси аппарата.

1 – гидроциклон; 2 – фильтрующий сливной патрубок; 3 – емкость исходной суспензии; 4 – сборник шлама; 5 – емкость фильтрата; 6 – насос для подачи суспензии; 7 – насос для подачи промывочной жидкости; 8 – вентиль; 9, 10 – запорная арматура; 11 – водяной счетчик; 12 – манометр; 13 – вакуумметр

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

Для повышения эффективности работы аппарата путем предотвращения уноса частиц тонких фракций нами был разработан сливной патрубок, представленный на рисунке 2.

a

б

a – главный вид; *б* – вид снизу

Рисунок 2 – Сливной патрубок (автор фото М. И. Филимонов)

Предлагаемый патрубок представляет собой цилиндрический корпус, на концах которого выполнена резьба для крепления сетчатых перегородок, что позволяет использовать различные варианты насыпного материала для дополнительной фильтрации восходящего потока воды. Внутри патрубка установлена перфорированная решетка, обеспечивающая регулирование высоты слоя засыпки. В ходе экспериментов изучали эффективность очистки суспензий при 25, 50, 75 и 100 % засыпки сливного патрубка.

Оценку эффективности разделения суспензии проводили по интегральной степени очистки, которую рассчитывали по формуле [19]:

$$\eta = \frac{m_{\text{ш}}}{m_{\text{ш}} + m_{\text{ф}}},$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса дисперсной составляющей в шламе после фильтрации и промывки, г;

$m_{\text{ф}}$ – масса частиц в полученном фильтрате, г.

Регулирование динамики течения восходящего потока воды осуществляли путем варьирования размера пескового патрубка с помощью набора шайб диаметром d 8, 10 и 12 мм.

По мере проведения эксперимента происходило накопление мелко-

дисперсных примесей в слое фильтровального материала, что приводит к росту гидравлического сопротивления аппарата и снижению эффективности очистки водной суспензии. Удаление накопленных в фильтровальном слое механических примесей осуществляли промывкой обратным током воды. С этой целью отключали насос 6, перекрывали вентиль 8 и запорную арматуру 9. Далее открывали кран 10 и включали насос 7, тем самым обеспечивая противоточную подачу очищенной жидкости в корпус сливного патрубка. Далее механические примеси с водным потоком через песковый патрубок поступают в сборник шлама.

Результаты и обсуждение. В результате анализа поливной воды из природного водоисточника было установлено, что массовая концентрация механических частиц составляет 5 %. Анализируя гранулометрический состав твердых частиц, стоит отметить, что 21 % от общей массы составляют частицы размером 50 мкм и меньше. Наличие тонкодисперсных примесей в поливной воде затрудняет процесс водоподготовки при использовании типовых гидроциклонов.

Стоит отметить, что, помимо степени улавливания частиц в гидроциклоне, необходимо учитывать потери воды со шламом. Результаты очистки поливной воды и распределения потоков в типовом гидроциклоне ГНС-100 представлены на рисунке 3.

Как видно из данных графиков, при увеличении диаметра пескового патрубка степень очистки возрастает, при этом соотношение расходов фильтрата $Q_{\text{ф}}$ и шламовой жидкости $Q_{\text{шл}}$ снижается. Изменение соотношения расходов обусловлено перераспределением потоков в аппарате, вследствие чего происходит увеличение потерь воды.

Оптимальным значением диаметра пескового патрубка типового гидроциклона ГНС-100 для разделения исследуемой суспензии является 10 мм. Такое конструктивное исполнение обеспечивает степень очистки на уровне 0,79, при этом отношение расходов $Q_{\text{ф}}/Q_{\text{шл}}$ составляет 3,6. Уве-

личение размера пескового патрубка до 12 мм способствует росту эффективности очистки воды от примесей до 0,81, но при этом увеличивается количество воды в шламе (отношение расходов $Q_{\text{ф}}/Q_{\text{шл}}$ составляет 2,9), что является негативным фактором работы аппарата.

Рисунок 3 – Степень очистки и соотношение расходов в гидроциклоне ГНС-100

В качестве зернистого фильтровального слоя модернизированной конструкции сливного патрубка выбран цеолит, что обусловлено его низким гидравлическим сопротивлением из-за геометрических параметров агломератов. Результаты очистки воды от механических примесей в гидроциклоне с насыпным фильтровальным слоем представлены на рисунке 4.

Анализируя представленные результаты, можно заключить, что максимальная степень очистки 0,97 достигается при объеме засыпки 100 % и диаметре пескового патрубка, равном 12 мм. Однако потери воды на уровне 26 % в этом варианте свидетельствуют о нерациональном использовании водных ресурсов, в связи с этим такая комплектация гидроциклона не подлежит рекомендации (рисунок 4з).

R – коэффициент корреляции

a – 25 % объема сливного патрубка; $б$ – 50 % объема сливного патрубка;
 $в$ – 75 % объема сливного патрубка; $г$ – 100 % объема сливного патрубка

Рисунок 4 – Показатели эффективности работы фильтрующего гидроциклона

Выводы. В результате выполненных исследований было установлено, что оптимальное значение эффективности очистки поливной воды в стандартном гидроциклоне составляет 0,79 при диаметре пескового патрубка 10 мм. В этом случае отношение расходов фильтрата и шламовой жидкости составляет 3,6. Использование насыпного фильтровального слоя из цеолита при объеме засыпки 100 % способствует увеличению эффективности разделения до 0,97. Однако с целью определения оптимальных параметров гидроциклона для водоподготовки необходимо учитывать не только эффективность отделения механических примесей, но и потери воды, выраженные через отношение расхода фильтрата к расходу шлама.

Рассматривая в совокупности основные показатели работы гидроциклона при очистке поливной воды, можно рекомендовать аппарат с диаметром пескового патрубка 10 мм и засыпкой фильтровального слоя 75 % (рисунок 4в). Такая комплектация обеспечивает эффективность разделения на уровне 0,91 при потерях воды со шламом 17 %.

Таким образом, предлагаемая конструкция гидроциклона со сливным патрубком, дополненным насыпным фильтром, позволяет повысить эффективность улавливания механических примесей на 12 % в сравнении с типовым аппаратом, что обусловлено совместной реализацией процессов гидроциклонирования и фильтрования через слой зернистой загрузки.

Список источников

1. Васильев С. М., Шура В. Н., Штанько А. С. Капельные оросительные системы: учеб. пособие. Новочеркасск, 2019. 179 с.
2. Ахмедов А. Д., Темерев А. А. Влияние качества поливной воды на работоспособность систем капельного орошения // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 6. С. 24–26.
3. Штанько А. С. Фильтрующие водозаборы из водотоков для подачи предварительно очищенной воды в системы капельного орошения // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2020. № 3(39). С. 123–139. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1142> (дата обращения: 01.08.2021). DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-123-139.
4. Джабагиева К. Р., Дегтярев Г. В. Конструкции гидроциклонов, гидроциклонных нефтеловушек и их принципы работы // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 51. С. 124–126.

5. Новиков А. Е., Филимонов М. И., Ламскова М. И. Использование закрученных потоков и сорбционных эффектов при водоочистке в низконапорных оросительных системах с локальной подачей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 4(24). С. 189–201. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1122> (дата обращения: 01.08.2021).
6. Разработка двухкамерного гидроциклона для узлов водоподготовки оросительных систем / М. И. Ламскова, А. Е. Новиков, М. И. Филимонов, С. В. Бородычев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2020. № 3(79). С. 104–109.
7. Шестов Р. Н. Гидроциклоны. Л.: Машиностроение, 1967. 80 с.
8. Пат. на полез. модель 184122 Российская Федерация, МПК В 01 С 5/22. Гидроциклон / Ламскова М. И., Бородычев С. В., Новиков А. Е., Бородычев В. В., Филимонов М. И.; патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова. № 2018129764; заявл. 15.08.18; опубл. 16.10.18, Бюл. № 29. 7 с.
9. Souza J. S., Farias F. P., Swarnakar R. Non-isothermal separation process of two-phase mixture water/ultra-viscous heavy oil by hydrocyclone // Adv. Chem. Eng. Sci. 2011. № 1. P. 271–279. DOI: 10.4236/aces.2011.14038.
10. Mohsen I. M., Abbas M., Ehsanolah A. Optimizing the design and performance of solid-liquid separators // International Journal of Thermofluids. 2020. Vol. 5–6. 100033. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100033>.
11. Пат. на полез. модель 167820 Российская Федерация, МПК В 04 С 5/12. Гидроциклон / Ламскова М. И., Голованчиков А. Б., Новиков А. Е., Филимонов М. И.; патентообладатель Волгогр. гос. техн. ун-т. № 2016120192; заявл. 24.05.16; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. 6 с.
12. Абдураманов Н. А. Совершенствование конструкции гидроциклонных насосных установок в системах сельскохозяйственного водоснабжения и обводнения пастбищ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. Тараз, 2010. 28 с.
13. Wang B., Yu A. B. Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions // Miner. Eng. 2006. № 19. P. 1022–1033. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.016>.
14. Svarovsky L., Thew M. T. Hydrocyclones: Analysis and Applications. Kluwer Academic Publishers, 1992. 440 p.
15. Терновский И. Г., Кутепов А. М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.
16. Sirlene A., Hortencia L., Severino R. Impact of permeable membrane on the hydrocyclone separation performance for oily water treatment // Membranes. 2020. № 10. P. 350–371. <https://doi.org/10.3390/membranes10110350>.
17. Пат. на полез. модель 158008 Российская Федерация, МПК В 04 С 5/12. Гидроциклон / Ламскова М. И., Новиков А. Е., Филимонов М. И.; патентообладатель Волгогр. гос. техн. ун-т. № 2015118366/05; заявл. 15.05.15; опубл. 20.12.15, Бюл. № 35. 7 с.
18. Инженерно-экологический справочник. В 3 т. Т. 2 / А. С. Тимонин, Р. Ш. Абиев, С. М. Дмитриев, Т. С. Дмитриева. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 884 с.
19. Моделирование процессов разделения неоднородных жидкостных систем в гидроциклоне с учетом критериев подобия / А. Б. Голованчиков, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, М. И. Филимонов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 2. С. 34–38.

References

1. Vasiliev S.M., Shkura V.N., Shtanko A.S., 2019. *Kapel'nye orositel'nye sistemy: ucheb. posobie* [Drip Irrigation Systems: textbook]. Novocherkassk, 179 p. (In Russian).
2. Akhmedov A.D., Temerev A.A., 2011. *Vliyanie kachestva polivnoy vody na rabotosposobnost' sistem kapel'nogo orosheniya* [Influence of irrigation water quality on the ef-

iciency of drip irrigation systems]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], no. 6, pp. 24-26. (In Russian).

3. Shtanko A.S., 2020. [Filtering water intakes from watercourses for supplying pre-treated water into drip irrigation systems]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 3(39), pp. 123-139, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1142> [accessed 01.08.2021], DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-123-139. (In Russian).

4. Dzhabagieva K.R., Degtyarev G.V., 2014. *Konstruktsii gidrotsiklonov, gidrotsiklonnykh neftelevushek i ikh printsipy raboty* [Designs of hydrocyclones, hydrocyclone oil traps and their operating principles]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proc. of Kuban State Agrarian University], no. 51, pp. 124-126. (In Russian).

5. Novikov A.E., Filimonov M.I., Lamskova M.I., 2016. [The use of vortex flow and sorption effect in water treatment in low pressure irrigation systems with local distribution]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 4(24), pp. 189-201, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1122> [accessed 01.08.2021]. (In Russian).

6. Lamskova M.I., Novikov A.E., Filimonov M.I., Borodychev S.V., 2020. *Razrabotka dvukhkamernogo gidrotsiklona dlya uzlov vodopodgotovki orositel'nykh sistem* [Development of a two-chamber hydrocyclone for water treatment units of irrigation systems]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 3(79), pp. 104-109. (In Russian).

7. Shestov R.N., 1967. [Hydrocyclones]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 80 p. (In Russian).

8. Lamskova M.I., Borodychev S.V., Novikov A.E., Borodychev V.V., Filimov M.I., 2018. *Gidrotsiklony* [Hydrocyclone]. Patent RF, no. 184122. (In Russian).

9. Souza J.S., Farias F.P., Swarnakar R., 2011. Non-isothermal separation process of two-phase mixture water / ultra-viscous heavy oil by hydrocyclone. *Adv. Chem. Eng. Sci.*, no. 1, pp. 271-279, DOI: 10.4236/aces.2011.14038.

10. Mohsen I.M., Abbas M., Ehsanolah A., 2020. Optimizing the design and performance of solid-liquid separators. *International Journal of Thermofluids*, vol. 5-6, 100033, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100033>.

11. Lamskova M.I., Golovanchikov A.B., Novikov A.E., Filimonov M.I., 2017. *Gidrotsiklon* [Hydrocyclone]. Patent RF, no. 167820. (In Russian).

12. Abduramanov N.A., 2010. *Sovershenstvovanie konstruktsii gidrotsiklonnykh nasosnykh ustanovok v sistemakh sel'skokhozyaystvennogo vodosnabzheniya i obvodneniya pastbishch. Avtoreferat diss. kand. tech. nauk* [Improving the design of hydrocyclone pumping units in agricultural water supply and watering of pastures. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Taraz, 28 p. (In Russian).

13. Wang B., Yu A.B., 2006. Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Miner. Eng.*, no. 19, pp. 1022-1033, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.016>.

14. Svarovsky L., Thew M.T., 1992. *Hydrocyclones: Analysis and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 440 p.

15. Ternovsky I.G., Kutepov A.M., 1994. *Gidrotsiklonirovanie* [Hydrocycloning]. Moscow, Nauka Publ., 350 p. (In Russian).

16. Sirlene A., Hortencia L., Severino R., 2020. Impact of permeable membrane on the hydrocyclone separation performance for oily water treatment. *Membranes*, no. 10, pp. 350-371, <https://doi.org/10.3390/membranes10110350>.

17. Lamskova M.I., Novikov A.E., Filimonov M.I., 2015. *Gidrotsiklon* [Hydrocyclone]. Patent RF, no. 158008. (In Russian).

18. Timonin A.S., Abiev R.Sh., Dmitriev S.M., Dmitrieva T.S., 2019. *Inzhenerno-ekologicheskii spravochnik* [Engineering and Ecological Reference Book]. In 3 vol., vol. 2, Vologda, Infra-Engineering Publ., 884 p. (In Russian).

19. Golovanchikov A.B., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M.I., 2018. *Modelirovanie protsessov razdeleniya neodnorodnykh zhidkostnykh sistem v gidrotsiklone s uchetom kriteriev podobiya* [Modeling of separation processes of heterogeneous liquid systems in a hydrocyclone taking into account similarity criteria]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Oil and Gas Engineering], no. 2, pp. 34–38. (In Russian).

Информация об авторах

М. И. Ламскова – доцент кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, кандидат технических наук;

М. И. Филимонов – научный сотрудник отдела оросительных мелиораций, кандидат технических наук Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия; старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, кандидат технических наук Волгоградского государственного технического университета;

А. Е. Новиков – директор, доктор технических наук, доцент Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия; заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических и пищевых производств, доктор технических наук, доцент Волгоградского государственного технического университета;

С. В. Бородычев – инженер.

Information about the authors

M. I. Lamskova – Associate Professor of the Department of Processes and Apparatus for Chemical and Food Production, Candidate of Technical Sciences;

M. I. Filimonov – Researcher Department of Irrigation Reclamation, Candidate of Technical Sciences All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture; Senior Lecturer of the Department of Processes and Apparatus of Chemical and Food Industries, Candidate of Technical Sciences Volgograd State Technical University;

A. E. Novikov – Director, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture; Head of the Department of Processes and Apparatus for Chemical and Food Production, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor Volgograd State Technical University;

S. V. Borodychev – Engineer.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.08.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 14.10.2021.

The article was submitted 18.08.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 14.10.2021.