

УДК 628.543

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-169-186

В. И. Ляшевский, В. П. Горобей, М. В. Вердыш

Крымский филиал Российского научно-исследовательского института проблем мелиорации, Симферополь, Российская Федерация

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДОЖДЕВАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ АЭРАТОРА ДЛЯ ФЛОТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Цель: повышение эффективности использования пневматической флотационной машины, возможности регулирования крупности воздушных пузырьков при аэрации камерного продукта в ней в процессе очистки сточных вод путем создания необходимых условий образования водно-воздушной струи за счет особенностей конструкции аэрационного узла пневмогидравлического дождевателя. **Материалы и методы:** использована принципиально новая схема аэрирующего устройства для флотационных технологий очистки сточных вод и выполнено теоретико-технологическое обоснование основных его параметров. Алгоритм расчета параметров аэрирующего устройства выполнен и работает в табличном процессоре (Excel или WPS). **Результаты:** приведено теоретико-технологическое обоснование конструктивных решений аэрационного узла пневматической флотационной машины. При обосновании параметров пневмогидравлического аэратора разрушение сплошности жидкости при диспергации воздушной фазы рассмотрено с учетом ее прочности при взаимодействии гетерогенных фаз воды и воздуха. При этом подача в аэрационный блок воздуха может осуществляться как принудительно, так и эжекцией, что расширяет диапазон регулирования крупности пузырьков воздуха. Предложена теоретическая модель работы перспективного пневмогидравлического аэратора, получены графические зависимости, которые могут быть использованы для оптимизации технологических и геометрических параметров, а также конструктивных решений при разработке и изготовлении макетного образца пневмогидравлического аэратора и его экспериментальной апробации для насыщения камерного продукта флотатора воздушными пузырьками флотационной крупности. **Выводы:** результаты исследований позволят ускорить апробацию и внедрение инновационного узла во флотационные машины пневматического типа.

Ключевые слова: сточные воды; очистка; машина; флотация; аэрация; расчет; параметры; зависимость; обоснование; конструкция.

V. I. Lyashevskiy, V. P. Gorobey, M. V. Verdysh

Crimean Branch of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Simferopol, Russian Federation

THE PROSPECTS FOR A PNEUMATIC HYDRAULIC SPRINKLER APPLICATION AS AERATOR FOR FLOTATION PROCESSES OF SEWAGE TREATMENT

Purpose: increasing the efficiency of pneumatic flotation machine application, the ability to control the size of air bubbles during aeration of the chamber product in it during sewage water treatment by creating the necessary conditions for the formation of a water-air jet due to the design features of the aeration unit of a pneumatic hydraulic sprinkler. **Materials**



and methods: a fundamentally new scheme of the aeration device for flotation technologies for sewage water treatment was used and a theoretical and technological substantiation of its main parameters was performed. The algorithm for calculating the parameters of the aeration device is performed and works in a spreadsheet (Excel or WPS). **Results:** the theoretical and technological substantiation of the design solutions of the aeration unit of a pneumatic flotation machine is given. When substantiating the parameters of a pneumatic hydraulic aerator, the destruction of the continuity of the liquid during dispersion of the air phase is considered taking into account its strength in the interaction of heterogeneous phases of water and air. Therein, air can be supplied to the aeration unit both by force and by ejection, which expands the range of regulation of the size of air bubbles. A theoretical model of the promising pneumatic hydraulic aerator operation is proposed, graphical dependencies that can be used to optimize technological and geometric parameters as well as design solutions in the developing and producing a pneumatic hydraulic aerator prototype and its experimental testing to saturate the flotation chamber product with flotation-sized air bubbles are obtained. **Conclusions:** the research results will accelerate the testing and implementation of the innovative unit in pneumatic flotation machines.

Key words: sewage water; treatment; a machine; flotation; aeration; calculation; parameters; dependence; substantiation; design.

Введение. Сточные воды обычно направляют на флотационную очистку после седиментации. Такие воды содержат очень мелкие взвеси, размеры которых в десятки раз меньше частиц, разделяемых флотацией при обогащении минерального сырья. С уменьшением размеров частиц снижается вероятность столкновения их с пузырьками. Для флотации мелких частиц требуется бóльшая поверхность раздела газ – жидкость, чем для крупных. Активация процесса флотации, направленная на повышение дисперсности и устойчивости газовых пузырьков, повышает эффективность удаления загрязнений из жидкости, способствует выделению из сточных вод детергентов. Прилипание частиц, находящихся в сточной жидкости, к поверхности пузырька воздуха зависит от многих факторов, в т. ч. от степени смачивания поверхности, сил взаимного притяжения и отталкивания частицы и пузырька, гидрофобности частиц, их размеров, физико-химических свойств дисперсионной среды [1–3]. Традиционно пневматические флотационные установки применяют при очистке сточных вод, содержащих растворенные примеси, в т. ч. агрессивные к механизмам (насосам, импеллерам и др.), имеющим движущиеся части. Измельчение пузырьков воздуха достигается путем впуска воздуха во флотационную

камеру через сопла, которые располагаются на воздухораспределительных трубках, укладываемых на дно флотационной камеры. Диаметр отверстий сопел 1–1,2 мм, рабочее давление перед ними 0,3–0,5 МПа, скорость выхода струи из сопел 100–200 м с⁻¹ [4]. Колонная флотационная машина представляет собой камеру шириной около 1 м и высотой около 7–9 м. Машины данного типа энергоемки и занимают всего 5–10 % площади, необходимой для машин других конструкций с равноценной производительностью. Скорость нисходящих потоков пульпы не должна превышать скорость всплывания пузырьков, приводящих к их коалесценции и образованию воздушных пробок [5].

Интенсификация процесса очистки сточных вод осуществлена в пневматической флотомашине колонного типа, где исходная сточная вода сепарируется в три этапа: при эрлифтной загрузке, в камере основной флотации и в камере доочистки [6, 7]. Для насыщения камерного продукта флотационной колонны воздухом, генерации мелкодисперсных пузырьков применено устройство с пневмогидравлическими аэраторами, рабочей средой которых является сжатый воздух и инжектируемая им вода в виде факелов тонкой эмульсионной смеси, распределяющаяся по объему камеры [8].

Повышение извлечения тонкодисперсных шламовых частиц показывают машины, использующие для аэрации пульпы струйные насосы для прокачивания пульпы, при турбулентном движении которой инжектируется воздух из атмосферы. Существуют критические значения скорости продувания газа (воздуха) через раствор ПАВ, за пределами которых эффективность пенного концентрирования резко падает. Нижний предел скорости обусловлен тем, что газ, поступающий в раствор, должен обладать напором, достаточным для преодоления сопротивления столба жидкости. При меньшем напоре газа его энергия будет недостаточна для нарушения сплошности жидкости и пузырьки газа образоваться не смогут, следовательно, не будет осуществляться и пенная сепарация растворенных ПАВ.

При превышении верхнего предела скорости подачи газа в раствор ПАВ количество пузырьков настолько велико, что они коалесцируют в крупные пузыри, имеющие кинетическую энергию, достаточную, чтобы разрушить ранее образовавшуюся пену. Между предельными критическими значениями скорости подачи газа степень извлечения ПАВ с увеличением интенсивности подачи газа возрастает [9].

Размер пузырьков газов играет очень большую роль в достижении высокой эффективности очистки. При выборе того или иного аппарата необходимо обращать внимание на размер образующихся пузырьков во флотационных объемах камер аппаратов [10, 11]. В процессе флотации в колонных машинах возникает необходимость регулирования дисперсного состава газовой фазы, за счет чего может быть достигнута оптимизация технологических показателей процесса флотации при изменении условий флотации [12, 13]. Аэрируемые жироловки рекомендуются, когда обычные не обеспечивают надлежащего обезжиривания из-за особых условий распределения жира в виде тонких пленок на поверхности воды. Ускорение процесса выделения жировых веществ из сточных вод по сравнению с отстаиванием основано на использовании мельчайших пузырьков воздуха, которые, прилипая к жировым частицам, выносят их на поверхность очищаемых стоков. Так, работа всех основных элементов очистных сооружений с применением напорной флотации осуществляется главным образом с помощью водно-воздушной эмульсии [14, 15].

Создание пневмогидравлического устройства насыщения сточной воды пузырьками регулируемого диапазона активной флотационной крупности для повышения извлечения гидрофобных и гидрофобизированных примесей в пневматических машинах колонного типа с целью дальнейшего народно-хозяйственного использования оборотных вод является актуальной задачей.

Материалы и методы. Анализ конструкций флотационных машин,

технологического оборудования и аэраторов для очистки сточных вод. Повышение эффективности регулирования крупности воздушных пузырьков при аэрации камерного продукта в пневматической флотационной машине колонного типа путем создания необходимых условий образования водно-воздушной смеси предложено за счет особенностей конструкции аэрационного узла пневмогидравлического дождевателя. Алгоритм расчета параметров аэрирующего устройства выполнен и работает в табличном процессоре (Excel или WPS). Математическое моделирование рабочего процесса для обоснования геометрических и технологических параметров пневмогидравлического устройства для создания водно-воздушной смеси с целью повышения эффективности использования и надежности устройства, качества аэрирования камерного продукта, создания возможности регулирования равномерности распределения воздушных пузырьков во флотационной колонне и снижения энергозатрат.

Результаты и обсуждение. Для решения технологических задач флотационной очистки сточных вод предложено применение в качестве аэратора для машин пневматического типа конструктивных особенностей пневмогидравлического дождевателя [16].

Сущность технического решения поясняется графическим материалом (рисунок 1) – изображением конструктивно-технологической эквивалентной схемы пневмогидравлического аэратора. Пневмогидравлический аэратор содержит корпус, состоящий из двух частей, первая часть которого включает камеру смешения 1, выпускное сопло 2 с винтообразными углублениями 3, имеет конусообразное кольцевое углубление 4, соединенное с диффузором 5, который в свою очередь соединен со штуцером для подачи воздуха 6, а вторая часть корпуса соединена с первой резьбовым соединением через резиновый уплотнитель 7, размещенный в специальной выборке корпуса. Вторая часть корпуса аэратора содержит подвижный по резьбе штуцер 8 с фиксатором 9 и каналом 10 для подачи жидкой фазы

с конусообразным сужением *11* у выходного конца, переходящим в сопло *12* штуцера с винтообразными углублениями *13*. Кольцевой конусообразный пневмозазор *14* регулируется между кольцевым конусным углублением *4* и конусным выходным концом штуцера *8* и соединяет камеру диффузора *5* с камерой смешивания *1*.

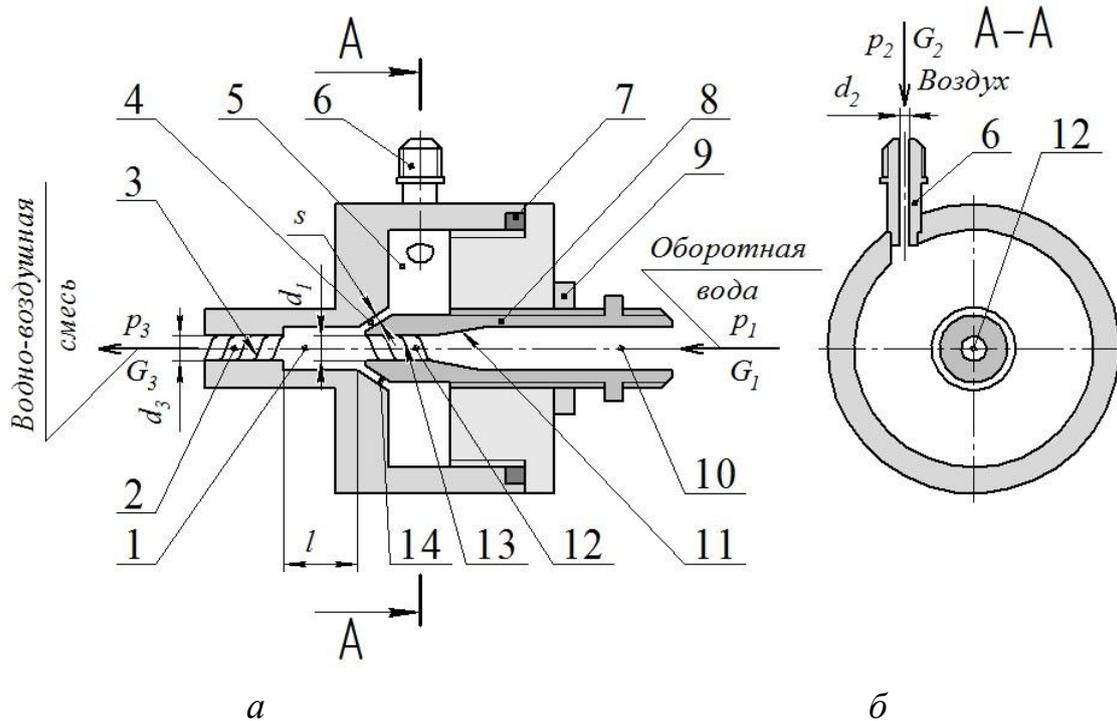


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая эквивалентная схема пневмогидравлического аэрата: а – вид сбоку; б – разрез

При работе пневмогидравлического аэрата поток жидкой фазы под давлением поступает по каналу *10* штуцера *8*, получает ускорение в конусообразном сужении канала *11*, поступает в сопло *12* штуцера *8*, где частично приведен во вращение винтообразными углублениями *13*, выполненными на цилиндрических стенках сопла, контактирующих с жидкостью, и выбрасывается в камеру смешения *1*, в которой создано разрежение для поступающего частично с завихрением по конусообразному кольцевому зазору *14* воздуха под давлением с преобразованной в нем частью кинетической энергии воздуха из диффузора *5*, соединенного тангенциально установленным штуцером *6* с компрессором. От соударения струй воздушной и жидкой фаз генерирован водно-воздушный поток. Распылен-

ная воздухом жидкость направлена в выпускное сопло 2, где вращением по винтообразным углублениям 3 дополнительно завихрена и направлена в камеру флотатора.

При нагнетании воздуха под давлением степень регулирования распыления жидкости осуществлена при изменении величины кольцевого пневмозазора 14, образованного между поверхностями конусообразного кольцевого углубления 4 и конусным выходным концом штуцера 8, соосно центральному жидкостному каналу. В аэрационном устройстве воздух может быть диспергирован в жидкую фазу из атмосферы эжекцией под действием разрежения, возникающего в камере смешивания, без принудительного воздействия. Требование к чистоте жидкой фазы для работы пневмогидравлического аэратора определено величиной поперечного сечения жидкостного канала, а попадание жидкости в камеру для воздуха при работе устройства исключено.

Основываясь на вышеприведенной конструктивно-технологической схеме, для обоснования параметров пневмогидравлического устройства аэратора, одной из особенностей которого является эжекция воздушной фазы, рассмотрим эквивалентную схему (рисунок 1а). Для наиболее эффективного диспергирования воздуха при распыливании воды конструкция аэратора должна обеспечивать насыщение воды воздухом и значительный перепад давления на выходе водно-воздушной смеси из сопла устройства. Аэрация камерного продукта может осуществляться как принудительным вводом воздуха в аэратор, так и за счет его эжекции. В последнем случае струя воды создает разрежение в камере смешения и воздух всасывается из атмосферы.

Площадь поперечного сечения f_1 сопла 12 водяного штуцера 8 найдем из уравнения для расхода воды G_1 через сопло [17]:

$$f_1 = \frac{G_1}{\mu \sqrt{2 p_1}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода, значение которого всегда меньше 1;

p_1 – давление воды, Па.

Если отверстие сопла водяного штуцера круглого сечения диаметром d_1 , то:

$$f_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}. \quad (2)$$

Из выражения (2) с учетом уравнения (1) получим:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4G_1}{\pi\mu\sqrt{2p_1}}}. \quad (3)$$

Массовый расход воздуха G_2 , поступающего из атмосферы через воздушную камеру 5 в камеру смешения 1 аэратора, определяется по формуле [18]:

$$G_2 = \mu f_2 p_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{RT_2} \left(Y^{\frac{2}{k}} - Y^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода, значение которого всегда меньше 1;

f_2 – площадь поперечного сечения воздушного штуцера, мм;

p_2 – давление в воздушной камере аэратора, Па;

k – показатель адиабаты (обычно принимается $k = 1,4$);

R – газовая постоянная в Н·м/(кг·град);

T_2 – абсолютная температура воздуха в К;

Y – отношение давлений p/p_2 , Па.

Коэффициент μ определяется обычно из эксперимента или по справочным данным и учитывает факторы, которые не были учтены при выводе формулы (4). Показатель адиабаты k принимается равным 1,4. Для этого значения k имеются таблицы функции:

$$\varphi(Y) = \sqrt{Y^{\frac{2}{k}} - Y^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (5)$$

которая называется функцией расхода.

Функция расхода φ при критическом отношении давлений Y^* по формуле (5) при $k = 1,4$ имеет значение $\varphi(Y) = 0,2588$ [16].

Критический расход G^* находим по формуле (4) при $k = 1,4$ и $\varphi(Y^*) = 0,2588$:

$$G^* = \mu f_2 p_2 \sqrt{\frac{0,469}{RT_2}}. \quad (6)$$

Зависимость (4) для определения расхода воздуха справедлива только в интервале значений Y от 1 до того значения Y^* , при котором расход G_2 становится максимальным. Это значение $Y = Y^*$ называется критическим. Если принять $k = 1,4$, то $Y^* = 0,528$.

Для того чтобы можно было регулировать степень насыщения воды воздухом в аэраторе, массовый расход воздуха, поступающего из атмосферы в камеру смешения 4 аэратора, должен зависеть от отношения давлений Y . В соответствии с теорией Н. И. Левицкого [18], такой режим работы возможен в интервале изменения Y от 0,528 до 1. Максимальный расход воздуха $G_2 = G^*$.

Из уравнения (6) с учетом $G_2 = G^*$ выразим величину сечения кольцевого зазора 14 на входе в камеру смешения 1 аэратора:

$$f_2 = \frac{G_2}{\mu p_2} \sqrt{\frac{RT_2}{0,469}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) найдем средний диаметр кольцевого зазора f_c :

$$f_c = \frac{f_2}{\pi s}, \quad (8)$$

где s – ширина кольцевого зазора.

Чтобы вода из камеры смешения 1 аэратора не попадала в диффузор 5 аэратора, необходимо, чтобы расход воздуха, засасываемого через кольцевой зазор 14 в камеру смешения 1 аэратора, компенсировался расходом воздуха, поступающим из атмосферы в диффузор 5 аэратора. Это обеспе-

чивается равенством сечений кольцевого зазора l_4 на входе в камеру смешения аэратора и отверстия воздушного штуцера b на входе в воздушную камеру аэратора. Тогда диаметр отверстия d_2 воздушного штуцера b определится по формуле:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_2}{\pi}}. \quad (9)$$

По результатам расчетов с использованием выражений (7)–(9) построены графики зависимостей среднего диаметра f_c кольцевого зазора и диаметра d_2 отверстия воздушного штуцера от расхода воды G_1 с учетом расходов эжектируемого воздуха при нормальных атмосферных условиях для значений коэффициента эжекции 0,5; 0,7 и 0,9.

Согласно современным теоретическим представлениям о работе водно-воздушных эжекторов [19], справедливо следующее выражение:

$$u = K \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_2}},$$

где u – объемное соотношение подаваемой воды и эжектируемого воздуха;

K – постоянная, зависящая от конструкции и режима работы эжектора;

$p_1 - p_2$ – перепад давлений на срезе сопла l_2 ;

$p_3 - p_2$ – перепад давлений, создаваемый эжекцией.

Площадь сечения f_{cm} камеры смешения l определим из соотношения:

$$\frac{f_{cm}}{f_1} = K \frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_2},$$

отсюда в случае цилиндрической формы камеры смешения l ее диаметр d_{cm} :

$$d_{cm} = K d_1 \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_2}}.$$

Диаметр d_3 выпускного сопла 2 определим по выражению:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4G_1(1+u)}{\pi\mu\sqrt{2p_3}}}. \quad (10)$$

Длина l камеры смешения l должна быть достаточной для завершения смешения. По результатам исследований [20], с учетом оптимальной длины камеры смешения при круглой форме отверстий водяного штуцера и выпускного сопла аэратора она находится из соотношения:

$$l = 15d_1 \left(\frac{d_3}{d_1} - 1 \right). \quad (11)$$

Алгоритм расчета параметров аэрирующего устройства выполнен и работает в табличном процессоре (Excel или WPS) с использованием выражений (3), (7)–(11). Исходными данными являются давление воды p_1 и воздуха p_2 на входе устройства, необходимый расход воды G_1 и коэффициент эжекции u . В расчетах учитываются коэффициенты расхода μ воды и воздуха, газовая постоянная R и температура воздуха T . Результаты расчетов выдаются в виде таблиц Excel.

По результатам расчетов построены графики зависимостей среднего диаметра d_c кольцевого зазора (рисунок 2), диаметра воздушного штуцера d_2 (рисунок 3), диаметра выходного сопла d_3 распылителя, диаметра $d_{см}$ и длины l камеры смешения от расхода воды G_1 для значений давления воды $p_1 = 0,25; 0,30; 0,35$ МПа с учетом расходов эжектируемого воздуха при нормальных атмосферных условиях для значений коэффициента эжекции 0,5; 0,7 и 0,9.

Графические зависимости среднего диаметра кольцевого зазора d_c и диаметра воздушного штуцера d_2 от соотношения подачи в аэратор воды G_1 и воздуха G_2 при давлениях воздуха $p_1 = 2; 2,5; 3$ атм представлены на рисунках 4 и 5.

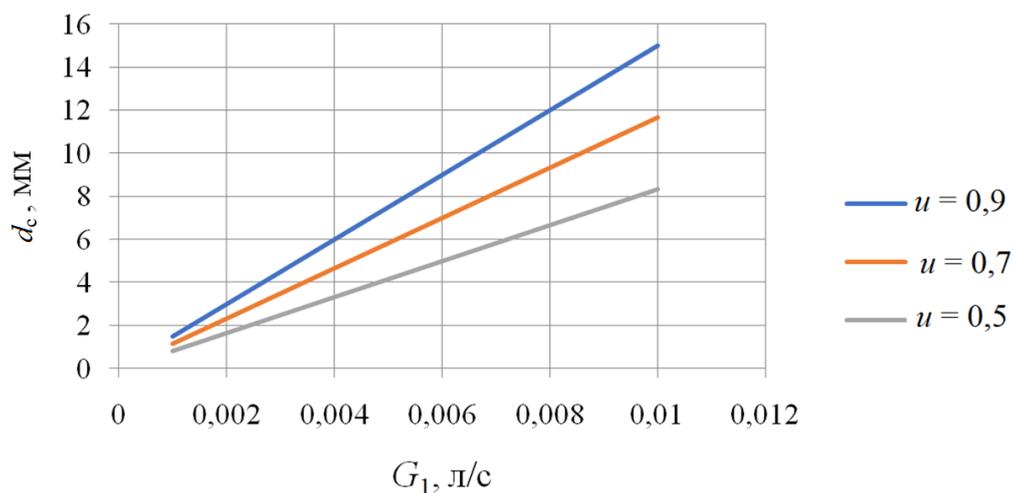


Рисунок 2 – Зависимость среднего диаметра кольцевого зазора от расхода воды

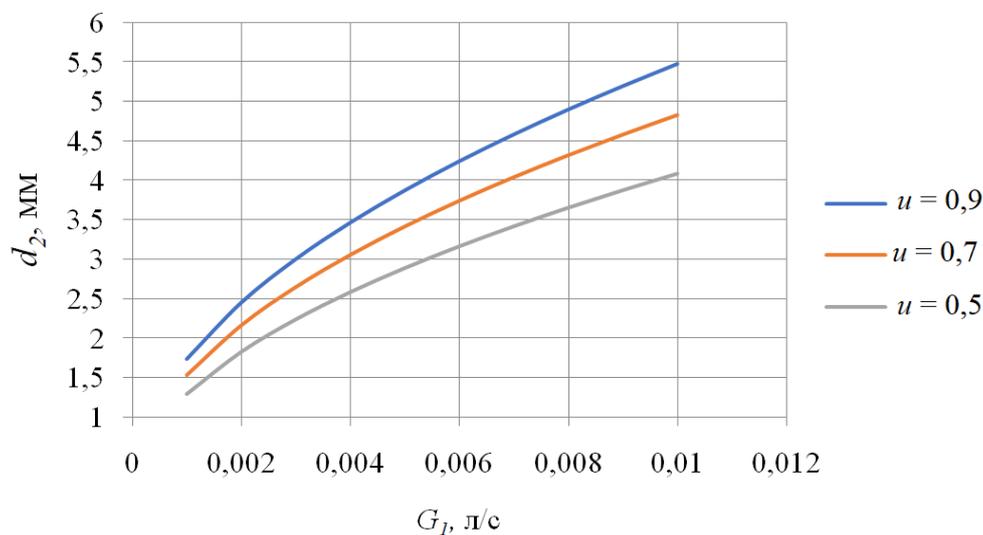


Рисунок 3 – Зависимость диаметра воздушного штуцера от расхода воды

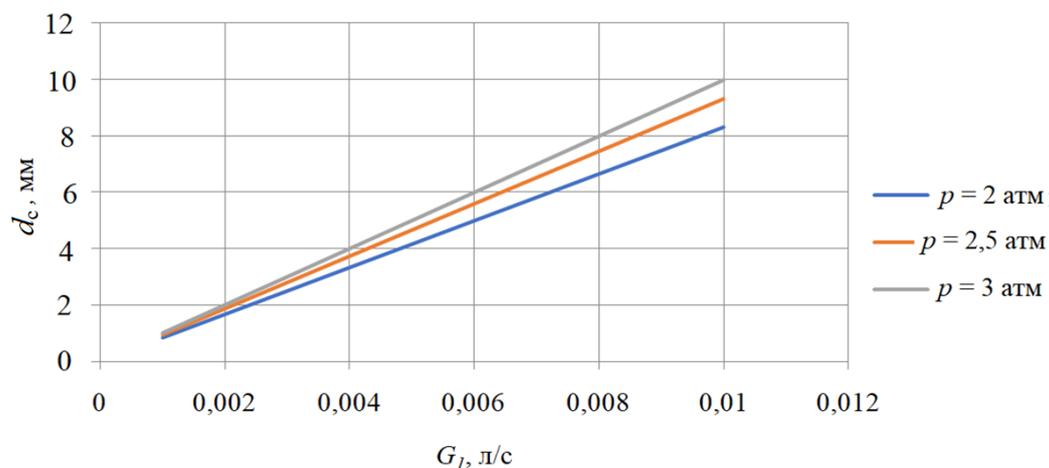


Рисунок 4 – Зависимость среднего диаметра кольцевого зазора от соотношения подачи в аэратор воды

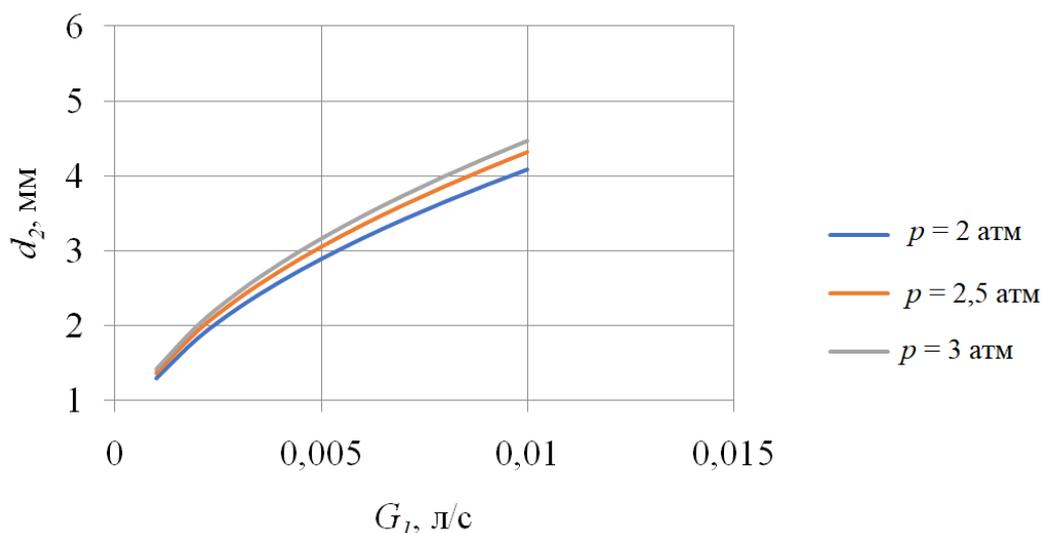


Рисунок 5 – Зависимость диаметра воздушного штуцера от соотношения подачи в аэратор воды

В результате анализа табличных и графических данных установлено, что для эффективного насыщения камерного продукта воздухом за счет его эжекции для флотации необходимо оснащать аэраторы устройствами с диаметрами выходного сопла $d_3 = 2,5 \dots 5,5$ мм и камеры смешения $d_{см} = 5 \dots 15$ мм. При этом конструкция устройства аэратора должна обеспечивать возможность регулировки среднего диаметра f_c кольцевого зазора в пределах 5–12 мм и длины l камеры смешения – 11–17 мм. В то же время подача воздуха под давлением больше атмосферного позволяет уменьшить размеры камеры смешения и других геометрических характеристик устройства для обеспечения устойчивых технологических параметров относительно его работы при эжекции воздуха атмосферного давления.

Для лучшего смешения воды с воздухом в камере смешения аэратора с учетом результатов гидродинамических исследований, посвященных изучению влияния геометрических характеристик и угла установки лопаток завихрителя на величину циркуляционных зон, получаемых из соотношений осевой и тангенциальной составляющих скоростей потока, которые в свою очередь будут зависеть от степени крутки потока, создаваемой

завихрителем, от угла установки лопаток завихрителя [21], и с учетом анализа опытных данных о шнековых завихрителях наряду с поперечной и спиральной накатками, проволочным спиральным и ленточным завихрителями [22] предлагается использовать принцип закручивания потока воды без разрыва его сплошности. Выполнить это условие позволит канавка по форме однозаходной винтовой спирали с углом подъема 50° на внутренней поверхности водяного штуцера. С целью эффективной диспергации водно-воздушного потока при его выходе из сопла аэратора нужно использовать принцип разрыва сплошности потока. Для этого выходное сопло аэратора предлагается снабдить на внутренней поверхности выступом по форме двухзаходной винтовой спирали с углом подъема 30° в направлении, противоположном направлению закручивания потока воды в камере смешения с воздухом.

Анализ разработанных конструкций спирального завихрителя потока и результаты теоретических исследований позволяют сделать вывод, что их использование незначительно увеличивает гидравлическое сопротивление. Использование воздушной фазы и конструктивно-технологических особенностей пневмогидравлического устройства для распыления жидкости обеспечивает возможность получения мелкодисперсного аэрирования камерного продукта для флотационного процесса очистки сточных вод.

Выводы. Создание современных малоэнергоемких технологий и новых технических средств необходимо для очистки сточных вод, использования оборотных вод при орошении сельскохозяйственных культур и других народно-хозяйственных потребностей. Одно из направлений интенсификации технологии очистки сточных вод – совершенствование пневмогидравлических аэрационных устройств для флотационных методов.

Приведено теоретико-технологическое обоснование конструктивных решений аэрационного узла пневматической флотационной машины. При обосновании параметров пневмогидравлического аэратора разруше-

ние сплошности жидкости при диспергации воздушной фазы рассмотрено с учетом ее прочности при взаимодействии гетерогенных фаз воды и воздуха. При этом подача в аэрационный блок воздуха может осуществляться как принудительно, так и эжекцией, что расширяет диапазон регулирования крупности пузырьков воздуха. Предложена теоретическая модель работы перспективного пневмогидравлического аэратора, получены графические зависимости, которые могут быть использованы для оптимизации технологических и геометрических параметров, а также конструктивных решений при разработке и изготовлении макетного образца пневмогидравлического аэратора и его экспериментальной апробации для насыщения камерного продукта флотатора воздушными пузырьками флотационной крупности.

Список использованных источников

- 1 Руководство по проектированию и расчету флотационных установок для очистки сточных вод / подгот.: И. Н. Мясников, Л. В. Гандурина, Н. Ф. Резник, В. Б. Чебанов, Б. Л. Кухен, Ф. М. Гит; ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1978. – 32 с.
- 2 Мещеряков, Н. Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины / Н. Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1990. – 237 с.
- 3 Очистка производственных сточных вод / под ред. Ю. И. Турского, И. В. Филиппова. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1967. – 330 с.
- 4 Очистка производственных сточных вод: учеб. пособие / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
- 5 Глембоцкий, В. А. Флотационные методы обогащения: учеб. для вузов / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 304 с.
- 6 Пат. 2043168 Российская Федерация, МПК В 03 D 1/24. Пневматическая флотационная машина «ВИРА» / Горобей В. П.; заявитель Украин. гос. ин-т минер. ресурсов; патентообладатель В. П. Горобей. – № 5045897/03; заявл. 02.06.92; опубл. 10.09.95, Бюл. № 25. – 6 с.
- 7 Щедрин, В. Н. Повышение эффективности процесса флотационной очистки сточных вод / В. Н. Щедрин, В. П. Горобей, В. И. Ляшевский // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2018. – № 4(72). – С. 31–37.
- 8 А. с. 1748878 СССР, В 03 D 1/24, 1/14. Устройство для аэрации пульпы при флотации / В. П. Горобей. – № 4799179/03; заявл. 05.03.90; опубл. 23.07.92, Бюл. № 27. – 4 с.
- 9 Когановский, А. М. Физико-химические методы очистки промышленных сточных вод от поверхностно-активных веществ / А. М. Когановский, Н. А. Клименко. – Киев: Наукова думка, 1974. – 160 с.
- 10 Пушкарев, В. В. Физико-химические особенности очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ / В. В. Пушкарев, Д. И. Трофимов. – М.: Химия, 1975. – 144 с.
- 11 Dobby, G. S. Particle collection in columns – gas rate and bubble size effects / G. S. Dobby, J. A. Finch // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1986. – Vol. 25, iss. 1. – P. 9–13. – DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.1986.25.1.9>.

12 Иоффе, В. М. Разработка новых аэраторов для пневматических флотационных машин / В. М. Иоффе, С. Б. Леонов, С. В. Иоффе // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1991. – № 5. – С. 128–131.

13 Laplante, A. R. The effect of air flow rate in the kinematics of flotation. Pt. 1. The transfer of material from the slurry to the froth / A. R. Laplante, J. M. Togury, H. W. Smith // International Journal of Mineral Processing. – 1983. – Vol. 11. – P. 203–209.

14 Лоренц, В. И. Очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности / В. И. Лоренц. – Киев: Будивельник, 1972. – 188 с.

15 Надысев, В. С. Очистка сточных вод предприятий масло-жировой промышленности / В. С. Надысев. – М.: Пищевая пром-сть, 1976. – 183 с.

16 Пат. 2704175 Российская Федерация, МПК В 05 В 7/10, А 01 G 25/00. Пневмогидравлический дождеватель / Горобей В. П.; заявитель и патентообладатель В. П. Горобей. – № 2019107468; заявл. 15.03.19; опубл. 24.10.19, Бюл. № 30. – 10 с.

17 Справочник конструктора сельскохозяйственных машин / под ред. А. В. Красниченко. – Т. 2. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1961. – 862 с.

18 Левицкий, Н. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Левицкий. – М.: Наука, 1990. – 592 с.

19 Пажи, Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 254 с.

20 Каннингэм, П. Г. Длина участка разрушения струи и смешивающей горловины жидкоструйного насоса для перекачки газа / П. Г. Каннингэм, Р. Ж. Допкин // Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. – М.: Мир, 1974. – № 3. – С. 128–141.

21 Влияние геометрических характеристик завихрителя на вихревую структуру потока в импульсной камере сгорания / А. И. Исаев, Ю. И. Майрович, А. М. Сафарбаков, С. А. Ходацкий // Труды МАИ [Электронный ресурс]. – 2016. – № 88. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70631>.

22 Лаптев, А. Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учеб.-справ. пособие / А. Г. Лаптев, Н. А. Николаев, М. М. Башаров. – М.: Теплотехник, 2011. – 335 с.

References

1 Myasnikov I.N., Gandurina L.V., Reznik N.F., Chebanov V.B., Kukhen B.L., Git F.M., 1978. *Rukovodstvo po proektirovaniyu i raschetu flotatsionnykh ustanovok dlya ochistki stochnykh vod* [Handbook on Design and Calculation of Flotation Units for Wastewater Treatment]. VNII VODGEO Gosstroy of the USSR. Moscow, Sroyizdat Publ., 32 p. (In Russian).

2 Meshcheryakov N.F., 1990. *Konditsioniruyushchie i flotatsionnye apparaty i mashiny* [Conditioning and Flotation Machines and Apparatus]. Moscow, Nedra Publ., 237 p. (In Russian).

3 Tursky Yu.I., Philippov I.V., 1967. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod* [Industrial Wastewater Treatment]. Leningrad, Chemistry, Leningrad Division, 330 p. (In Russian).

4 Yakovlev S.V., Karelin Y.A., Laskov Yu.M., Voronov Yu.V., 1979. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod* [Purification of Industrial Wastewater]. Moscow, Sroyizdat Publ., 320 p. (In Russian).

5 Glembotsky V.A., Klassen V.I., 1981. *Flotatsionnye metody obogashcheniya: uchebnik dlya vuzov* [Flotation Enrichment Methods: Textbook for Universities]. 2nd ed., Moscow, Nedra Publ., 304 p. (In Russian).

6 Gorobey V.P., 1995. *Pnevmaticheskaya flotatsionnaya mashina "VIRA"* [Pneumatic Flotation Machine "VIRA"]. Patent RF, no. 2043168. (In Russian).

7 Shchedrin V.N., Gorobei V.P., Lyashevsky V.I., 2018. *Povyshenie effektivnosti protsessy flotatsionnoy ochistki stochnykh vod* [Improving the efficiency of the flotation wastewater

ter treatment process]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshayemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 4(72), pp. 31-37. (In Russian).

8 Gorobey V.P., 1992. *Ustroystvo dlya aeratsii pul'py pri flotatsii* [Device for Aeration of Pulp During Flotation]. USSR copyright certificate, no. 4799179/03, 4 p. (In Russian).

9 Koganovsky A.M., Klimenko N.A., 1974. *Fiziko-khimicheskie metody ochistki promyshlennykh stochnykh vod ot poverkhnostno-aktivnykh veshchestv* [Physicochemical Treatment Methods of Industrial Wastewater from Surface-Active Substances]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 160 p. (In Russian).

10 Pushkarev V.V., Trofimov D.I., 1975. *Fiziko-khimicheskie osobennosti ochistki stochnykh vod ot PAV* (Physicochemical Features of the Wastewater Treatment from Surfactants]. Moscow, Chemistry Publ., 144 p. (In Russian).

11 Dobby G.S., Finch J.A., 1986. Particle collection in columns – gas rate and bubble size effects. *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 25, iss. 1, pp. 9-13, DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.1986.25.1.9>.

12 Ioffe V.M., Leonov S.B., Ioffe S.V., 1991. *Razrabotka novykh aeratorov dlya pnevmaticheskikh flotatsionnykh mashin* [Development of new aerators for pneumatic flotation machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [Bull. of Higher Educational Institutions. Mining Journal], no. 5, pp. 128-131. (In Russian).

13 Laplante A.R., Togury J.M., Smith H.W., 1983. The effect of air flow rate in the kinematics of flotation. Pt. 1. The transfer of material from the slurry to the froth. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 11, pp. 203-209.

14 Lorenz V.I., 1972. *Ochistka stochnykh vod predpriyatiy pishchevoy promyshlennosti* [Wastewater Treatment of Food Industry Enterprises]. Kiev, Budivelnik Publ., 188 p. (In Russian).

15 Nadysev V.S., 1976. *Ochistka stochnykh vod predpriyatiy maslozhirovoy promyshlennosti* [Wastewater Treatment of Oil and Fat Industry Plants]. Moscow, Food Industry Publ., 183 p. (In Russian).

16 Gorobey V.P., 2019. *Pnevmogidravlicheskiy dozhdevatel'* [Pneumohydraulic sprinkler]. Patent RF, no. 2704175. (In Russian).

17 Krasnichenko A.V., 1961. *Spravochnik konstruktora sel'skokhozyaystvennykh mashin* [Reference Book for the Designer of Agricultural Machines], vol. 2, Moscow, State Scientific and Technical Publ. Machine Building Literature, 862 p. (In Russian).

18 Levitsky N.I., 1990. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Nauka Publ., 592 p. (In Russian).

19 Pazhi D.G., Galustov V.S., 1984. *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkosti* [The Fundamentals of Liquid Spraying Procedure]. Moscow, Chemistry Publ., 254 p. (In Russian).

20 Kanningem P.G., Dopkin R.Zh., 1974. *Dlina uchastka razrusheniya strui i smeshivayushchey gorloviny zhidkostruynogo nasosa dlya perekachki gaza* [Jet breakup and mixing throat lengths for the liquid jet gas pump]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov* [Proc. of the American Society of Mechanical Engineers. Theoretical Foundations of Engineering Calculations]. Moscow, Mir Publ., no. 3, pp. 128-141. (In Russian).

21 Isaev A.I., Mayrovich Yu.I., Safarbakov A.M., Khodatsky S.A., 2016. *Vliyanie geometricheskikh kharakteristik zavikhritelya na vikhrevuyu strukturu potoka v impul'snoy kamere sgoraniya* [Influence of the geometric characteristics of the swirler on the vortex structure of the flow in a pulse-type combustion chamber]. *Trudy MAI* [Transactions of MAI], no. 88, available: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70631>. (In Russian).

22 Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M., 2011. *Metody intensivifikatsii i modelirovaniya teplomassoobmennyykh protsessov: uchebno-spravochnoe posobie* [Methods of Intensification and Modeling Heat and Mass Transfer Processes: Textbook]. Moscow, Heat Engineer Publ., 335 p. (In Russian).

Ляшевский Валерий Иванович

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: директор филиала

Место работы: Крымский филиал государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: ул. Киевская, 77, г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, 295034

E-mail: vlyashevskiy@mail.ru

Lyashevskiy Valeriy Ivanovich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Branch Director

Affiliation: Crimean Branch of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: st. Kievskaya, 77, Simferopol, Republic Crimea, Russian Federation, 295034

E-mail: vlyashevskiy@mail.ru

Горобей Василий Петрович

Ученая степень: доктор технических наук

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: Крымский филиал государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: ул. Киевская, 77, г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, 295034

E-mail: simfilial@mail.ru

Gorobey Vasily Petrovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Position: Leading Researcher

Affiliation: Crimean Branch of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: st. Kievskaya, 77, Simferopol, Republic Crimea, Russian Federation, 295034

E-mail: simfilial@mail.ru

Вердыш Михаил Валериевич

Ученая степень: кандидат экономических наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: Крымский филиал государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: ул. Киевская, 77, г. Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация, 295034

E-mail: supernova1984@list.ru

Verdysh Mikhail Valeriyevich

Degree: Candidate of Economic Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Crimean Branch of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: st. Kievskaya, 77, Simferopol, Republic Crimea, Russian Federation, 295034

E-mail: supernova1984@list.ru