

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 621.928.37

doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-258-281

Исследование радиальной скорости низконапорного гидроциклона – осветлителя вод поверхностного стока

Георгий Владимирович Дегтярев¹, Ольга Георгиевна Дегтярева²,
Олег Олегович Николов³

^{1,2}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

³Проектное экспертное объединение «Центр инжиниринг», Краснодар, Российская Федерация

¹degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-2719>

²marxotgeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

³eltsen2020@gmail.com

Аннотация. Цель: обоснование конструктивно-технологических параметров гидроциклонов-осветлителей посредством детализированного исследования радиальной скорости в значимых сечениях, а именно при переходе от цилиндрической к конической части аппарата, в технологии очистки воды для целей орошения. **Материалы и методы.** Моделирование и исследование сложного процесса изменения радиальной скорости осуществлено в два этапа. На первом этапе численным методом на базе комплекса программных продуктов ParaView и OpenFOAM был осуществлен эксперимент на гидроциклоне-осветлителе диаметром 170 мм, установлен предел изменения радиальной скорости при заданной скорости на входе в аппарат и получена база данных в виде матрицы. На втором этапе полученный массив экспериментальных данных, описывающих изменение скорости, отражающих физику происходящих процессов, был подвергнут цифровому анализу для получения зависимостей и экстремумов функции. **Результаты.** В ходе эксперимента и цифрового анализа установлено, что экстремальное наименьшее значение радиальной скорости наблюдается у стенки аппарата в точке минус 76 при скорости на входе в гидроциклон, равной 13,06 м/с. При определенных условиях радиальная скорость имеет нулевое значение; например, для аппарата диаметром 170 мм в сечении минус 50 мм при переходе из цилиндрической в коническую часть данное явление установлено при скорости на входе в гидроциклон, равной 18,75 м/с. **Выводы.** Обобщены данные об изменении радиальной скорости в гидроциклоне-осветлителе в зависимости от скорости на входе в аппарат в каждой точке слева и справа от воздушного шнура. Данные исследования позволят в будущем смоделировать оптимальные конструктивно-технологические параметры гидроциклона-осветлителя для заданных природных условий, что даст возможность довести качество воды до требований, приемлемых для орошения.

Ключевые слова: гидроциклоны-осветлители, радиальная скорость, математическое моделирование, численный эксперимент, цифровой анализ, гидродинамика гидроциклонов

Для цитирования: Дегтярев Г. В., Дегтярева О. Г., Николов О. О. Исследование радиальной скорости низконапорного гидроциклона – осветлителя вод поверхностного стока // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 4. С. 258–281. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-4-258-281>.



LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Investigation of the radial velocity of a low-pressure hydrocyclone clarifier of surface runoff waters

Georgy V. Degtyarev¹, Olga G. Degtyareva², Oleg O. Nikolov³

^{1,2}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

³Project Expert Association “Engineering Center”, Krasnodar, Russian Federation

¹degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-2719>

²marxotgeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

³eltsen2020@gmail.com

Abstract. Purpose: substantiate the design and technological parameters of hydrocyclones-clarifiers by means of a detailed study of the radial velocity in significant sections, namely, at the transition from the cylindrical to the conical part of the apparatus, in the technology of water purification for irrigation. **Materials and methods.** Modeling and study of the complex process of changing the radial velocity was carried out in two stages. At the first stage, an experiment was carried out on a 170 mm diameter hydrocyclone-clarifier using a numerical method based on the ParaView and OpenFOAM software package, the limit of radial velocity change was established at a given velocity at the inlet to the apparatus, and a database in the form of a matrix was obtained. At the second stage, the obtained array of experimental data describing the velocity change, reflecting the physics of the processes taking place, was subjected to digital analysis to obtain dependencies and extrema of the function. **Results.** During the experiment and digital analysis it was determined that the extreme minimum value of the radial velocity is observed at the apparatus wall at the point minus 76 at the velocity equal to 13.06 m/s at the hydrocyclone inlet. Under certain conditions, the radial velocity has a zero value; for example, for an apparatus with a diameter of 170 mm in a cross-section of minus 50 mm at the transition from the cylindrical to the conical part, this phenomenon was established at the velocity equal to 18.75 m/s at the hydrocyclone inlet. **Conclusions.** The data on the change in the radial velocity in the hydrocyclone-clarifier depending on the velocity at the apparatus inlet at each point to the left and to the right of the air cord are summarized. These studies will allow in the future to simulate the optimal design and technological parameters of the hydrocyclone clarifier for the specified natural conditions, which will make it possible to bring the water quality to the requirements acceptable for irrigation.

Keywords: hydrocyclones-clarifiers, radial velocity, mathematical modeling, numerical experiment, digital analysis, fluid dynamics of hydrocyclones

For citation: Degtyarev G. V., Degtyareva O. G., Nikolov O. O. Investigation of the radial velocity of a low-pressure hydrocyclone clarifier of surface runoff waters. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024;14(4):258–281. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-4-258-281>.

Введение. Экономическая независимость и безопасность страны зависит от обеспеченности ее ресурсами. Россия может позволить себе быть независимой и сильной. На большой площади страны мы имеем полный спектр ресурсов, способных полностью удовлетворить нужды страны.

Единственным условием для верной экономической стратегии является установление в каждом регионе приоритетного направления развития той или иной отрасли. Естественно, регионы, способные развивать и поддерживать агропромышленный комплекс, должны быть нацелены именно на эту сферу деятельности.

Научно-технический прогресс вмешивается во все сферы жизнедеятельности, и вот уже сложно себе представить сельское хозяйство без него. В настоящее время освоение агроландшафтов начинается с инженерных изысканий и определения места расположения источника пресной воды для орошения. Не всегда удастся использовать существующие мелиоративные системы, чаще это идеализированный вариант, тем более что уровень водохранилищ, а соответственно и каналов, питающихся из них, в настоящее время трудно спрогнозировать. Засушливые годы, увеличение орошаемых площадей, не всегда оформленных своевременно, – это негативные факторы.

Фермеры в настоящее время уже стремятся иметь несколько независимых источников орошения для получения гарантированного результата. Поэтому в Краснодарском крае, помимо использования вод мелиоративных систем, фермеры стараются различными способами аккумулировать воду и использовать ее при технологической необходимости. Часто используются с целью последующей аккумуляции воды поверхностного стока, которые, как известно, содержат достаточное количество примесей [1]. Данный ресурс обязательно нужно использовать, но удалив оттуда взвешенные частицы [2, 3].

Учеными было доказано, что устройство пескогравиеловок и отстойников сложно и неэффективно в горно-предгорных агроландшафтах [4]. Пескогравиеловки неудовлетворительно работают ввиду того, что активно обрабатывают лишь часть входящего потока и в осветленную воду поступают фракции недопустимого диаметра, при этом сброс воды на промыв

достигает 10 % и более. Отстойники весьма сложны и дороги в строительстве и эксплуатации, требуют специальных площадей значительных размеров, что не всегда возможно изыскать, в горно-предгорной зоне тем более.

Весьма эффективно выделение механических примесей из воды происходит под действием центробежных сил, которые могут превосходить силы тяжести в сотни и тысячи раз [5–7]. В той же степени сокращается продолжительность процесса и уменьшается объем центробежного аппарата по сравнению с отстойником [8]. До настоящего времени гидроциклоны-осветлители детально изучались и получен большой экспериментальный материал, вместе с тем не было изучено изменение скоростей в теле гидроциклона для совершенствования конструктивно-технологических параметров [9, 10].

Цель работы – обоснование конструктивно-технологических параметров гидроциклонов-осветлителей посредством детализированного исследования радиальной скорости в значимых сечениях, а именно при переходе от цилиндрической к конической части аппарата, в технологии очистки воды для целей орошения.

Материалы и методы. Исследование радиальной скорости является сложным процессом, в котором необходимо учитывать ряд основных факторов, влияющих на этот процесс и характеризующих его [11, 12]. При формировании математических моделей требуется принять во внимание сложность объекта исследования, в т. ч. обусловленную нелинейностью поведения ряда факторов [13]. Это приводит к недостоверности при малом количестве экспериментов, в связи с чем необходимо многократно воспроизводить эксперимент и собирать большой объем экспериментальных данных, затрудняющих их обработку [14, 15]. Процесс усложняется еще и тем, что сложно осуществить замеры скоростей в гидроциклоне без моделирования в современных программных комплексах [16, 17]. Для анализа использовался программный продукт OpenFOAM, имитирующий физический

процесс поведения жидкости в теле гидроциклона при помощи искусственной системы. Для чистоты эксперимента и точности воспроизведения аппарата он был замоделирован в 3D-виде с использованием программного продукта FreeCAD. Фотофиксация и сопоставление скоростей осуществлялись при помощи сетки, наложенной в системе Salome. За окончательную визуализацию отвечал программный комплекс ParaView.

Для исследования посредством математического анализа радиальной скорости в теле гидроциклона была использована модель гидроциклона диаметром 170 мм с наложенной сеткой, изображенная на рисунке 1 [18]. Радиальная скорость исследовалась в значимых для аппарата сечениях, и в данном случае констатировалось ее изменение в сечении минус 50 мм по конусу от перехода цилиндрической части в коническую по правой и левой стороне от оси отдельно.

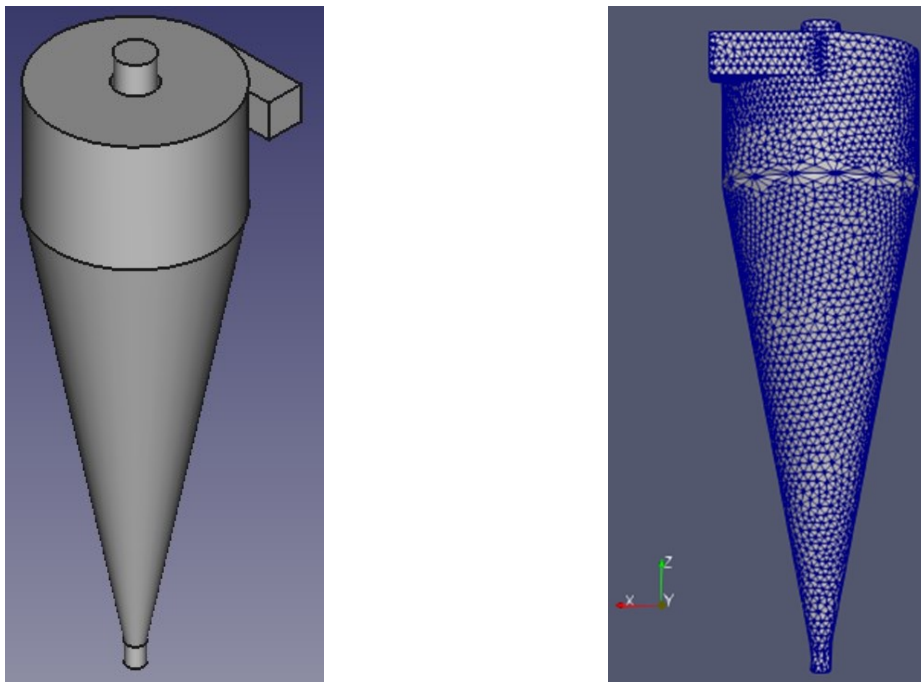


Рисунок 1 – Расчетная модель гидроциклона-осветлителя
Figure 1 – Calculation model of a hydrocyclone-clarifier

Результаты и обсуждение. В результате имитации физического процесса изменения радиальной скорости в зависимости от скорости входящего потока $V_{\text{ВХ}} = 10; 15$ и 20 м/с получены визуализированные данные в ви-

де растровых моделей, содержащих цветные карты изменения скорости, что представлено на рисунке 2.

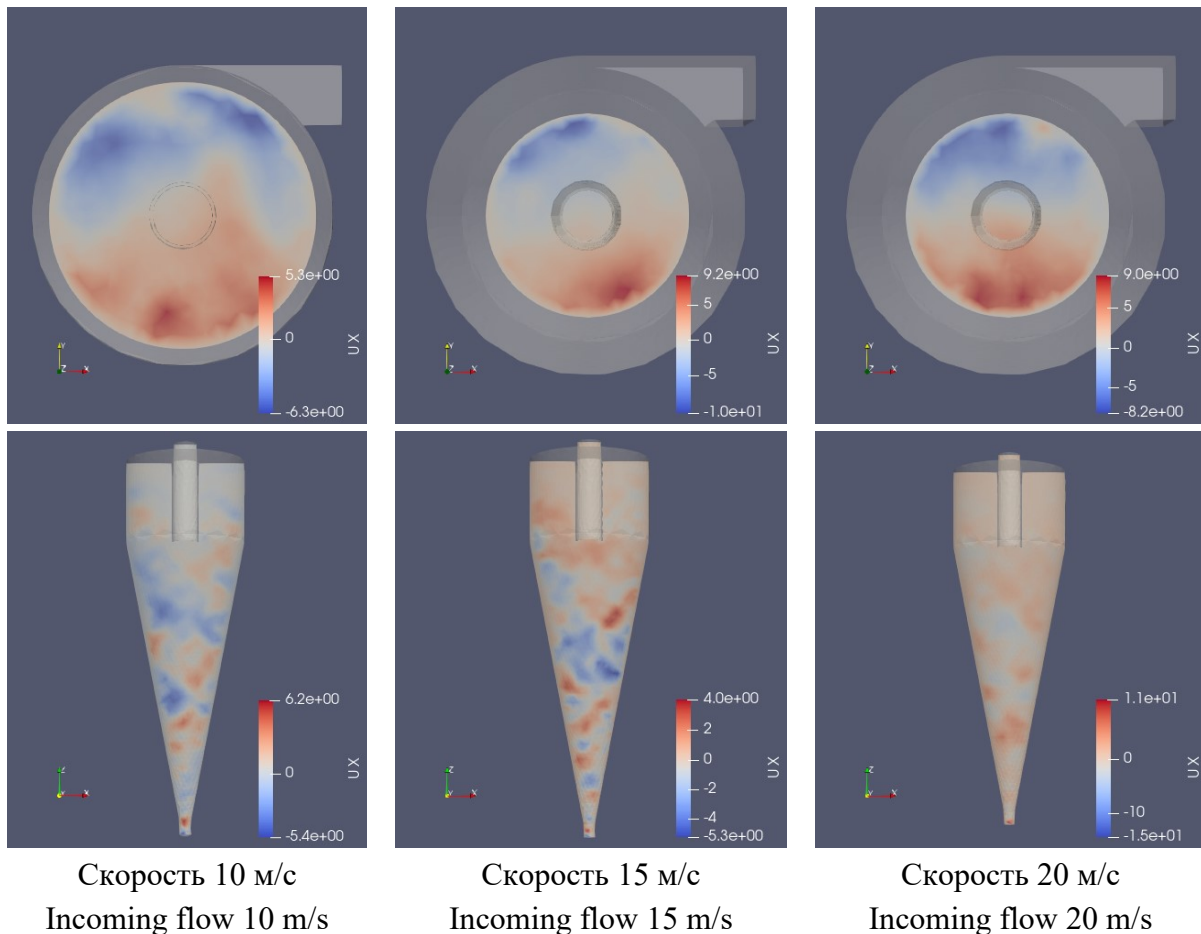


Рисунок 2 – Цветовые карты изменения скорости в гидроциклоне
Figure 2 – Color maps of velocity changes in a hydrocyclone

Для дальнейшего анализа использовались результаты экспериментов, отражающие изменение радиальной скорости в каждой точке по радиусу гидроциклона слева и справа от воздушного шнура в зависимости от скорости во входном патрубке. Проведенный с представленными факторами эксперимент позволил сформировать базу данных, фрагмент которой имеет следующий вид: $[-75,38; 10,00; -0,64]$, $[-75,20; 10,00; -0,65]$, ... $[-1,53; 10,00; 0,28]$, $[-1,35; 10,00; 0,29]$, ... $[-75,38; 15,00; -0,06]$, $[-75,20; 15,00; -0,08]$, ... $[-1,35; 15,00; -0,18]$, $[-1,18; 15,00; -0,19]$, ... $[-75,38; 20,00; 0,08]$, $[-75,20; 20,00; 0,09]$, ... $[-1,35; 20,00; 1,51]$, $[-1,18; 20,00; 1,50]$..., где дифференциальные элементы в матрице означают следующее: z –

радиальная скорость, м/с; x – сечение по радиусу, мм; y – скорость на входе, м/с.

Данные приводятся в виде матрицы для удобства их использования при получении математической модели в программе wxMaxima, для чего вначале воспользовались файлом *s:lsquares_estimates*:

$$(M, [x, y, z], z = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2, [a, b, c, d, e, f]), \quad (1)$$

и получили коэффициенты в уравнении, а саму математическую модель представили в виде полинома второй степени.

Вид математической модели радиальной скорости (м/с) в правой части гидроциклона в зависимости от исследуемых факторов:

$$z(x, y) = 2,08352 - 0,0357 \cdot x - 0,16758 \cdot y + 0,0029 \cdot x \cdot y - 2,94955 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,00408 \cdot y^2, \quad (2)$$

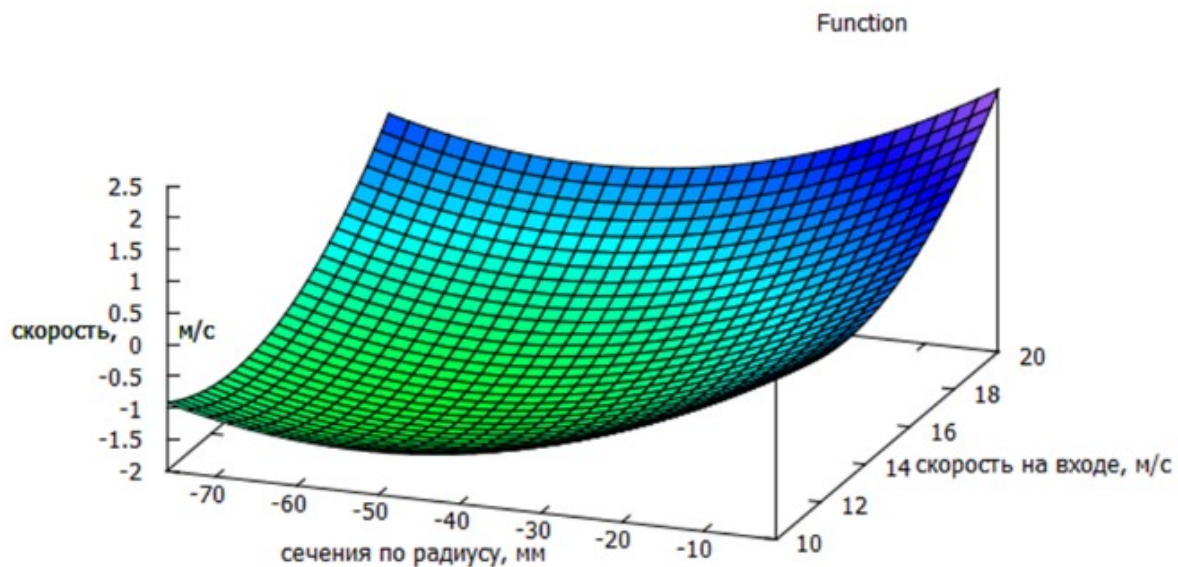
и в левой части:

$$z(x, y) = 7,57485 + 0,07952 \cdot x - 1,10274 \cdot y + 1,39194 \cdot 10^{-4} \cdot x \cdot y + 7,4397 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,04174 \cdot y^2. \quad (3)$$

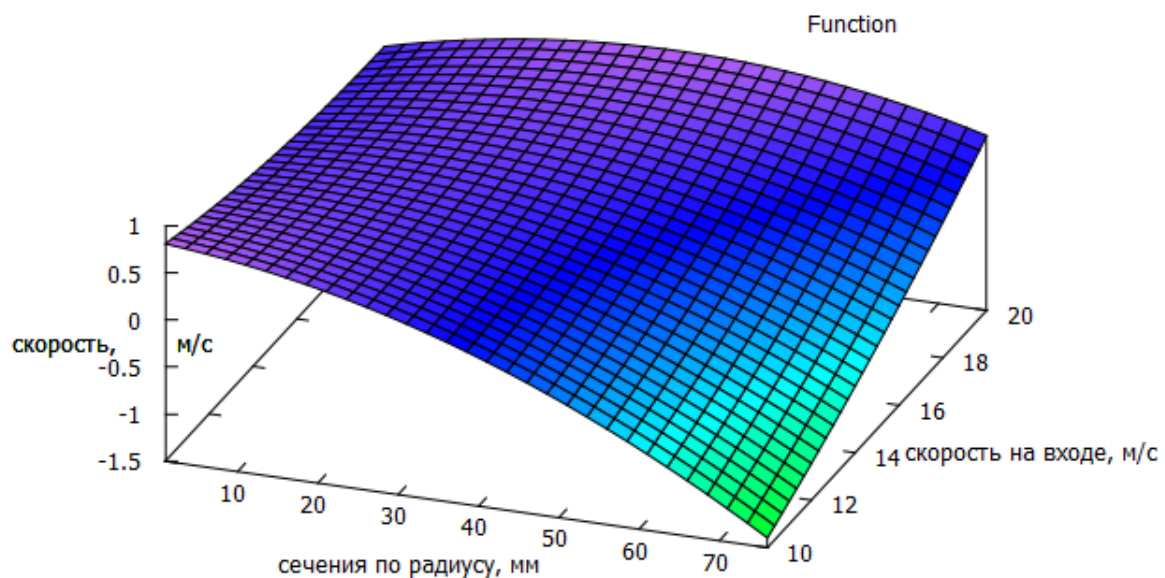
Реализованные численные исследования с применением многофункциональных программных комплексов позволили получить поверхности функции отклика, отражающие изменение радиальной скорости. Поверхности функции отклика по математической модели изменения радиальной скорости в гидроциклоне диаметром 170 мм в сечении по конусу минус 50 мм по левой и правой стороне от положения на радиусе и скорости входящего потока $V_{\text{вх}}$ (м/с) при одном тангенциальном входе представлены на рисунке 3.

Анализ поверхности функции отклика по математической модели изменения радиальной скорости по левой стороне от положения на радиусе позволяет констатировать, что при изменении аргументов по оси ОХ в каждой точке по радиусу в гидроциклоне от минус 76,0 до минус 1,0 мм,

а также по оси ОУ, скорости на входе в гидроциклон, от 10 до 20 м/с значения радиальной скорости, т. е. функция отклика, изменяются от минус 2,0 до плюс 2,5 м/с. То, что поверхность отклика сложно выгнута, указывает на безусловное наличие экстремальных значений в исследуемом диапазоне аргументов [19].



a – по левой стороне / *a* – leftward



b – по правой стороне / *b* – rightward

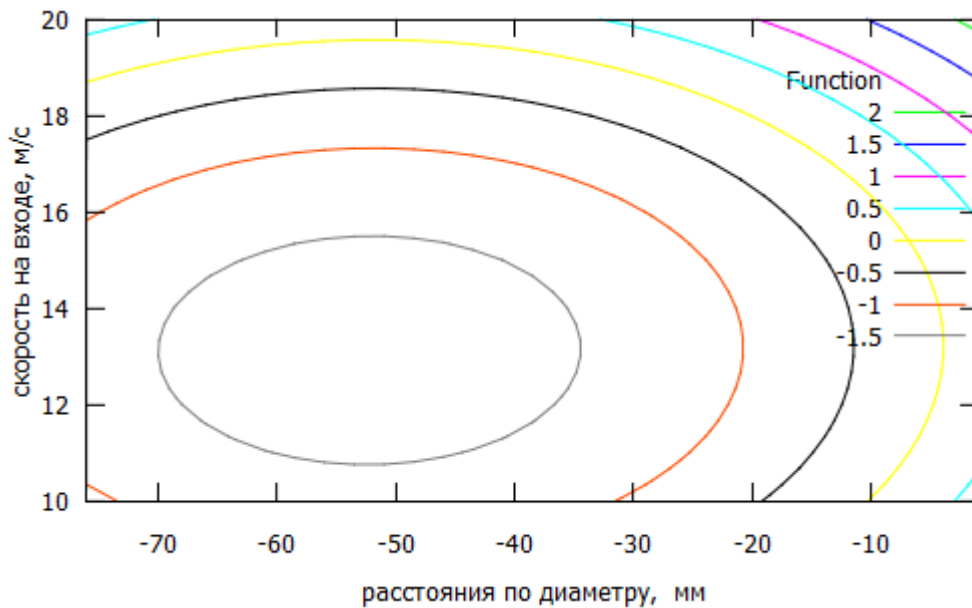
Рисунок 3 – Поверхности функции отклика по математической модели изменения радиальной скорости

Figure 3 – Response function surfaces according to the mathematical model of radial velocity change

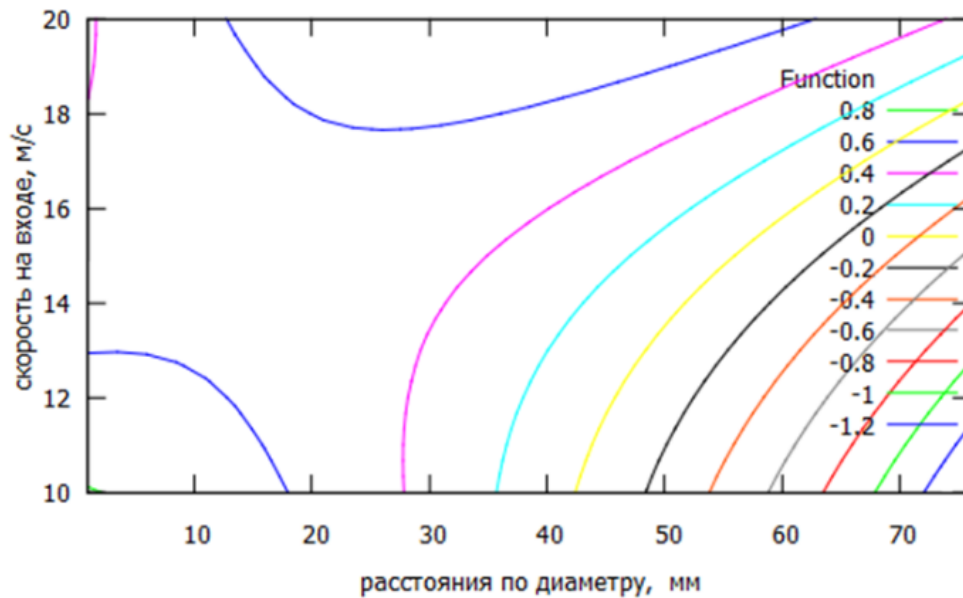
Анализ поверхности функции отклика по математической модели изменения радиальной скорости по правой стороне от положения на радиусе позволяет констатировать, что при изменении аргументов по оси ОХ, в каждой точке по радиусу в гидроциклоне от 76,0 до 1,0 мм, а также по оси ОУ, скорости на входе в гидроциклон, от 10 до 20 м/с значения радиальной скорости, т. е. функции отклика, изменяются от минус 1,5 до плюс 1,0 м/с. Сложно выгнутая поверхность отклика указывает на безусловное наличие экстремальных значений в исследуемом диапазоне аргументов.

Дальнейшее исследование процесса изменения радиальной скорости в гидроциклоне диаметром 170 мм в сечении по конусу минус 50 мм по левой и правой сторонам от положения на радиусе и скорости входящего потока $V_{\text{ВХ}}$ (м/с) при одном тангенциальном входе от принятых к исследованию факторов предполагает получение линий равных уровней по функции отклика, что выполняется посредством файла contour plot в программе wxMaxima и представлено на рисунке 4 [20].

Анализ линий равных уровней по функции отклика по математической модели радиальной скорости в гидроциклоне диаметром 170 мм в сечении по конусу минус 50 мм по левой стороне от положения на радиусе и скорости входящего потока $V_{\text{ВХ}}$ (м/с) при одном тангенциальном входе позволяет констатировать, что при изменении аргументов по оси ОХ, расстояний по диаметру в гидроциклоне, от минус 76,0 до минус 1,0 мм, а также по оси ОУ, скорости на входе в гидроциклон, от 10 до 20 м/с значения радиальной скорости, т. е. функции отклика, изменяются от минус 1,5 до плюс 2,0 м/с по уточненным данным. При этом явно подтвердилось предположение, что функция отклика обладает экстремальными значениями в исследуемом диапазоне аргументов.



a – по левой стороне / *a* – leftward



b – по правой стороне / *b* – rightward

Рисунок 4 – Линии равных уровней по поверхности функции отклика
Figure 4 – Isolevel lines over the response function surface

Анализ линий равных уровней по функции отклика по математической модели радиальной скорости в гидроциклоне диаметром 170 мм в сечении по конусу минус 50 мм по правой стороне от положения на радиусе и скорости входящего потока $V_{\text{вх}}$ (м/с) при одном тангенциальном входе позволяет констатировать, что при изменении аргументов по оси ОХ, расстояний по диаметру в гидроциклоне, от 76,0 до 1,0 мм, а также по оси ОУ,

скорости на входе в гидроциклон, от 10 до 20 м/с значения радиальной скорости, т. е. функции отклика, изменяются от минус 1,2 до плюс 0,8 м/с по уточненным данным. При этом явно подтвердилось предположение, что функция отклика обладает экстремальными значениями в исследуемом диапазоне аргументов.

Детализация исследования математической модели изменения радиальной скорости в гидроциклоне-осветлителе диаметром 170 мм в сечении по конусу минус 50 мм при переходе цилиндрической части в коническую по правой и левой стороне от оси отдельно при одном тангенциальном входе предполагает выведение на постоянные уровни последовательно каждого из аргументов. Вначале осуществим установку на постоянные уровни скорости на входе в аппарат, приняв следующие функции: $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 15)$; $F_3(x; 20)$.

Анализ функции отклика при постоянной скорости на входе в аппарат по левой стороне $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 15)$; $F_3(x; 20)$ позволил получить следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(x; 10) = 7,4397 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,07812806 \cdot x + 0,72145, \quad (4)$$

$$F_2(x; 15) = 7,4397 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,07743209 \cdot x + 0,42525, \quad (5)$$

$$F_3(x; 20) = 7,4397 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,07673612 \cdot x + 2,21605. \quad (6)$$

Анализ функции отклика при постоянной скорости на входе в аппарат по правой стороне $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 15)$; $F_3(x; 20)$ позволил получить нижеследующие упрощенные уравнения:

$$F_1(x; 10) = -2,95 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,006 \cdot x + 0,824, \quad (7)$$

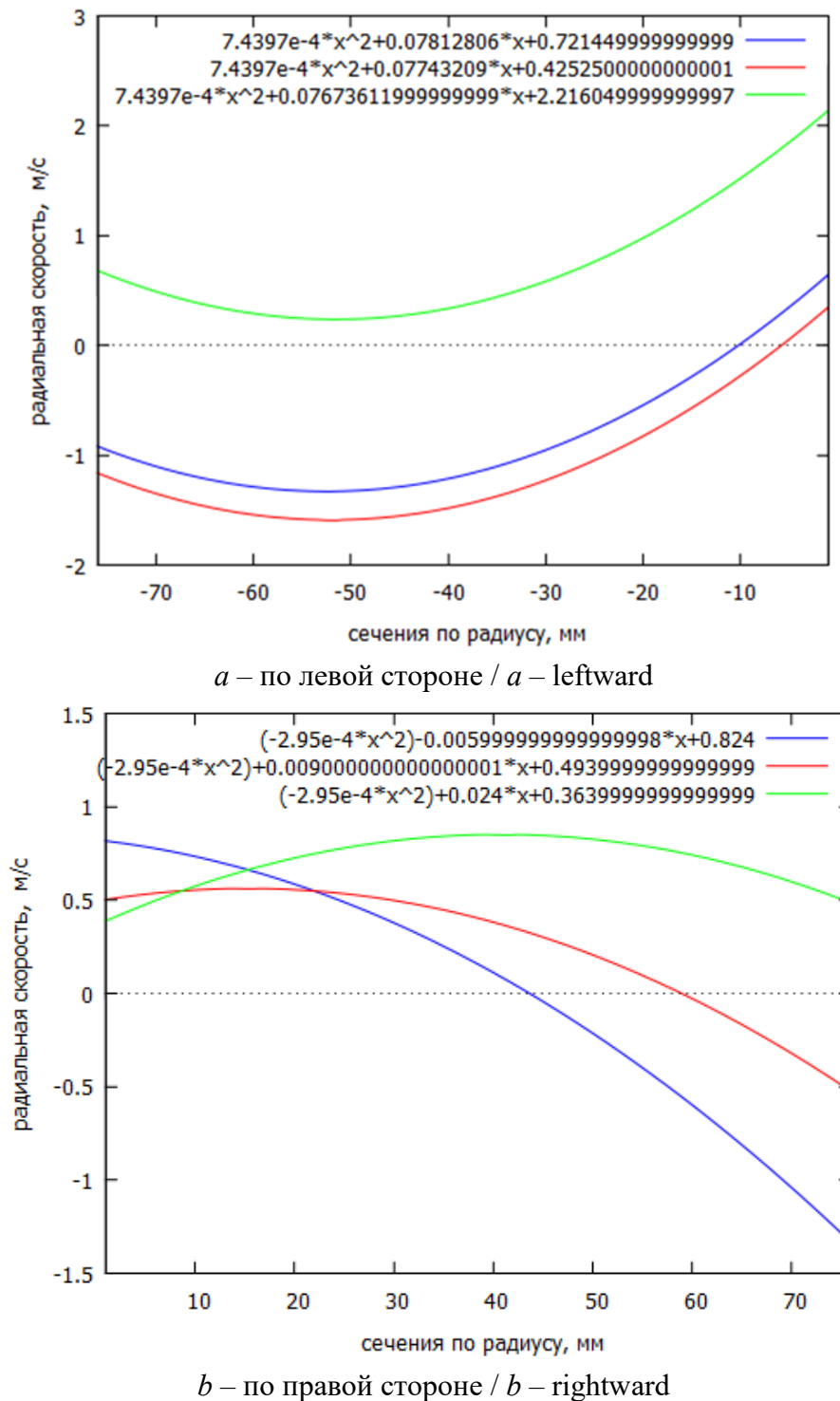
$$F_2(x; 15) = -2,95 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,009 \cdot x + 0,494, \quad (8)$$

$$F_3(x; 20) = -2,95 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,024 \cdot x + 0,364. \quad (9)$$

Графическая интерпретация уравнений представлена на рисунке 5.

Прежде всего необходимо отметить, что связь между функцией отклика, т. е. радиальной скоростью, и аргументами, а именно сечением по радиусу в гидроциклоне, при любой постоянной скорости на входе в

аппарат по левой стороне имеет экстремальное значение по минимуму,
 а по правой стороне аппарата – по максимуму.



**Рисунок 5 – Значения изменения радиальной скорости
 в гидроциклоне при постоянных скоростях на входе
 в аппарат $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 15)$; $F_3(x; 20)$**

**Figure 5 – Values of changing radial velocity in a hydrocyclone at constant
 velocities on entering the apparatus $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 15)$; $F_3(x; 20)$**

Анализ математических моделей и функций отклика по левой стороне при постоянной наименьшей скорости на входе в аппарат $V_{\text{ВХ}} = 10$ м/с показывает, что экстремальное наименьшее значение радиальной скорости $V_{\text{РАД}} = -1,33$ м/с наблюдается в точке по радиусу гидроциклона, равной минус 53,85 мм. При приближении сечения по радиусу гидроциклона к стенке значение радиальной скорости уменьшается и становится равным $V_{\text{РАД}} = -0,90$ м/с, тогда как при приближении к центральной оси аппарата значение радиальной скорости еще уменьшается и меняет знак: $V_{\text{РАД}} = +0,64$ м/с. Нулевое значение по левой стороне аппарата радиальная скорость имеет в сечении по радиусу, равному минус 10,26 мм.

Анализ математических моделей и функций отклика по левой стороне при постоянной средней скорости на входе в аппарат $V_{\text{ВХ}} = 15$ м/с показывает, что наименьшее экстремальное значение радиальной скорости $V_{\text{РАД}} = -1,59$ м/с наблюдается для всей исследуемой взаимосвязи аргументов и функции при сечении по радиусу гидроциклона, равному минус 52,16 мм. При приближении сечения по радиусу гидроциклона к стенке значение радиальной скорости уменьшается: $V_{\text{РАД}} = -1,16$ м/с, что является наибольшим отрицательным значением для данного сечения по радиусу, тогда как при приближении к центральной оси аппарата значение радиальной скорости увеличивается и составляет $V_{\text{РАД}} = +0,35$ м/с, это будет наименьшее положительное значение радиальной скорости, но уже для данного сечения. Нулевое значение радиальная скорость при данных условиях имеет в сечении по радиусу, равному минус 5,80 мм.

Анализ математических моделей и функций отклика по левой стороне при постоянной наибольшей скорости на входе в аппарат $V_{\text{ВХ}} = 20$ м/с показывает, что наименьшее экстремальное значение радиальной скорости $V_{\text{РАД}} = 0,23$ м/с наблюдается для всей исследуемой взаимосвязи аргументов

и функции при сечении по радиусу гидроциклона, равному минус 52,16 мм. При приближении сечения по радиусу гидроциклона к стенке значение радиальной скорости увеличивается и составляет $V_{\text{РАД}} = +0,69$ м/с, это наибольшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения, тогда как при приближении к центральной оси аппарата значение радиальной скорости значительно увеличивается до $V_{\text{РАД}} = +2,15$ м/с, и это наибольшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения.

Анализ математических моделей и функций отклика по правой стороне от оси гидроциклона при постоянной наименьшей скорости на входе в аппарат $V_{\text{ВХ}} = 10$ м/с показывает, что функция не имеет экстремального значения по радиальной скорости. При приближении сечения по радиусу гидроциклона к стенке значение радиальной скорости становится равным $V_{\text{РАД}} = -1,33$ м/с, и это наибольшее отрицательное значение для данного сечения, тогда как при приближении к центральной оси аппарата значение радиальной скорости соответствует $V_{\text{РАД}} = +0,82$ м/с, и это наибольшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения. Нулевое значение радиальной скорости будет иметь в сечении по радиусу, равному 43,65 мм.

Анализ математических моделей и функций отклика по правой стороне при постоянной средней скорости на входе в аппарат $V_{\text{ВХ}} = 15$ м/с показывает, что экстремальное наименьшее значение радиальной скорости соответствует $V_{\text{РАД}} = +0,56$ м/с и наблюдается в точке по радиусу гидроциклона, равной плюс 16,66 мм. При приближении сечения по радиусу гидроциклона к стенке значение радиальной скорости незначительно уменьшается и меняет направление: $V_{\text{РАД}} = -0,54$ м/с, тогда как при приближении к центральной оси аппарата значение радиальной скорости еще

уменьшается и опять меняет направление: $V_{\text{РАД}} = +0,50$ м/с. Нулевое значение радиальная скорость будет иметь в сечении по радиусу, равному плюс 58,82 мм.

Анализ математических моделей и функций отклика по правой стороне при постоянной наибольшей скорости на входе в аппарат $V_{\text{ВХ}} = 20$ м/с показывает, что наибольшее экстремальное значение радиальной скорости равно $V_{\text{РАД}} = 0,85$ м/с для всей исследуемой взаимосвязи аргументов и функции при сечении по радиусу гидроциклона, равному плюс 41,19 мм, это наибольшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения. При приближении сечения по радиусу гидроциклона к стенке значение радиальной скорости уменьшается и становится равным $V_{\text{РАД}} = +0,47$ м/с, тогда как при приближении к центральной оси аппарата значение радиальной скорости еще уменьшается и становится равным $V_{\text{РАД}} = +0,38$ м/с, это наименьшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения.

Далее осуществили установку на постоянные уровни расстояния по радиусу аппарата и, воспользовавшись файлом plot 2d [$F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$] при следующих аргументах: $F_1(x; -76)$; $F_2(x; -37,5)$; $F_3(x; -1)$, а [x label, скорость на входе в гидроциклон, м/с], [y label, радиальная скорость, м/с], получили следующие упрощенные уравнения по левой стороне аппарата:

$$F_1(-76; y) = 0,04174 \cdot y^2 - 1,092161256 \cdot y + 5,8285007, \quad (10)$$

$$F_2(-37,5; y) = 0,04174 \cdot y^2 - 1,097520225 \cdot y + 5,6390578125, \quad (11)$$

$$F_3(-1; y) = 0,04174 \cdot y^2 - 1,102622806 \cdot y + 7,49607397. \quad (12)$$

Осуществив установку на постоянные уровни расстояния по радиусу аппарата и воспользовавшись файлом plot 2d [$F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$] при следующих аргументах: $F_1(x; 76)$; $F_2(x; 37,5)$; $F_3(x; 1)$, а [x label, скорость на входе в гидроциклон, м/с], [y label, радиальная скорость, м/с], получили следующие упрощенные уравнения по правой стороне аппарата:

$$F_1(76; y) = 0,00408 \cdot y^2 + 0,05282 \cdot y - 2,33334, \quad (13)$$

$$F_2(37,5; y) = 0,00408 \cdot y^2 - 0,05883 \cdot y + 0,32999, \quad (14)$$

$$F_3(1; y) = 0,00408 \cdot y^2 - 0,16468 \cdot y + 2,04752. \quad (15)$$

Графическая интерпретация уравнений представлена на рисунке 6.

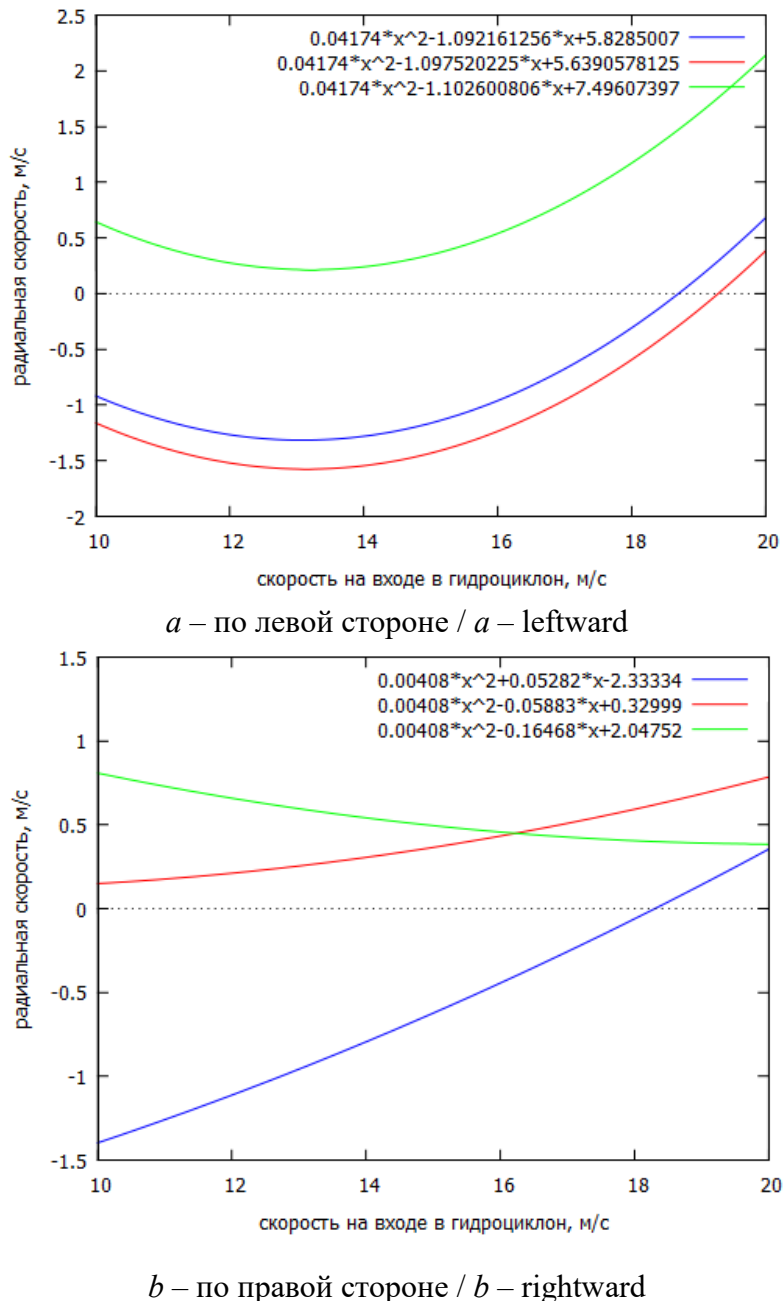


Рисунок 6 – Значения изменения радиальной скорости в гидроциклоне при постоянных расстояниях по радиусу аппарата $F_1(x; -76/76)$; $F_2(x; -37,5/37,5)$; $F_3(x; -1/1)$
Figure 6 – Values of changing radial velocity in a hydrocyclone at constant distances along the apparatus radius $F_1(x; -76/76)$; $F_2(x; -37.5/37.5)$; $F_3(x; -1/1)$

Установлено, что изменение радиальной скорости в правой и левой части гидроциклона-осветлителя существенно отличается. Связь между функцией отклика в правой части аппарата при любых постоянных расстояниях по радиусу $F_1(x; 76)$; $F_2(x; 37,5)$; $F_3(x; 1)$ не имеет экстремальных значений. В левой части аппарата при любых постоянных расстояниях по радиусу $F_1(x; -76)$; $F_2(x; -37,5)$; $F_3(x; -1)$ имеется экстремальное значение по минимуму.

Анализ математических моделей и функций отклика по левой стороне при постоянном расстоянии по радиусу аппарата $F_1(x; -76)$, т. е. у его стенки, показывает, что экстремальное наименьшее значение радиальной скорости $V_{\text{РАД}} = -1,32$ м/с будет при скорости на входе в гидроциклон, равной 13,06 м/с. При наименьшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 10$ м/с, значение радиальной скорости уменьшается: $V_{\text{РАД}} = -0,90$ м/с, тогда как при наибольшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 20$ м/с, значение радиальной скорости еще больше уменьшается, меняет направление и составляет $V_{\text{РАД}} = 0,68$ м/с. Нулевое значение радиальной скорости будет иметь при скорости на входе в гидроциклон, равной 18,75 м/с.

Анализ математических моделей и функций отклика по левой стороне при среднем постоянном расстоянии по радиусу аппарата $F_2(x; -37,5)$, т. е. практически по середине радиуса аппарата, показывает, что наименьшее экстремальное значение радиальной скорости составляет $V_{\text{РАД}} = -1,58$ м/с при скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 13,20$ м/с. При наименьшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 10$ м/с, значение радиальной скорости составляет $V_{\text{РАД}} = -1,15$ м/с, и это наименьшее отрицательное значение скорости для данного сечения, тогда как при наибольшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 20$ м/с, значение радиальной скорости $V_{\text{РАД}} = 0,40$ м/с, это наименьшее положительное значение ради-

альной скорости для данного сечения. Нулевое значение радиальная скорость будет иметь при скорости на входе в гидроциклон, равной 19,30 м/с.

Анализ математических моделей и функций отклика по левой стороне при постоянном расстоянии по радиусу аппарата $F_3(x; -1)$, т. е. практически при приближении к оси аппарата, показывает, что экстремальное наименьшее положительное значение радиальной скорости, равное $V_{РАД} = 0,20$ м/с, будет при скорости на входе в гидроциклон, равной 13,15 м/с. При наименьшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{ВХ} = 10$ м/с, значение радиальной скорости увеличивается и составляет $V_{РАД} = 0,64$ м/с, и это наибольшее положительное значение скорости для данного сечения, тогда как при наибольшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{ВХ} = 20$ м/с, значение радиальной скорости значительно увеличивается и соответствует $V_{РАД} = 2,14$ м/с, и это наибольшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения и вообще для данного исследования системы.

Анализ математических моделей и функций отклика по правой стороне при постоянном расстоянии по радиусу аппарата $F_1(x; 76)$, т. е. у стенки аппарата, показал, что при наименьшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{ВХ} = 10$ м/с, радиальная скорость соответствует значению $V_{РАД} = -1,42$ м/с, это наименьшее отрицательное значение скорости для данного сечения, тогда как при наибольшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{ВХ} = 20$ м/с, значение радиальной скорости составляет $V_{РАД} = 0,36$ м/с, это наименьшее положительное значение скорости для данного сечения. Нулевое значение радиальная скорость будет иметь при скорости на входе в гидроциклон, равной 18,30 м/с.

Анализ математических моделей и функций отклика по правой стороне при среднем постоянном расстоянии по радиусу аппарата $F_2(x; 37,5)$, т. е. практически по середине радиуса аппарата, показывает, что при

наименьшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 10$ м/с, значение радиальной скорости составляет $V_{\text{РАД}} = 0,16$ м/с, тогда как при наибольшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 20$ м/с, значение радиальной скорости значительно увеличивается и составляет $V_{\text{РАД}} = 0,78$ м/с, это наибольшее положительное значение радиальной скорости для данного сечения.

Анализ математических моделей и функций отклика по правой стороне при постоянном расстоянии по радиусу аппарата $F_3(x; 1)$, т. е. практически при приближении к оси аппарата, показывает, что при наименьшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 10$ м/с, значение радиальной скорости составляет $V_{\text{РАД}} = 0,82$ м/с, это наибольшее положительное значение скорости для данного сечения, тогда как при наибольшей скорости на входе в гидроциклон, равной $V_{\text{ВХ}} = 20$ м/с, значение радиальной скорости значительно уменьшается и составляет $V_{\text{РАД}} = 0,38$ м/с.

Выводы

1 Полученные данные об изменении радиальной скорости и понимание гидродинамических процессов позволяют оптимизировать конструктивно-технологические параметры гидроциклона-осветлителя для природных условий.

2 Анализ поверхности функции отклика по математической модели изменения радиальной скорости позволяет констатировать, что по левой стороне она изменяется от минус 2,0 до плюс 2,5 м/с, а по правой стороне от минус 1,5 до плюс 1,0 м/с. При этом имеются такие сочетания факторов, которые обуславливают наличие экстремальных значений.

3 Анализ линий равных уровней по функции отклика по левой и правой стороне позволил получить уточненные данные об изменении радиальной скорости, фактическое изменение составляет от минус 1,5 до плюс 2,0 и

от минус 1,2 до плюс 0,8 м/с соответственно. При этом также подтвердилось наличие экстремальных значений в исследуемом диапазоне аргументов.

4 Смена знаков экстремумов по функции требует дальнейшего изучения процессов гидродинамики в аппарате с учетом компонентов тангенциальной и вертикальной скоростей в совокупности.

Список источников

1. Семенов А. В., Латышев Н. С., Петрук Р. В. Современные решения аккумуляции и очистки дождевых и талых вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 9. С. 56–59. DOI: 10.35776/VST.2023.09.09. EDN: IELGXZ.

2. Лагуткин М. Г., Баранова Е. Ю., Пигарев В. М. Очистка оборотной воды от механических примесей в цилиндрикоконических гидроциклонах с приемным бункером // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 3. С. 24–28. EDN: PWUKMP.

3. Пат. 2356631 Рос. Федерация, МПК В 03 С 1/16. Ленточный магнитный сепаратор / Епутаев Г. А., Данилова М. Г., Варламов Б. С.; заявитель и патентообладатель Сев.-Кавк. гор.-металлург. ин-т (гос. технол. ун-т). № 2007147330/03; заявл. 18.12.07; опубл. 27.05.09, Бюл. № 15. 4 с. EDN: FBQIUX.

4. 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. EDN: COAOLS.

5. Байманов К. И., Назарбеков К. К., Байманов Р. К. Исследование режима работы ирригационных отстойников в нижнем течении реки Амударья // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 2. С. 10–14. EDN: AVVFSC.

6. Аппаратурное оформление совмещенных процессов в технологии водоподготовки / В. В. Бородычев, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, М. И. Филимонов // Новые технологии. 2020. Т. 16, № 5. С. 55–62. DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-5-55-62. EDN: AANTMR.

7. Пат. 2350395 Рос. Федерация, МПК В 03 С 1/04. Магнитный центробежный сепаратор / Епутаев Г. А., Данилова М. Г., Варламов Б. С.; заявитель и патентообладатель Сев.-Кавк. гор.-металлург. ин-т (гос. технол. ун-т). № 2007143747/03; заявл. 26.11.07; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. 6 с. EDN: ZHHVBZ.

8. Минигазимов Н. С. Нефть и тяжелые металлы (экологические аспекты) // Башкирский экологический вестник. 1999. № 2. С. 24–29. EDN: ROHBKP.

9. 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. EDN: NBDNJI.

10. Оптимизация конструктивно-режимных параметров гидроциклона с учетом натуральных исследований / М. И. Ламскова, М. И. Филимонов, Ю. И. Сухарев, А. Е. Новиков, С. В. Бородычев // Природообустройство. 2020. № 4. С. 61–67. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-4-61-67. EDN: DPRCLT.

11. Ламскова М. И., Филимонов М. И., Новиков А. Е. 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: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1122> (дата обращения: 20.06.2024). EDN: WZWFJB.

12. Дегтярев Г. В. Сравнительный анализ процессов в низконапорных гидроциклонах-осветлителях различных модификаций // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 6. С. 115–118. EDN: HTNFKF.
13. Yablonskiy V. O. Modeling of viscoplastic fluids separation in a cylindrical hydrocyclone by pressure flotation // Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol. 59, № 3–4. P. 191–197. <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01227-z>. EDN: HQSSFJ.
14. Дегтярев Г. В. Статистические математические модели процессов в низконапорных гидроциклонах в зависимости от конструктивных и технологических факторов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 3. С. 202–212. EDN: JUGVHV.
15. Yablonskiy V. O. Modeling the effect of design parameters of a cylindrical hydrocyclone on flotation cleaning performance of viscoplastic fluids // Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol. 58, № 9–10. P. 831–838. <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01169-6>. EDN: MLJYTK.
16. Епутаяев Г. А., Данилова М. Г., Варламов Б. С. Траектории движения магнитных частиц в дисковом сепараторе при мокром обогащении железосодержащих материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S16. С. 529–537. EDN: MDWYVR.
17. Лагуткин М. Г., Михальченкова А. Н., Бутрин М. М. Смещение пенообразующих жидкостей в гидроциклонах // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 9. С. 26–32. EDN: WKNJEB.
18. Результаты исследования влияния конструктивных элементов биконического гидроциклона на качество механической очистки жидкостей / Ю. А. Изюмов, Н. А. Тортика, Е. С. Киреева, А. А. Краснов // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. 2022. Т. 1, № 1(47). С. 16–23. EDN: AROJRL.
19. Дегтярев В. Г., Дегтярева О. Г., Дегтярев Г. В. Исследование распределения порового давления под подземной плотиной в горной долине при аккумуляции атмосферных осадков // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 4. С. 396–412. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1417> (дата обращения: 20.06.2024). DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-396-412. EDN: ZNGLCO.
20. Дегтярев В. Г., Дегтярева О. Г., Секисов А. Н. Исследование полных напряжений в теле водовода прямоугольного поперечного сечения, расположенного на глинистом основании // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 2. С. 299–317. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1369> (дата обращения: 20.06.2024). DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-299-317. EDN: KAWIVU.

References

1. Semenov A.V., Latyshev N.S., Petruk R.V., 2023. *Sovremennye resheniya akkumulyatsii i ochistki dozhdevykh i talykh vod* [Modern solutions for accumulation and purification of rainfall and snow-melt water]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], no. 9, pp. 56-59, DOI: 10.35776/VST.2023.09.09, EDN: IELGXZ. (In Russian).
2. Lagutkin M.G., Baranova E.Yu., Pigarev V.M., 2013. *Ochistka oborotnoy vody ot mekhanicheskikh primesey v tsilindrokonicheskikh gidrotsiklonakh s priemnym bunkerom* [Purification of circulating water from mechanical impurities in cylindrical-conical hydrocyclones with a receiving hopper]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], no. 3, pp. 24-28, EDN: PWUKMP. (In Russian).
3. Eputaev G.A., Danilova M.G., Varlamov B.S., 2007. *Lentochnyy magnitnyy separator* [Belt Magnetic Separator]. Patent RF, no. 2356631, EDN: FBQIUX. (In Russian).
4. Lamskova M.I., Novikov A.E., Filimonov M.I., Borodychev S.V., 2020. *Razrabot-*

ka dvukhkamernogo gidrotsyklona 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, EDN: COAOLS. (In Russian).

5. Baimanov K.I., Nazarbekov K.K., Baimanov R.K., 2020. *Issledovanie rezhima raboty irrigatsionnykh otstoynikov v nizhnem techenii reki Amudar'ya* [Study of the operating mode of irrigation sedimentation tanks in the lower reaches of the Amu Darya river]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 10-14, EDN: AVVFSC. (In Russian).

6. Borodychev V.V., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M.I., 2020. *Apparurnoe oformlenie sovmeshchennykh protsessov v tekhnologii vodopodgotovki* [Instrumentation of the combined processes in water treatment technology]. *Novye tekhnologii* [New Technologies], vol. 16, no. 5, pp. 55-62, DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-5-55-62, EDN: AANTMR. (In Russian).

7. Eputaev G.A., Danilova M.G., Varlamov B.S., 2007. *Magnitnyy tsentrobezhnyy separator* [Magnetic Centrifugal Separator]. Patent RF, no. 2350395, EDN: ZHHVBZ. (In Russian).

8. Minigazimov N.S., 1999. *Neft' i tyazhelye metally (ekologicheskie aspekty)* [Oil and heavy metals (environmental aspects)]. *Bashkirskiy ekologicheskiy vestnik* [Bashkir Ecological Bulletin], no. 2, pp. 24-29, EDN: ROHBKP. (In Russian).

9. Golovanchikov A.B., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M.I., 2018. *Modelirovanie protsessov razdeleniya neodnorodnykh zhidkostnykh sistem v gidrotsyklone s uchetom kriteriev podobiya* [Modeling the process of separation of non-homogeneous liquid disperse systems in a hydrocyclone accounting for similarity criteria]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering], no. 2, pp. 34-38, EDN: NBDNJI. (In Russian).

10. Lamskova M.I., Filimonov M.I., Sukharev Yu.I., Novikov A.E., Borodychev S.V., 2020. *Optimizatsiya konstruktivno-rezhimnykh parametrov gidrotsyklona s uchetom naturnykh issledovaniy* [Optimization of design and operating parameters of a hydrocyclone taking into account field research]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 61-67, DOI: 10.26897/1997-6011/2020-4-61-67, EDN: DPRCLT. (In Russian).

11. Lamskova M.I., Filimonov M.I., Novikov A.E., 2016. [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: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1122> [accessed 20.06.2024], EDN: WZWFJB. (In Russian).

12. Degtyarev G.V., 2006. *Sravnitel'nyy analiz protsessov v nizkonapornykh gidrotsiklonakh-osvetlityakh razlichnykh modifikatsiy* [The comparative analysis of processes in the low-pressure hydrocyclone-illuminators of different modifications]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Sciences], no. 6, pp. 115-118, EDN: HTNFKF. (In Russian).

13. Yablonskiy V.O., 2023. Modeling of viscoplastic fluids separation in a cylindrical hydrocyclone by pressure flotation. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 59, no. 3-4, pp. 191-197, <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01227-z>, EDN: HQSSFJ.

14. Degtyarev G.V., 2006. *Statisticheskie matematicheskie modeli protsessov v nizkonapornykh gidrotsiklonakh v zavisimosti ot konstruktivnykh i tekhnologicheskikh faktorov* [Processes statistic mathematical models in low pressure hydro cyclones depending on design and technological factors]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of Kuban State Agrarian University], no. 3, pp. 202-212, EDN: JUGVHV. (In Russian).

15. Yablonskiy V.O., 2023. Modeling the effect of design parameters of a cylindrical

hydrocyclone on flotation cleaning performance of viscoplastic fluids. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 58, no. 9-10, pp. 831-838, <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01169-6>, EDN: MLJYTK.

16. Eputaev G.A., Danilova M.G., Varlamov B.S., 2009. *Traektorii dvizheniya magnetnykh chastits v diskovom separatore pri mokrom obogashchenii zhelezosoderzhashchikh materialov* [Motion pass of magnetic particles in the disk separator at wet enrichment of ferrous materials]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. S16, pp. 529-537, EDN: MDWYVR. (In Russian).

17. Lagutkin M.G., Mikhachenkova A.N., Butrin M.M., 2016. *Smeshenie penobrazuyushchikh zhidkostey v gidrotsiklonakh* [Mixing foaming liquids in hydrocyclones]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Industrial Safety], no. 9, pp. 26-32, EDN: WKNJEB. (In Russian).

18. Izyumov Yu.A., Tortika N.A., Kireeva E.S., Krasnov A.A., 2022. *Rezultaty issledovaniya vliyaniya konstruktivnykh elementov bikonicheskogo gidrotsyklona na kachestvo mekhanicheskoy ochistki zhidkostey* [Results of a study of the influence of structural elements of a biconical hydrocyclone on the quality of mechanical cleaning of liquids]. *Sovershenstvovanie metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzheniy* [Improving the Methods of Hydraulic Calculations of Water-Conducting and Treatment Facilities], vol. 1, no. 1(47), pp. 16-23, EDN: AROJRL. (In Russian).

19. Degtyarev V.G., Degtyareva O.G., Degtyarev G.V., 2023. [Study of pore pressure distribution under an underground dam in a mountain valley during the atmospheric precipitation accumulation]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 4, pp. 396-412, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1417> [accessed 20.06.2024], DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-396-412, EDN: ZNGLCO. (In Russian).

20. Degtyarev V.G., Degtyareva O.G., Sekisov A.N., 2023. [Investigation of total stresses in rectangular section conduit body located on a clay base]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 2, pp. 299-317, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1369> [accessed 20.06.2024], DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-299-317, EDN: KAWIVU. (In Russian).

Информация об авторах

Г. В. Дегтярев – профессор, доктор технических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация, degtyarev.g.v@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2259-2719;

О. Г. Дегтярева – заведующая кафедрой, доктор технических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация, marxotgeo@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9312-9222;

О. О. Николов – главный инженер проекта, Проектное экспертное объединение «Центр инжиниринг», Краснодар, Российская Федерация, eltsen2020@gmail.com.

Information about the authors

G. V. Degtyarev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, degtyarev.g.v@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2259-2719;

O. G. Degtyareva – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, marxotgeo@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9312-9222;

O. O. Nikolov – Chief Engineer of the Project, Project Expert Association “Engineering Center”, Krasnodar, Russian Federation, eltsen2020@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 09.08.2024; одобрена после рецензирования 11.09.2024;
принята к публикации 01.10.2024.
The article was submitted 09.08.2024; approved after reviewing 11.09.2024; accepted for
publication 01.10.2024.*