

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 621.928.37

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-3-347-369

Исследование распределения радиальной скорости внутреннего потока в конической части гидроциклона-осветлителя

Георгий Владимирович Дегтярев¹, Ольга Георгиевна Дегтярева²,
Владислав Александрович Головкин³

^{1, 2, 3}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
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>

³niberiusone@bk.ru

Аннотация. Цель: исследовать распределение радиальной скорости внутреннего потока по длине конической части цилиндрикоконического гидроциклона – осветлителя оросительной воды и обосновать возможность управления гидравлической структурой потока регулируемой сливной насадкой. **Материалы и методы.** Трехмерную модель аппарата (диаметр и длина цилиндрической части 180 мм, длина конуса 420 мм, угол конусности 20°) построили в AutoCAD; расчетную сетку с размером ячейки 1,5 мм сгенерировали в cfMesh. Гидродинамический расчет выполняли в OpenFOAM по осредненным уравнениям Навье – Стокса с моделью турбулентности SSTk- ω при давлениях на входе 200, 300 и 400 кПа. Радиальную скорость анализировали в характерных сечениях конуса для двух вариантов – без насадки и с запатентованной коаксиальной спиральной насадкой при относительной проходной площади щели $K = 0,7–1,0$; зависимости аппроксимировали полиномом второй степени (МНК, wxMaxima). **Результаты.** Установлено, что изменение радиальной скорости по длине конуса неравномерно: на большей части конуса $|V_{\text{рад}}|$ не превышает $\sim 1,4$ м/с, тогда как максимальный размах локализован в зоне сопряжения конической и цилиндрической частей (сечение 0,42 м), где $V_{\text{рад}}$ изменяется от минус 4,99 до плюс 3,22 м/с (400 кПа). Установка регулируемой насадки устраняет глубокий отрицательный экстремум в зоне сопряжения, формируя направленный к периферии переток (до плюс 4,35 м/с), и усиливает радиальный перенос в средней части конуса (до плюс 1,98 м/с в сечении 0,28 м); изменение K в диапазоне 0,7–1,0 обеспечивает плавное регулирование. **Выводы.** Радиальная скорость максимально изменяется в зоне сопряжения; регулируемая сливная насадка позволяет целенаправленно управлять гидравлической структурой внутреннего потока, что создает предпосылки для повышения качества осветления оросительной воды.

Ключевые слова: гидроциклон-осветлитель, оросительная вода, внутренний поток, радиальная скорость, центробежное осветление, численный эксперимент, цифровой анализ, вычислительная гидродинамика

Источник финансирования: собственные средства.

Для цитирования: Дегтярев Г. В., Дегтярева О. Г., Головкин В. А. Исследование распределения радиальной скорости внутреннего потока в конической части гидроциклона-осветлителя // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 347–369. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-347-369>.

HYDROTECHNICAL ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Investigation of the internal flow radial velocity distribution
in the conical part of the clarifying hydrocyclone**

Georgy V. Degtyarev¹, Olga G. Degtyareva², Vladislav A. Golovko³

^{1, 2, 3}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, 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>

³niberiusone@bk.ru

Abstract. Purpose: to study the distribution of the radial velocity of the internal flow along the length of the conical part of a cylindrical-conical clarifying hydrocyclone of irrigation water and to substantiate the possibility of controlling the hydraulic structure of the flow using an adjustable drainpipe. **Materials and methods.** A three-dimensional model of the device (diameter and length of the cylindrical section 180 mm, cone length 420 mm, cone angle 20°) was constructed in AutoCAD; the computational grid with a cell size of 1.5 mm was generated in cfMesh. The hydrodynamic calculation was performed in OpenFOAM using the averaged Navier – Stokes equations with the SSTk- ω turbulence model at inlet pressures of 200, 300, and 400 kPa. The radial velocity was analyzed in characteristic cone sections for two variants: without nozzle and with a patented coaxial spiral one at a relative gap area $K = 0.7–1.0$; the dependences were approximated by a second-degree polynomial (LSP, wxMaxima). **Results.** It was found that the radial velocity change along the cone length is non-uniform: over most of the cone, $|V_{rad}|$ does not exceed ~ 1.4 m/s, while the maximum swing is localized in the junction zone of the conical and cylindrical parts (0.42 m section), where V_{rad} varies from minus 4.99 to plus 3.22 m/s (400 kPa). The installation of an adjustable nozzle eliminates the deep negative extremum in the transition zone, creating a peripheral overflow (up to 4.35 m/s) and enhances radial transport in the middle of the cone (up to 1.98 m/s in a 0.28 m cross-section) K variation in the range of 0.7–1.0 ensures smooth regulation. **Conclusions.** The radial velocity varies most in the transition zone; the adjustable drainpipe allows for targeted control of the hydraulic structure of the internal flow, which creates the prerequisites for improving the clarification quality of irrigation water.

Keywords: clarifying hydrocyclone, irrigation water, internal flow, radial velocity, centrifugal clarification, numerical experiment, digital analysis, computational fluid dynamics

Funding source: own funds.

For citation: Degtyarev G. V., Degtyareva O. G., Golovko V. A. Investigation of the internal flow radial velocity distribution in the conical part of the clarifying hydrocyclone. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(3):347–369. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-347-369>.

Введение. Орошаемое земледелие предъявляет жесткие требования к качеству поливной воды. Присутствие взвешенных наносов снижает надежность дождевальной и особенно капельной техники, ускоряет износ рабочих органов и засоряет водовыпуски, поэтому осветление оросительной воды с удалением механических примесей является необходимым

элементом водоподготовки на мелиоративных системах [1]. Среди аппаратов центробежного осветления гидроциклон выделяется компактностью, отсутствием движущихся частей и высокой удельной производительностью, что обуславливает его широкое применение в технологии очистки воды для целей орошения [2, 3].

Теория и инженерные методы расчета гидроциклонов развиты в фундаментальных работах [4, 5] и обобщены [6]. Рабочий процесс определяется трехкомпонентным полем скорости закрученного потока – тангенциальной, осевой и радиальной составляющими, а также воздушным столбом вдоль оси и поверхностью нулевой осевой скорости, разделяющей восходящий и нисходящий потоки. Современные исследования внутренней гидродинамики опираются на численное моделирование методами вычислительной гидродинамики [7–10], показавшее существенное влияние геометрических параметров (диаметра, длины и угла конуса, размеров патрубков) на структуру потока и эффективность разделения, в т. ч. для цилиндрикоконических аппаратов и неньютоновских сред [11, 12].

Вместе с тем тангенциальная и осевая составляющие изучены значительно полнее радиальной. Между тем именно радиальная скорость $V_{\text{рад}}$ характеризует поперечный перенос (переток) жидкости и дисперсной фазы между восходящим и нисходящим потоками и, следовательно, во многом определяет траектории частиц и качество осветления. Особенности распределения радиальной скорости по длине конической части и в зоне ее сопряжения с цилиндрической частью, а также возможность целенаправленного воздействия на это распределение остаются недостаточно изученными [13]. Ранее авторами для рассматриваемого гидроциклона – сепаратора инертных материалов исследованы тангенциальная скорость [14], внутренние суммарные гидродинамические токи [15] и закономерности разделения обрабатываемой среды по плотности [16], а также поведение радиальной скорости в зоне стыка цилиндрической и конической частей [17];

настоящая работа развивает это направление применительно к управлению радиальной скоростью по длине конической части.

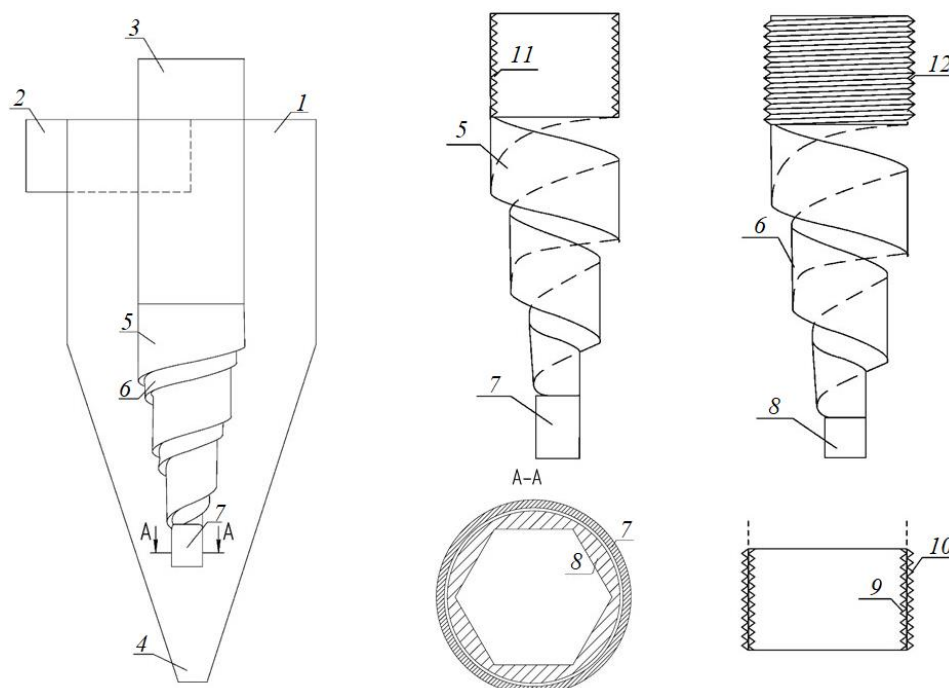
Перспективным направлением является управление гидравлической структурой потока непосредственно в аппарате. Авторами предложен способ автоматического регулирования работы гидроциклона (получено положительное решение по заявке), основанный на установке на сливном патрубке коаксиальной насадки в виде пластинчатой спирали с конусообразной навивкой и регулируемой щелью: изменение проходной площади щели (относительный коэффициент K) корректирует расход слива и тем самым перераспределяет поле скоростей в конической части. Проверка управляющего воздействия требует детального анализа именно радиальной скорости как наиболее чувствительного индикатора перестройки потока.

Цель работы – исследовать распределение радиальной скорости внутреннего потока по длине конической части цилиндроконического гидроциклона – осветлителя оросительной воды и обосновать возможность управления гидравлической структурой потока посредством регулируемой сливной насадки. Для достижения цели решались задачи: 1) построить математические модели и поля радиальной скорости в характерных сечениях конуса при давлениях на входе 200, 300 и 400 кПа; 2) выявить сечение (зону) наибольшего изменения радиальной скорости и наибольшего перетока; 3) сопоставить аппарат без насадки и с насадкой при $K = 0,7–1,0$; 4) оценить влияние насадки, раскрытия ее щели (K) и давления на входе на структуру внутреннего потока конической части, определить наиболее эффективные режимы раскрытия щели и проследить связь перестройки потока с эффективностью осветления.

Материалы и методы. Объектом исследования служил цилиндроконический гидроциклон – осветлитель оросительной воды. Геометрические параметры аппарата приведены в таблице 1 и показаны на рисунке 1.

Таблица 1 – Геометрические параметры гидроциклона-осветлителя
Table 1 – Geometric parameters of the clarifying hydrocyclone

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр цилиндрической части, мм	D	180
Длина цилиндрической части, мм	$L_{\text{ц}}$	180
Длина конической части, мм	$L_{\text{к}}$	420
Угол конусности, град	α	20
Диаметр питающего (тангенциального) патрубка, мм	$d_{\text{п}}$	45
Диаметр сливного патрубка, мм	$d_{\text{сл}}$	80
Диаметр пескового патрубка, мм	$d_{\text{ш}}$	20
Длина регулируемой сливной насадки, мм	$L_{\text{н}}$	280



1 – цилиндрическая часть; 2 – питающий (тангенциальный) патрубок;
3 – сливной патрубок; 4 – песковой патрубок; 5, 6 – коаксиальная регулируемая насадка (пластинчатые спирали с конусообразной навивкой и щелью); 7 – полый цилиндр внешней насадки; 8 – полый цилиндр с внутренней шестигранной полостью внутренней насадки; 9, 10 – внутренняя и внешняя резьбы сливного патрубка для внутренней насадки; 11, 12 – внутренняя и внешняя резьбы внешней и внутренней насадки для сливного патрубка

1 – cylindrical part; 2 – feeding (tangential) pipe; 3 – drain pipe; 4 – sand pipe; 5, 6 – coaxial adjustable nozzle (plate spirals with conical winding and a gap); 7 – hollow cylinder of the outer nozzle; 8 – hollow cylinder with an internal hexagonal cavity of the inner nozzle; 9, 10 – internal and external threads of the drain pipe for the inner nozzle; 11, 12 – internal and external threads of the external and internal nozzle for the drain pipe

Рисунок 1 – Схема гидроциклона-осветлителя с регулируемой сливной насадкой

Figure 1 – Schematic diagram of a clarifying hydrocyclone with an adjustable drain nozzle

Питающий патрубок примыкает тангенциально к верхней части цилиндра, обеспечивая закрутку потока. Исследовали два варианта аппарата: базовый (без насадки на сливном патрубке) и с регулируемой коаксиальной насадкой (см. рисунок 1, позиции 5, 6), реализующей запатентованный способ управления; относительная проходная площадь щели насадки варьировалась в диапазоне $K = 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$.

Трехмерную твердотельную модель аппарата, изображенную на рисунке 2а, построили в системе AutoCAD. Расчетные сетки, представленные на рисунках 2b, 2c, с характерным размером ячейки 1,5 мм сгенерировали с помощью средств библиотеки автоматического построения вычислительных сеток cfMesh; качество сетки контролировали, используя критерии ортогональности и невырожденности ячеек. Гидродинамический расчет выполняли в открытом пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM.



Рисунок 2 – Твердотельная (a) и расчетные модели гидроциклона-осветлителя без насадки (b) и с насадкой (c)
Figure 2 – Solid-state (a) and calculation models of a clarifying hydrocyclone without nozzle (b) and with nozzle (c)

Движение несжимаемой жидкости описывали уравнением неразрывности (1) и осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье – Стокса (RANS) (2):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho u'_i u'_j \right], \quad (2)$$

где $\bar{u}_i$ – осредненные компоненты вектора скорости, м/с;

t – время, с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

x_i, x_j – декартовы координаты, м;

i, j – индексы суммирования (1, 2, 3);

$\bar{p}$ – осредненное давление, Па;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$\rho u'_i u'_j$ – рейнольдсовы (турбулентные) напряжения, Па.

Для замыкания системы (1), (2) использовали двухпараметрическую модель турбулентности SSTk- ω (Shear Stress Transport), сочетающую точность k- ω в пристенной области и k- ε в ядре потока. Турбулентную вязкость определяли по выражению:

$$\mu_t = \frac{\rho C_a k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}, \quad (3)$$

где μ_t – турбулентная (вихревая) вязкость, Па·с;

C_a – эмпирическая константа модели (безразмерная);

k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;

ω – удельная скорость диссипации турбулентной энергии, с⁻¹;

S – модуль тензора скоростей деформации, с⁻¹;

F_2 – вспомогательная функция модели SST (безразмерная).

Граничные условия задавали в соответствии с реальными эксплуатационными режимами: на питающем патрубке – избыточное статическое давление $P = 200, 300$ и 400 кПа; на сливном и песковом патрубках – нулевое статическое давление; на стенках – условие прилипания.

По результатам расчета вдоль горизонтальной оси X в характерных по-

перечных сечениях конуса (на расстоянии 0,14–0,42 м от вершины конуса) определяли распределение радиальной скорости $V_{\text{рад}}$. Исходные данные для каждого сечения организовывали в числовую матрицу M размерностью $[N \times 3]$, столбцы которой – радиальная координата x (м), избыточное давление на входе P (кПа) и радиальная скорость $V_{\text{рад}}$ (м/с). В качестве математического образа исследуемых зависимостей принят полный полином второй степени от двух переменных.

Коэффициенты находили методом наименьших квадратов; систему нормальных уравнений решали методом Гаусса в среде компьютерной алгебры wxMaxima. Положение экстремума функции отклика по координате x при фиксированном давлении определяется условием $dZ/dx = 0$, откуда:

$$x^* = -\frac{a_1 + a_3 y}{2a_4}, \quad (4)$$

где x^* – координата экстремума радиальной скорости, м;

a_1 – коэффициент полиномиальной модели при радиальной координате x , характеризующий линейное изменение радиальной скорости по радиусу, с^{-1} ;

a_3 – коэффициент при произведении xu , характеризующий изменение радиального градиента скорости при изменении давления на входе, $1/(\text{с} \cdot \text{кПа})$;

u – избыточное давление на входе P , кПа;

a_4 – коэффициент при x^2 , характеризующий кривизну зависимости $V_{\text{рад}}(x)$, $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Полином применяется как гладкая поверхность отклика для качественного анализа тенденций, положения экстремумов и линий равного уровня радиальной скорости; точные значения $V_{\text{рад}}$ в узлах соответствуют непосредственным результатам CFD-расчета – матрице вида $[0,00177; 200,0; -0,1369390]$, $[0,00355; 200,0; -0,2876320]$, ... $[0,17742; 200,0; -$

0,0879414], [0,17919; 200,0; 0,0043921], [0,00177; 300,0; –0,2068970], [0,00355; 300,0; –0,2353010], ... [0,17742; 300,0; 0,0155247], [0,17919; 300,0; 0,0503961], [0,00177; 400,0; 0,0042038], [0,00355; 400,0; –0,0813319], ... [0,17742; 400,0; 0,0512550], [0,17919; 400,0; 0,0872283] (матрица для математической модели радиальной скорости $V_{\text{рад}}$ по горизонтальной оси в гидроциклоне в сечении 0,42 м от вершины конуса, $K = 0,8$, насадка длиной 280 мм на сливной патрубке и давление на входе $P = 200, 300, 400$ кПа).

Результаты и обсуждение. В таблице 2 приведены коэффициенты полиномиальной модели a_0 – a_5 радиальной скорости для гидроциклона без насадки в восьми сечениях конической части; диапазоны изменения $V_{\text{рад}}$ при давлениях 200, 300 и 400 кПа – в таблице 3.

Таблица 2 – Коэффициенты полиномиальной модели (4) радиальной скорости $V_{\text{рад}}$, аппарат без насадки

Table 2 – Coefficients of the polynomial model (4) of the radial velocity $V_{\text{рад}}$, a device without a nozzle

Сечение, м	Коэффициент полиномиальной зависимости					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0,14	4,390	–124,86	0,0020	0,0640	582,96	$-8,21 \cdot 10^{-6}$
0,22	2,708	–33,52	–0,0080	0,0440	113,21	$4,89 \cdot 10^{-6}$
0,27	–0,416	5,44	0,0010	0,0190	–39,70	$-5,87 \cdot 10^{-6}$
0,3	–0,669	22,42	0,0020	–0,0120	–132,82	$-2,36 \cdot 10^{-6}$
0,33	2,478	–20,88	–0,0130	0,0060	108,28	$1,80 \cdot 10^{-5}$
0,36	0,530	–28,45	0,0010	–0,0030	168,13	$-3,45 \cdot 10^{-6}$
0,39	0,404	–9,87	–0,0020	0,0010	59,24	$2,70 \cdot 10^{-6}$
0,42	–0,164	–4,02	0,0010	–0,0070	16,49	$-2,34 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3 – Диапазоны радиальной скорости $V_{\text{рад}}$ по сечениям конуса при разном давлении на входе, аппарат без насадки

В м/с

Table 3 – Ranges of radial velocity $V_{\text{рад}}$ across cone sections at different inlet pressures, a device without a nozzle

In m/s

Сечение, м	Диапазон радиальной скорости		
	200 кПа	300 кПа	400 кПа
1	2	3	4
0,14	–1,47...+0,29	–0,94...+0,31	–0,84...+0,51
0,22	–0,39...+0,42	–0,56...+0,52	–0,61...+0,64
0,27	–0,42...+0,47	–0,35...+0,65	–0,42...+0,76
0,3	–0,45...+0,50	–0,64...+0,53	–0,70...+0,36

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

1	2	3	4
0,33	–0,35...+0,23	–0,88...+0,22	–0,79...+0,32
0,36	–0,74...+0,17	–1,16...+0,80	–1,44...+0,15
0,39	–0,54...+0,14	–0,59...+0,25	–0,68...+0,22
0,42	–2,95...+1,89	–4,10...+2,63	–4,99...+3,22

Анализ показывает, что в средней части конуса (сечения 0,22–0,39 м от вершины) радиальная скорость изменяется умеренно: при всех исследованных давлениях ее модуль не превышает $\sim 1,4$ м/с, а в большинстве сечений лежит в пределах $\pm 0,8$ м/с (см. таблицу 3), что свидетельствует об относительно плавном поперечном перетоке. Недалеко от вершины конуса (сечение 0,14 м) формируется заметная отрицательная радиальная скорость – до минус 1,47 м/с при 200 кПа (рисунок 3).

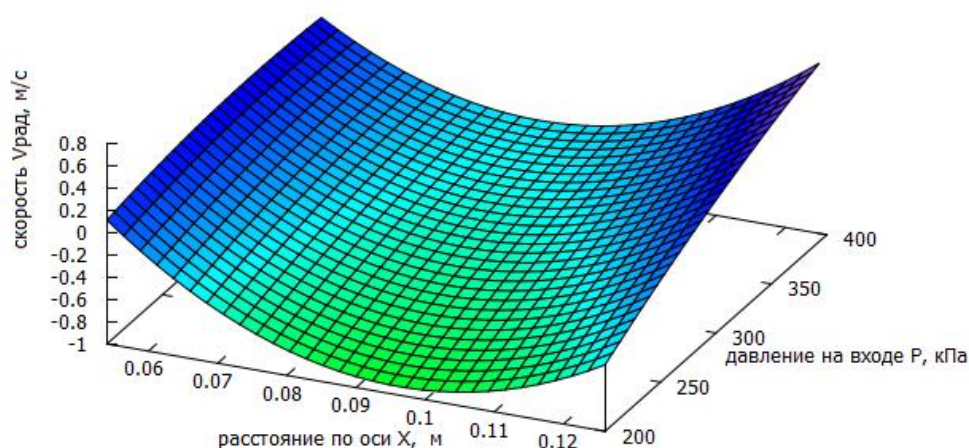


Рисунок 3 – Поверхность функции отклика радиальной скорости V_{rad} , аппарат без насадки, сечение 0,14 м от вершины конуса

Figure 3 – Surface of the response function of the radial velocity V_{rad} , device without a nozzle, section 0.14 m from the cone vortex

Принципиально иная картина наблюдается в зоне сопряжения конической и цилиндрической частей (сечение 0,42 м от вершины конуса). Здесь радиальная скорость достигает экстремальных значений: от минус 2,95 до плюс 1,89 м/с при 200 кПа, от минус 4,10 до плюс 2,63 м/с при 300 кПа и от минус 4,99 до плюс 3,22 м/с при 400 кПа (см. таблицу 3). Поверхность функции отклика резко изогнута (рисунок 4), а линии равного уровня су-

щественно сгущаются (рисунок 5), что указывает на наличие сильных градиентов и интенсивного знакопеременного перетока. Размах радиальной скорости в этом сечении (до 8,2 м/с при 400 кПа) в 3–5 раз превышает значения в средней части конуса.

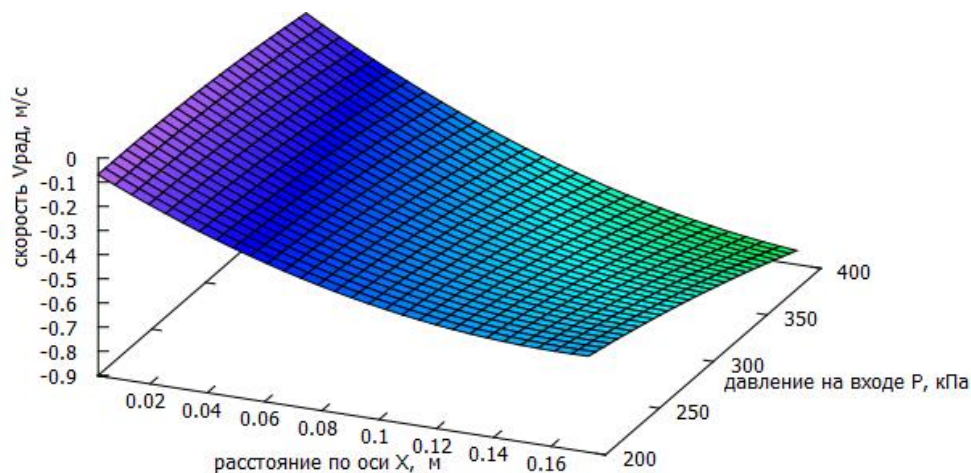


Рисунок 4 – Поверхность функции отклика радиальной скорости $V_{рад}$, аппарат без насадки, сечение 0,42 м от вершины конуса (зона сопряжения) при давлении на входе 200–400 кПа

Figure 4 – Radial velocity response function surface $V_{рад}$, a device without a nozzle, cross-section 0.42 m from the cone vortex (transition zone) at an inlet pressure of 200–400 kPa

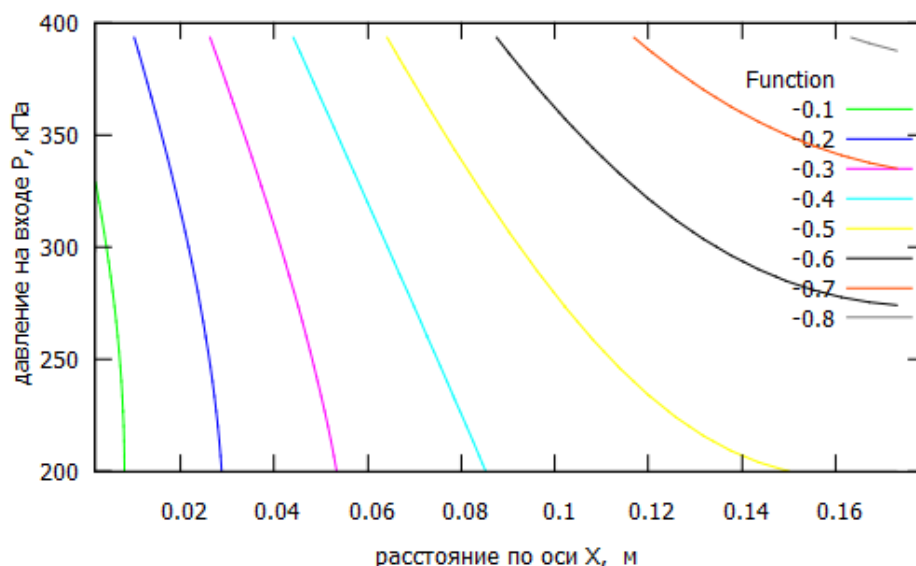


Рисунок 5 – Линии равных уровней радиальной скорости $V_{рад}$, аппарат без насадки, сечение 0,42 м от вершины конуса

Figure 5 – Lines of equal levels of radial velocity $V_{рад}$, a device without a nozzle, section 0.42 m from the cone vortex

Таким образом, изменение радиальной скорости по длине конуса носит существенно неравномерный характер: оно невелико на большей части конуса и резко возрастает к его широкому основанию – в зоне сопряжения с цилиндрической частью, где локализованы максимальный поперечный переток и наибольшие градиенты. Повышение давления на входе с 200 до 400 кПа закономерно увеличивает размах радиальной скорости во всех сечениях, наиболее заметно – в зоне сопряжения.

Аппарат с регулируемой насадкой. Установка регулируемой сливной насадки качественно изменяет структуру поля радиальной скорости. Коэффициенты модели для режимов $K = 0,7–1,0$ приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты полиномиальной модели (4) радиальной скорости V_{rad} , аппарат с регулируемой насадкой ($L = 280$ мм) при $K = 0,7–1,0$

Table 4 – Coefficients of the polynomial model (4) of the radial velocity V_{rad} , a device with an adjustable drain pipe ($L = 280$ mm) at $K = 0.7–1.0$

K	Сечение, м	Коэффициент полиномиальной зависимости					
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$a_5 \cdot 10^{-6}$
0,7	0,14	3,754	–91,04	–0,0002	0,0170	482,30	–3,79
0,7	0,21	0,918	–19,43	0,0002	0,0040	83,41	–1,75
0,7	0,28	–1,711	40,13	0,0040	–0,0160	–230,51	–3,54
0,7	0,35	0,446	–6,67	–0,0040	0,0080	41,64	3,58
0,7	0,42	–1,085	44,28	–0,0010	0,0200	–256,04	–0,22
0,8	0,14	2,106	–48,34	–0,0030	0,0330	246,58	0,54
0,8	0,21	0,033	4,37	0,0003	–0,0050	–47,79	0,33
0,8	0,28	–1,682	43,20	0,0050	–0,0120	–264,41	–4,84
0,8	0,35	0,658	–12,21	–0,0050	0,0070	67,63	5,44
0,8	0,42	–0,460	43,05	–0,0060	0,0180	–245,76	8,35
0,9	0,14	4,277	–85,59	–0,0060	0,0380	420,17	4,81
0,9	0,21	–0,809	18,16	0,0020	–0,0090	–115,33	–2,49
0,9	0,28	–0,409	32,30	–0,0030	–0,0140	–190,56	9,96
0,9	0,35	0,281	1,54	–0,0040	0,0050	–6,08	4,76
0,9	0,42	0,204	30,82	–0,0050	0,0180	–195,32	6,42
1,0	0,14	1,058	–16,76	–0,0050	0,0450	57,05	2,47
1,0	0,21	–0,109	12,47	–0,0003	–0,0060	–94,52	0,46
1,0	0,28	–0,448	25,88	–0,0003	–0,0030	–176,81	1,92
1,0	0,35	0,547	–2,02	–0,0060	0,0060	14,75	6,67
1,0	0,42	–0,297	26,54	–0,0010	0,0070	–150,83	1,55

В зоне сопряжения (0,42 м) насадка устраняет глубокий отрицательный экстремум, характерный для базового аппарата: вместо размаха $-4,99...+3,22$ м/с (без насадки, 400 кПа) формируется преимущественно положительная радиальная скорость с экстремумом $+4,35...+3,27$ м/с (соответственно при $K = 0,7...1,0$) при умеренном отрицательном значении $-0,76...-1,38$ м/с (таблица 5, рисунок 6). Это означает перестройку перетокка из знакопеременного (с интенсивным движением как к оси, так и от нее) в направленный преимущественно к периферии аппарата.

Таблица 5 – Диапазоны радиальной скорости V_{rad} в зоне сопряжения (сечение 0,42 м) для разных вариантов аппарата

В м/с

Table 5 – Ranges of radial velocity V_{rad} in the transition zone (section 0.42 m) for different device variants

In m/s

Вариант аппарата	Диапазон радиальной скорости		
	200 кПа	300 кПа	400 кПа
Без насадки	$-2,95...+1,89$	$-4,10...+2,63$	$-4,99...+3,22$
С насадкой, $K = 0,7$	$-0,76...+2,33$	$-0,99...+3,45$	$-1,29...+4,35$
С насадкой, $K = 0,8$	$-0,76...+2,72$	$-1,12...+3,79$	$-1,38...+4,33$
С насадкой, $K = 0,9$	$-0,50...+2,72$	$-0,85...+4,30$	$-1,10...+4,02$
С насадкой, $K = 1,0$	$-0,56...+2,78$	$-0,85...+3,25$	$-1,08...+3,27$

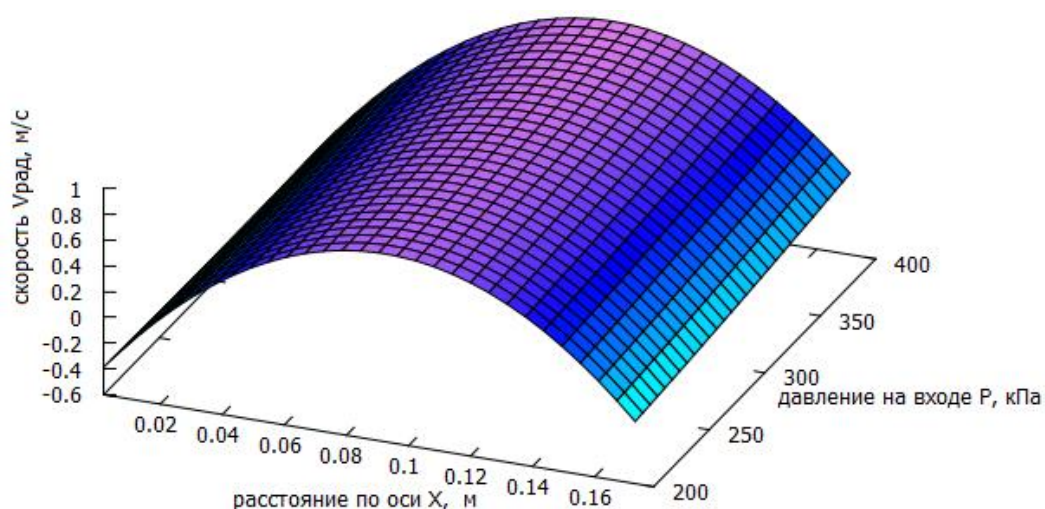


Рисунок 6 – Поверхность функции отклика радиальной скорости V_{rad} , аппарат с насадкой ($K = 1,0$), сечение 0,42 м от вершины конуса

Figure 6 – Surface of the response function of the radial velocity V_{rad} , a device with a nozzle ($K = 1.0$), section 0.42 m from the cone vortex

Одновременно насадка усиливает радиальный перенос в средней части конуса. В сечении 0,28 м, где у базового аппарата (близкие сечения 0,27–0,30 м) радиальная скорость не превышала по модулю $\sim 0,76$ м/с, при наличии насадки формируется выраженный положительный экстремум $+1,98...+1,55$ м/с для $K = 0,7...1,0$ при 400 кПа (таблица 6, рисунок 7). В сечении 0,35 м, напротив, развивается отрицательная радиальная скорость до $-2,0...-2,2$ м/с.

Таблица 6 – Диапазоны радиальной скорости V_{rad} по сечениям конуса при давлении на входе 400 кПа, аппарат с регулируемой насадкой

В м/с

Table 6 – Radial velocity ranges V_{rad} along cone sections at an inlet pressure of 400 kPa, a device with an adjustable drainpipe

In m/s

Сечение, м	Диапазон радиальной скорости			
	$K = 0,7$	$K = 0,8$	$K = 0,9$	$K = 1,0$
0,14	$-1,38...+0,20$	$-0,62...+0,38$	$-0,89...+0,25$	$-0,87...+0,40$
0,21	$-0,91...+0,78$	$-0,62...+0,55$	$-0,60...+0,69$	$-0,63...+0,26$
0,28	$-0,56...+1,98$	$-0,50...+2,15$	$-0,24...+1,78$	$-0,58...+1,55$
0,35	$-2,20...+0,59$	$-1,98...+0,51$	$-1,93...+0,76$	$-2,00...+0,71$
0,42	$-1,29...+4,35$	$-1,38...+4,33$	$-1,10...+4,02$	$-1,08...+3,27$

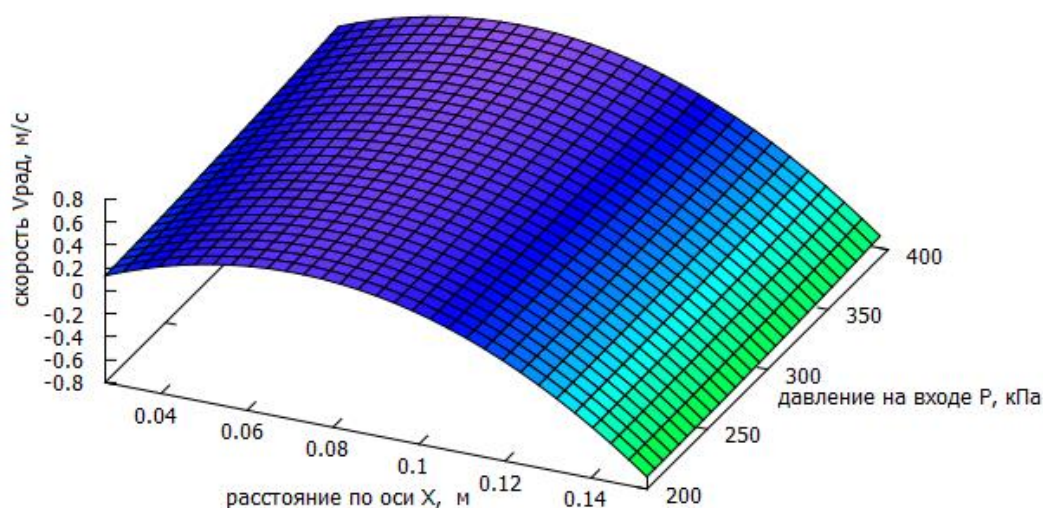


Рисунок 7 – Поверхность функции отклика радиальной скорости V_{rad} , аппарат с насадкой ($K = 1,0$), сечение 0,28 м от вершины конуса
Figure 7 – Surface of the response function of the radial velocity V_{rad} , a device with a nozzle ($K = 1.0$), section 0.28 m from the cone vortex

Структура внутреннего потока в конической части. Знак радиальной скорости отражает направление поперечного движения жидкости во внутреннем потоке: положительные значения соответствуют переносу от оси к периферии (к стенке конуса), отрицательные – к оси аппарата. В базовом аппарате вдоль конуса преобладает умеренная радиальная скорость со знакопеременным всплеском в зоне сопряжения, что указывает на интенсивный неупорядоченный обмен между восходящим приосевым и нисходящим пристенным потоками именно в этой зоне при слабом организованном поперечном переносе на остальной длине конуса. Установка насадки перестраивает внутренний поток: знакопеременный обмен в зоне сопряжения подавляется, а по длине конуса формируется более выраженный направленный перенос – к периферии в зоне сопряжения и в сечении 0,28 м и к оси в сечении 0,35 м (см. таблицы 5, 6).

Влияние насадки и выбор раскрытия щели. Количественная сводка управляющего воздействия насадки при давлении 400 кПа приведена в таблице 7. Насадка кардинально снижает встречный (к оси) переток в зоне сопряжения (от минус 4,99 м/с у базового аппарата до $-1,08 \dots -1,38$ м/с) и одновременно усиливает направленный к периферии перенос. Наиболее интенсивный поперечный перенос, способствующий выносу взвеси к стенке, достигается при малых раскрытиях щели: режимы $K = 0,7-0,8$ дают наибольшую положительную радиальную скорость как в зоне сопряжения (до плюс 4,35 м/с при $K = 0,7$), так и в средней части конуса (до плюс 2,15 м/с при $K = 0,8$), тогда как при полном раскрытии $K = 1,0$ перераспределение потока заметно мягче (плюс 3,27 и плюс 1,55 м/с соответственно). Таким образом, по гидравлическому критерию интенсивности направленного к периферии перетока наиболее эффективны режимы $K = 0,7-0,8$.

Поведение потока при изменении щели. Прослеживается монотонная управляемость: уменьшение проходной площади щели (K от 1,0 к 0,7) усиливает направленный к периферии перенос в средней части конуса (экстремум

$V_{\text{рад}}$ в сечении 0,28 м возрастает от плюс 1,55 до плюс 1,98 м/с (400 кПа)) и смещает зону наиболее активного поперечного движения вверх по конусу, к сечению сопряжения. Это позволяет с помощью щели насадки регулировать как интенсивность, так и пространственную локализацию перетока, т. е. целенаправленно управлять структурой внутреннего потока.

Таблица 7 – Управляющее воздействие насадки на радиальную скорость $V_{\text{рад}}$ в ключевых сечениях конуса при давлении на входе 400 кПа

Table 7 – Control effect of the nozzle on the radial velocity $V_{\text{рад}}$ in the key cone sections at an inlet pressure of 400 kPa

Показатель $V_{\text{рад}}$, м/с	Без насадки	$K = 0,7$	$K = 0,8$	$K = 0,9$	$K = 1,0$
Максимальная положительная (к периферии), сечение 0,42 м	+3,22	+4,35	+4,33	+4,02	+3,27
Максимальная отрицательная (к оси), сечение 0,42 м	–4,99	–1,29	–1,38	–1,10	–1,08
Максимальная положительная, средняя часть конуса (0,28 м)	+0,76	+1,98	+2,15	+1,78	+1,55

Влияние давления на питающем патрубке. При фиксированном раскрытии щели повышение давления на входе с 200 до 400 кПа монотонно увеличивает радиальную скорость во всех сечениях: например, при $K = 0,8$ в сечении 0,28 м положительный экстремум возрастает от плюс 1,25 до плюс 1,80 и плюс 2,15 м/с, а в зоне сопряжения – от плюс 2,72 до плюс 3,79 и плюс 4,33 м/с (см. таблицы 5, 6). Следовательно, насадка сохраняет управляемость во всем исследованном диапазоне давлений, а совместное задание раскрытия щели K и давления на входе расширяет диапазон настройки гидравлической структуры внутреннего потока.

Связь с эффективностью осветления. Выявленная перестройка внутреннего потока непосредственно связана с эффективностью работы гидроциклона-осветлителя. Усиление направленного к периферии перетока в зоне сопряжения и в средней части конуса способствует транспорту взвешенных частиц к стенке и их вовлечению в нисходящий пристенный поток к песковому патрубку, а подавление встречного (к оси) перетока в зоне со-

пряжения снижает обратный вынос частиц в осветленный слив [6, 9, 11], что согласуется с данными об эффективности модернизированных сливных устройств [2, 8]. С этих позиций режимы $K = 0,7–0,8$, обеспечивающие наибольший направленный к периферии перенос, следует рассматривать как предпочтительные для повышения качества осветления оросительной воды; при этом чрезмерное уменьшение щели сопряжено с ростом гидравлического сопротивления и снижением расхода слива, что задает нижнюю границу рационального раскрытия. Полученные результаты развивают данные [17] о радиальной скорости гидроциклона-осветлителя в зоне сопряжения, анализ распространяется на всю коническую часть и на режим управляемого слива; примененный подход на основе полиномиальных поверхностей отклика подтвердил применимость для выявления зон экстремального перетока. Количественная оценка прироста эффективности осветления, подбор оптимального сочетания K и давления по критерию «качество осветления – производительность» требуют экспериментальной проверки.

Качественно характер распределения скоростей (наличие зон знакопеременной радиальной скорости, рост градиентов к основанию конуса) согласуется с результатами CFD-исследований внутренней гидродинамики гидроциклонов [7, 9, 10], цилиндроконических аппаратов [11, 12], а также с работами по смешению и разделению фаз в гидроциклонах [18–20]. Прямое количественное сопоставление затруднено различием геометрии и режимов работы аппаратов.

Выводы

1 Построены математические модели и поля радиальной скорости внутреннего потока в конической части цилиндроконического гидроциклона – осветлителя оросительной воды в восьми (без насадки) и пяти (с насадкой) поперечных сечениях при давлениях на входе 200, 300 и 400 кПа.

2 Установлено, что изменение радиальной скорости по длине конуса неравномерно: на большей части конуса (0,22–0,39 м от вершины) ее модуль не превышает $\sim 1,4$ м/с, тогда как максимальное изменение и наибольший поперечный переток локализованы в зоне сопряжения конической и цилиндрической частей (сечение 0,42 м), где размах $V_{\text{рад}}$ достигает 8,2 м/с (от минус 4,99 до плюс 3,22 м/с) при 400 кПа.

3 Повышение давления на входе с 200 до 400 кПа увеличивает размах радиальной скорости во всех сечениях, наиболее значительно – в зоне сопряжения.

4 Установка регулируемой коаксиальной сливной насадки качественно перестраивает внутренний поток: в зоне сопряжения встречный (к оси) переток подавляется (с $-4,99$ до $-1,08 \dots -1,38$ м/с при 400 кПа) и формируется направленный к периферии перенос (до плюс 4,35 м/с), а в средней части конуса (сечение 0,28 м), где у базового аппарата радиальная скорость не превышала $\sim 0,76$ м/с, развивается выраженный положительный экстремум (до плюс 2,15 м/с при $K = 0,8$).

5 Раскрытие щели насадки K управляет как интенсивностью, так и пространственной локализацией поперечного перетока: наибольший направленный к периферии перенос обеспечивают режимы $K = 0,7-0,8$ (в зоне сопряжения до плюс 4,35 м/с, в средней части конуса до плюс 2,15 м/с), тогда как при полном раскрытии $K = 1,0$ перераспределение мягче (плюс 3,27 и плюс 1,55 м/с); уменьшение щели смещает зону наиболее активного перетока вверх по конусу. По гидравлическому критерию наиболее эффективны режимы $K = 0,7-0,8$.

6 Давление на питающем патрубке выступает вторым управляющим параметром: при фиксированном K повышение давления с 200 до 400 кПа монотонно увеличивает радиальную скорость во всех сечениях (например, при $K = 0,8$ в сечении 0,28 м – с плюс 1,25 до плюс 2,15 м/с), а совместное

задание K и давления расширяет диапазон настройки структуры внутреннего потока.

7 Управляемое перераспределение радиальной скорости – усиление направленного к периферии перетока и подавление обратного перетока в осветленный слив – создает предпосылки для повышения качества осветления оросительной воды; предпочтительными являются режимы $K = 0,7–0,8$. Количественная оценка прироста эффективности осветления и подбор оптимального сочетания раскрытия щели и давления требуют экспериментальной проверки.

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. Эффективность и расходные характеристики гидроциклона с фильтрующим сливным патрубком / М. И. Ламскова, М. И. Филимонов, А. Е. Новиков, С. В. Бородин // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 4. С. 34–48. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-34-48. EDN: OOOTOK.
3. 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.
4. Терновский И. Г., Кутепов А. М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.
5. Шестов Р. Н. Гидроциклоны. Л.: Машиностроение, 1967. 80 с.
6. An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations / J. Tian, L. Ni, T. Song, J. Olson, J. Zhao // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 206. P. 268–285. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.06.015. EDN: VFXTGZ.
7. Numerical analysis of the flow field and separation performance in hydrocyclones with different vortex finder wall thickness / Q. Zhao, B. Cui, D. Wei, T. Song, Y. Feng // Powder Technology. 2019. Vol. 345. P. 478–491. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.01.030. EDN: XIFRXF.
8. Моделирование процесса гидроциклонирования частиц «легких» фракций на фильтрующей поверхности сливного патрубка / А. Б. Голованчиков, М. И. Ламскова, А. Е. Новиков, М. И. Филимонов // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56, № 2. С. 236–243. DOI: 10.31857/S0040357122020075. EDN: BKYROC.
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. Моделирование гидродинамических процессов в центробежном поле гидроциклонов: монография / А. Б. Голованчиков, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, М. И. Филимонов. Волгоград: ВолгГТУ, 2017. 200 с. EDN: XQKTCL.
11. Yablonskiy V. O. Modeling of viscoplastic fluids separation in a cylindroconical

hydrocyclone by pressure flotation // Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol. 59, № 3–4. P. 191–197. DOI: 10.1007/s10556-023-01227-z. EDN: HQSSFJ.

12. 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. DOI: 10.1007/s10556-023-01169-6. EDN: MLJYTK.

13. 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.

14. Golovko V. A., Degtyarev G. V., Nepshekueva T. S. Investigation of tangential velocity of hydrocyclone-separator of construction inert materials // Current Studies of Kuban SAU Young Science Students: collection of articles. Krasnodar: Kuban State Agrarian University, 2025. P. 34–45. EDN: IPYGCB.

15. Головки В. А., Кветенадзе К. В. Исследование внутренних суммарных гидродинамических токов в гидроциклоне-сепараторе инертных материалов // Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год. Краснодар: Куб. гос. аграр. ун-т им. И. Т. Трубилина, 2025. С. 155–157. EDN: MJVFFT.

16. Дегтярев Г. В., Головки В. А. Гидроциклонирование как эффективный процесс разделения обрабатываемой среды по плотности // Современные исследования в области техники и технологий: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Симферополь: Ариал, 2025. С. 318–322. EDN: MFYQGN.

17. Дегтярев Г. В., Дегтярева О. Г., Головки В. А. Исследование поведения радиальной скорости в зоне стыка цилиндрической и конической части гидроциклона-осветлителя // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2025. Т. 17, № 2. С. 67–76. DOI: 10.36508/RSATU.2025.84.64.010. EDN: ECZILF.

18. Яблонский В. О. Математическая модель и анализ влияния режимных параметров гидроциклона на показатели процесса разделения вязкопластических сред двухстадийной флотацией // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 71. С. 48–57. DOI: 10.17223/19988605/71/5. EDN: HMKFPM.

19. Numerical study on the separation performance of hydrocyclones with different secondary cylindrical section diameters / D. Hou, P. Liu, Q. Zhao, L. Jiang, B. Cui, D. Wei // Processes. 2023. Vol. 11, № 9. Art. 2542. DOI: 10.3390/pr11092542. EDN: MIIAME.

20. Vortex finder diameter and depth effects on the separation performance of hydrocyclone / Y. Zhang, M. Xu, W. Hu, X. Xu, Q. Zhang // Chemical Engineering Research and Design. 2023. Vol. 195. P. 181–191. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.05.052. EDN: FONCAL.

References

1. Semenov A.V., Latyshev N.S., Petruk R.V., 2023. *Sovremennye resheniya akkumulyatsii i ochistki dozhdevykh i talykh vod* [Modern solutions for the 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. Lamskova M.I., Filimonov M.I., Novikov A.E., Borodychev S.V., 2021. *Effektivnost' i raskhodnye kharakteristiki gidrotsyklona s fil'truyushchim slivnym patrubkom* [Efficiency and discharge characteristics of a hydrocyclone with a filter drain tube]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 11, no. 4, pp. 34–48, DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-34-48, EDN: OOOTOK. (In Russian).

3. Izyumov Yu.A., Tortika N.A., Kireeva E.S., Krasnov A.A., 2022. *Rezultaty issledovaniya vliyaniya konstruktivnykh elementov bikonicheskogo gidrotsiklona na kachestvo mekhanicheskoy ochistki zhidkostey* [Results of the investigations of the influence of the hydrocyclone construction elements 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).

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

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

6. Tian J., Ni L., Song T., Olson J., Zhao J., 2018. An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, vol. 206, pp. 268-285, DOI: 10.1016/j.seppur.2018.06.015, EDN: VFXTGZ.

7. Zhao Q., Cui B., Wei D., Song T., Feng Y., 2019. Numerical analysis of the flow field and separation performance in hydrocyclones with different vortex finder wall thickness. *Powder Technology*, vol. 345, pp. 478-491, DOI: 10.1016/j.powtec.2019.01.030, EDN: XIFRXF.

8. Golovanchikov A.B., Lamskova M.I., Novikov A.E., Filimonov M.I., 2022. *Modelirovanie protsessa gidrotsiklonirovaniya chastits «legkikh» fraktsiy na fil'truyushchey poverkhnosti slivnogo patrubka* [Simulation of the process of the hydrocycloning particles of "light" fractions on the filtering surface of a drain pipe]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], vol. 56, no. 2, pp. 236-243, DOI: 10.31857/S0040357122020075. EDN: BKYROC. (In Russian).

9. 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 the process of separation of heterogeneous liquid systems in a hydrocyclone taking into account the similarity criteria]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petrol Engineering], no. 2, pp. 34-38, EDN: NBDNJI. (In Russian).

10. Golovanchikov A.B., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M.I., 2017. *Modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov v tsentrobeznom pole gidrotsiklonov: monografiya* [Modeling of Hydrodynamic Processes in the Centrifugal Field of Hydrocyclones: monograph]. Volgograd, VolGTU, 200 p., EDN: XQKTCL. (In Russian).

11. 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, DOI: 10.1007/s10556-023-01227-z, EDN: HQSSFJ.

12. 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, DOI: 10.1007/s10556-023-01169-6, EDN: MLJYTK.

13. Lagutkin M.G., Baranova E.Yu., Pigarev V.M., 2013. *Ochistka oborotnoy vody ot mekhanicheskikh primesey v tsilindrokonicheskikh gidrotsiklonakh s priemnym bunkerom* [Cleaning of recycle water from mechanical impurities in cylindroconical hydrocyclones with a receiving hopper]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in Industry], no. 3, pp. 24-28, EDN: PWUKMP. (In Russian).

14. Golovko V.A., Degtyarev G.V., Nepshekueva T.S., 2025. Investigation of tangential velocity of hydrocyclone-separator of construction inert materials. *Current Studies of Kuban SAU Young Science Students: collection of articles*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University, pp. 34-45, EDN: IPYGCB.

15. Golovko V.A., Kvetenadze K.V., 2025. *Issledovanie vnutrennykh summarnykh gidrodinamicheskikh tokov v gidrotsiklone-separatore inertnykh materialov* [Finite element

method study of vertical velocity in a hydrocyclone-separator for inert materials]. *Sbornik statey po materialam yezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley po itogam NIR za 2024 god* [Proceedings of the Annual Scientific and Practical Conference of Teachers on the Results of R&D for 2024]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, pp. 155-157, EDN: MJVFFT. (In Russian).

16. Degtyarev G.V., Golovko V.A., 2025. *Gidrotsiklonirovanie kak effektivnyy protsess razdeleniya obrabatyvaemoy sredy po plotnosti* [Hydrocycloning as an efficient process for separation of the treated medium by density]. *Sovremennye issledovaniya v oblasti tekhniki i tekhnologii: sb. st. Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current Research in the Field of Engineering and Technology: collect. of art. of the International Scientific and Practical Conference]. Simferopol, Arial Publ., pp. 318-322, EDN: MFYQGN. (In Russian).

17. Degtyarev G.V., Degtyareva O.G., Golovko V.A., 2025. *Issledovanie povedeniya radial'noy skorosti v zone styka tsilindricheskoy i konicheskoy chastey gidrotsiklona-osvetlitelya* [Investigation of the behavior of radial velocity in the junction zone of the cylindrical and conical parts of the clarifying hydrocyclone]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva* [Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev], vol. 17, no. 2, pp. 67-76, DOI: 10.36508/RSATU.2025.84.64.010, EDN: ECZILF. (In Russian).

18. Yablonsky V.O., 2025. *Matematicheskaya model' i analiz vliyaniya rezhimnykh parametrov gidrotsiklona na pokazateli protsessa razdeleniya vyazkoplasticheskikh sred dvukhstadiynoy flotatsiye* [Mathematical model and analysis of the effect of the regime parameters of the hydrocyclone on the indicators of the separation process of viscoplastic media by two-stage flotation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science], no. 71, pp. 48-57, DOI: 10.17223/19988605/71/5, EDN: HMKFPM. (In Russian).

19. Hou D., Liu P., Zhao Q., Jiang L., Cui B., Wei D., 2023. Numerical study on the separation performance of hydrocyclones with different secondary cylindrical section diameters. *Processes*, vol. 11, no. 9, art. 2542, DOI: 10.3390/pr11092542, EDN: MIAME.

20. Zhang Y., Xu M., Hu W., Xu X., Zhang Q., 2023. Vortex finder diameter and depth effects on the separation performance of hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 195, pp. 181-191, DOI: 10.1016/j.cherd.2023.05.052, EDN: FONCAL.

Информация об авторах

Г. В. Дегтярев – профессор кафедры архитектуры, доктор технических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), degtyarev.g.v@mail.ru, AuthorID: 144403, ORCID: 0000-0002-2259-2719;

О. Г. Дегтярева – заведующая кафедрой строительного производства, доктор технических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), marxotgeo@mail.ru, AuthorID: 723746, ORCID: 0000-0001-9312-9222;

В. А. Головко – аспирант, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), niboriusone@bk.ru.

Information about the authors

G. V. Degtyarev – Professor of the Department of Architecture, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar, Kalinin st., 13), degtyarev.g.v@mail.ru, AuthorID: 144403, ORCID: 0000-0002-2259-2719;

O. G. Degtyareva – Head of the Department of Construction Production, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin

(350044, Krasnodar, Kalinin st., 13), marxotgeo@mail.ru, AuthorID: 723746, ORCID: 0000-0001-9312-9222;

V. A. Golovko – Postgraduate Student, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar, Kalinin st., 13), niberiusone@bk.ru.

*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 29.06.2026; одобрена после рецензирования 14.09.2026;
принята к публикации 23.09.2026.*

*The article was submitted 29.06.2026; approved after reviewing 14.09.2026; accepted for
publication 23.09.2026.*