

ОПТИМИЗАЦИЯ ВИДА СПИРАЛИ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ПЛОСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРИВЫХ

© 2026 В.В. Терехов, В.А. Атрощенко

Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков, г. Краснодар, Россия

Статья поступила в редакцию 14.01.2026

В данной научной статье рассматривается оптимизация вида спирали для конструкции устройств очистки на основе плоских и пространственных кривых. Цель исследования — выбрать оптимальный вид спирали для дальнейшего использования в конструкциях устройств очистки жидкости. Известны множество видов геометрических кривых и спиралей, но интерес для исследования и выбора альтернативы, представляют пять. Принятие решения о выборе вида спирали проводится на основе параметров (P_1, \dots, P_4), для оценок параметров используется бальный метод числами от 1 до 10. Для полной и качественной оценки альтернатив просуммированы балы параметров для каждой из альтернатив и дополнительно проведена оценка альтернатив по среднеквадратичному отклонению. Полученные результаты приведены к решению двух факторной задачи линейного программирования. Задача линейного программирования решена графическим методом. Определены предельные значения области роста функции для условия оптимального выбора альтернатив по критерию вид спирали. Результат решения задачи линейного программирования — спираль Архимеда является оптимальной плоской кривой и полностью соответствует параметрам выбора вида спирали для использования в устройствах очистки жидкости.

Ключевые слова: механическая очистка жидкости, центробежная сила, устройство очистки жидкости, альтернатива, параметр, критерии, спираль Архимеда, методы оптимизации, задача линейного программирования.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-211-217

EDN: HVGQTC

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросу очистки жидкостей от загрязнений уделяют большое внимание. Связано это с тем, что очищенная жидкость может быть вторично использована для хозяйственных, бытовых нужд и на производственных предприятиях. Загрязнения жидкостей могут быть биологическими, химическими, механическими и другими [1, 2]. В зависимости от этого выбирают способ их очистки от загрязнений.

Наиболее простой способ очистки жидкости механический. Механическая очистка представляет собой выделение из жидкости твердых частиц. Это могут быть минеральные, органические и металлические частицы. Для механической обработки, в каждом конкретном случае, применяются соответствующие агрегаты и устройства. Особую привлекательность представляют агрегаты и устройства, обладающие компактностью, высокой производительностью, достаточным качеством очистки, простотой обслуживания, низкой себестоимостью изготовления и удельной стоимостью очистки одного кубометра жидкости [3].

В настоящее время основными распространенными способами механической очистки жидкости является фильтрация и инерционные способы очистки.

Фильтрация имеет ряд недостатков, таких как: изменение давления между входом и выходом, что обусловлено гидравлическим сопротивлением, ограниченный срок службы, необходимость в техническом обслуживании, высокую себестоимость. Помимо прочего, при содержании в жидкости примесей в объеме более 100 мг/литр фильтры не показывают достаточной эффективности – быстрый засор фильтрующих элементов вынуждает к частой промывке или полной регулярной замене засыпного материала [4].

В отличие от центрифуг, гидроциклоны не имеют движущихся частей и потому показывают несравнимо большую надежность и долговечность при соизмеримом КПД очистки жидкости, но имеют потери на гидравлическое сопротивление из-за особенностей организации потока жидкости при технологическом процессе очистки [3, 4].

Терехов Владимир Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий 105 кафедрой.

E-mail: rx6dx@mail.ru

Атрощенко Валерий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор 105 кафедры.

E-mail: rx6dx@mail.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель исследования — выбрать оптимальный вид спирали для дальнейшего использования в конструкциях устройств очистки жидкости.

Процесс выделения твердых частиц из жидкости в устройствах инерционной очистки происходит под действием сил тяжести и инерции. Увеличить массовые силы можно путем придания жидкости с содержащимися в ней частицами ускорения, например, за счет закручивания потока.

В этом случае роль осаждающей силы будет играть центробежная сила, величина которой вычисляется по известной формуле [5]:

$$F_{ц} = \rho_{ч} \cdot \frac{\pi \cdot d_{ч}^3}{6} \cdot \frac{v_{ч}^2}{r}, \quad (1)$$

где $\rho_{ч}$ – плотность частицы, кг/м³;

$d_{ч}$ – размер частицы (диаметр), м;

$v_{ч}$ – скорость частицы, м/с;

r – радиус кривизны, м.

Для увеличения центробежной силы, как следует из выражения (1), может быть использован канал с уменьшающимся радиусом с круглым или овальным поперечным сечением. Влияние пограничного слоя устраняется с помощью слива его вместе с осажденными частицами в щель, выполненную по внешней образующей канала. В результате канал принимает форму спирали.

Известны множество видов геометрических кривых и спиралей, но интерес для исследования и выбора *альтернативы* (А), вид спирали, для использования в устройствах очистки (УО) представляют пять:

Альтернатива А1. Спираль Архимеда.

Альтернатива А2. Спираль Ферма.

Альтернатива А3. Логарифмическая спираль.

Альтернатива А4. Гиперболическая спираль.

Альтернатива А0. Пространственно-логарифмическая спираль Виктора Шаубергера.

Для принятия решения о выборе вида спирали целесообразно выделить перечень параметров (P1,...P4), на основе значений которых и уместно сравнивать альтернативы оптимизации.

Параметры выбора спирали следующие:

P1. Характер закручивания спирали, влияет на траекторию движения жидкости и частиц в спиральном канале;

P2. Наличие в устройстве определенного количества витков спирали, должны обеспечить качество очистки жидкости;

P3. Наличие на внешней образующей основного канала щели и шага спирали, который должен обеспечить размещение дополнительного канала для отвода пограничного слоя вместе с осажденными частицами;

P4. Движение жидкости в канале должно осуществляться с уменьшением радиуса, от большего радиуса к меньшему, это позволит в соответствии с выражением (1) увеличить скорость жидкости в основном канале, дополнительно отделить тяжелые частицы [12].

Для возможных оценок параметров вида спирали используем бальный метод числами 1, 2, 3, ..., 9, 10, причем наихудшее значение – это число 1, а наилучшее – это число 10 [12].

Спираль Архимеда [6, 7, 8].

Представим оценку параметров спирали следующими балами, таблица 1.

Таблица 1. Оценка параметров при выборе вида спирали

№ п/п	Параметры	P1	P2	P3	P4
A1.	спираль Архимеда	10	9	9	9

Спираль Ферма или параболическая спираль [6, 7, 8].

Представим оценку параметров спирали следующими балами, таблица 2.

Логарифмическая спираль [6, 7, 8].

Представим оценку параметров спирали следующими балами, таблица 3.

Гиперболическая спираль [6, 7, 8].

Представим оценку параметров спирали следующими балами, Таблица 4.

Таблица 2. Оценка параметров при выборе вида спирали

№ п/п	Параметры	P_1	P_2	P_3	P_4
A2.	спираль Ферма	4	6	8	5

Таблица 3. Оценка параметров при выборе вида спирали

№ п/п	Параметры	P_1	P_2	P_3	P_4
A3.	Логарифмическая спираль	8	7	8	6

Таблица 4. Оценка параметров при выборе вида спирали

№ п/п	Параметры	P_1	P_2	P_3	P_4
A4.	Гиперболическая спираль	6	6	5	4

Виктор Шаубергер использовал **пространственную логарифмическую спираль** при разработке труб в своих конструкциях и изобретениях [9, 10, 11].

Представим оценку параметров спирали следующими балами, Таблица 5.

Таблица 5. Оценка параметров при выборе вида спирали

№ п/п	Параметры	P_1	P_2	P_3	P_4
A0.	Пространственно логарифмическая спираль Виктора Шаубергера	1	1	1	1

В связи с отсутствием математического аппарата спирали она в дальнейшем анализе не рассматривается как возможный объект использования в устройствах очистки жидкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выбора вида спирали необходимо соизмерить все параметры, проще всего это сделать, просуммировав балы (Σ) для каждой из альтернатив. Для более полной и качественной оценки альтернатив дополнительно проведём оценку альтернатив по среднеквадратичному отклонению, σ .

Среднеквадратичное отклонение рассчитывается по формуле: $\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i - \mu)^2}{N}}$, где x_i – каждая индивидуальная оценка альтернативы;

μ – среднеарифметическая оценка;

N – общее количество оценок альтернативы.

Альтернатива 1:

$$1. \mu = \frac{10+27}{4} = 9,25.$$

$$2. (x_i - \mu): 0,75; -0,25; -0,25; -0,25.$$

3. $(x_i - \mu)^2$: 0,5625; 0,0625; 0,0625; 0,0625.

4. $\sum(x_i - \mu)^2$: 0,75.

5. $\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}$: 0,1875.

6. $\sigma \approx 0,433$.

Альтернатива 2:

1.

2. $\sigma \approx 1,479$.

Альтернатива 3:

1.

2. $\sigma \approx 0,83$.

Альтернатива 4:

1.

2. $\sigma \approx 0,83$.

Таблица 6. Оптимизация конструкции УО

№ п/п	Критерий оптимизации	Альтернатива А1	Альтернатива А2	Альтернатива А3	Альтернатива А4
1.	<i>Вид спирали</i>	спираль Архимеда	спираль Ферма	логарифмическая спираль	гиперболическая спираль
Параметры	<i>P1</i>	10	4	8	6
	<i>P2</i>	9	6	7	6
	<i>P3</i>	9	8	8	5
	<i>P4</i>	9	5	6	4
Сумма баллов, Σ		37	23	29	21
Среднеквадратическое отклонение, σ		0,433	1,479	0,83	0,83

Объединим все полученные значения в Таблице 6 [12]. Для дальнейшей оптимизации конструкции УО и выбора вида спирали приведём полученные результаты Таблицы 6 к решению двух факторной задачи линейного программирования (ЗЛП), обозначим [13]:

x_1 – максимальное значение суммы баллов одной из альтернатив А1...А4;

x_2 – минимальное значение среднеквадратического отклонения одной из альтернатив А1...А4.

Представим ограничения ЗЛП:

$x_1 \leq 40$;

$x_2 \leq 5$;

$x_{1,2} \geq 0$.

Зададим линейную целевую функцию (ЦФ):

$$f(x) = k_1x_1 - k_2x_2 \rightarrow \max.$$

Определим постоянные весовые коэффициенты k_1 и k_2 влияющие на критерии x_1 и x_2 . Постоянные коэффициенты оказывают одинаковое влияние на выбор альтернатив А1,..., А4 при решении задачи, следовательно, коэффициенты $k_1 = k_2 = 0,5$ [13].

ЦФ перепишем следующим образом:

$f(x) = 0,5x_1 - 0,5x_2 \rightarrow \max.$

Построим область допустимых значений (см. Рисунок 1):

$$\begin{cases} x_1 \leq 40 \\ x_2 \leq 5 \\ x_{1,2} \geq 0 \end{cases}$$

Запишем градиент ЦФ, $grad f(x) = \{0,5; -0,5\} = \vec{c}$ – целевой вектор, показывает направление максимального роста функции (см. Рисунок 1).

В области допустимых значений ЦФ построим точки альтернатив с координатами А1(37; 0,433), А2(23; 1,479), А3(29; 0,83) и А4(21; 0,83) см. Таблицу 6 и Рисунок 1 [13].

Определим крайнее значение области роста функции для условия оптимального выбора альтернатив по критерию *вид спирали*. Для этого найдём точку соответствующую условию задачи: $x_1 \rightarrow \max$, $x_2 \rightarrow \min$. Это точка $A_1(37; 0,433)$, $x_1 = 37 \rightarrow \max$, $x_2 = 0,433 \rightarrow \min$ (см. Рисунок 1) [13].

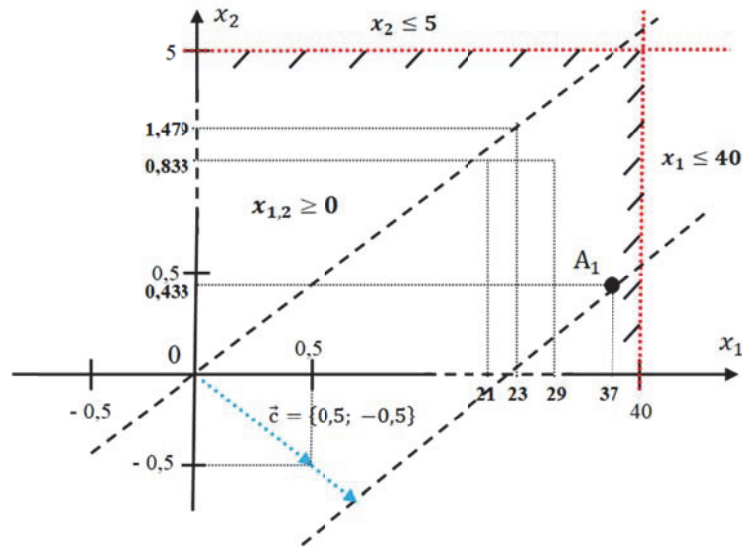


Рисунок 1 – Графическое решение ЗЛП

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе исследования оптимизации конструкции устройства очистки на основе плоских кривых и спиралей, альтернатива A_1 спираль Архимеда имеет максимальное значение по параметру x_1 , сумма баллов 37 из 40, а значение параметра x_2 имеет минимум среднеквадратичного отклонения 0,433, что свидетельствует о стабильности выбранных параметров спирали и подтверждает целесообразность выбора (см. Рисунок 2).

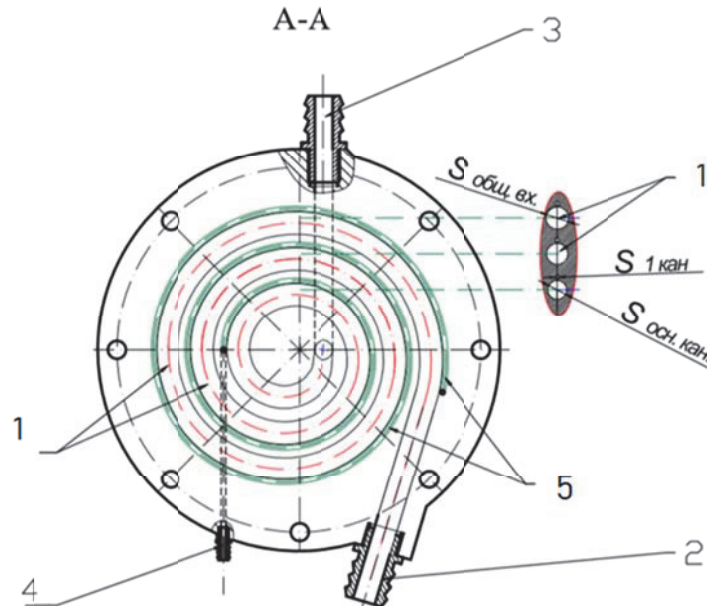


Рисунок 2 – Разрез А-А устройства очистки жидкости на основе спирали Архимеда: 1 – основной канал устройства, 2 – входной патрубок основного канала, 3 – выходной патрубок основного канала, 4 – выходной патрубок канала для отвода пограничного слоя с осажденными частицами, 5 – канал для отвода пограничного слоя с осажденными частицами [14, 15]

Следовательно, спираль Архимеда является оптимальной плоской кривой и полностью соответствует параметрам выбора вида спирали для дальнейшего использования в конструкциях устройств очистки жидкости [14, 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудков, А.Г. Механическая очистка сточных вод: учебное пособие / А. Г. Гудков. – 2-е изд. – М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 188 с.
2. Яковлев, С.В. Механическая очистка сточных вод / Яковлев С.В., Калицун В.И. – М.: Стройиздат, 1972. – 199 с.
3. Черненко, Ю.В. Механическая очистка жидкостей при помощи биконических гидроциклонов / Ю.В. Черненко, Ю.А. Изюмов, Л.И. Высоцкий // Вестник Евразийской науки. 2020. – № 1. – URL: <https://esj.today/PDF/46SAVN120.pdf> (дата обращения 20.07.2025).
4. Кривошеин, Д.А. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков // Учебное пособие для вузов / Д.А. Кривошеин [и др.]. – М.: Высшая школа, 2003. – 344 с.
5. Мубаракшин, Б.И. Анализ выбора конструкций гидроциклонов для очистки сточных вод / Б.И. Мубаракшин, И.Т. Хуснутдинов, В.И. Петров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – С.165-166.
6. Блинова, И.В. Кривые, заданные параметрически и в полярных координатах. Учебное пособие / И.В. Блинова, И.Ю. Попов. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 56 с.
7. Шустикова Т.В., Сергеева И.В. Геометрические построения кривых линий: для студентов технических специальностей очной и заочной форм обучения, выполняющих графическое задание «Построение плоских кривых»: учебно-методическое пособие. Инженерная школа ДВФУ / Т.В. Шустикова, И.В. Сергеева. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2019. – 28 с.
8. Клековкин, Г.А. Пространственные спирали. Общероссийский математический портал Math-Net.Ru / Г. А. Клековкин. – 2019. – Выпуск 2, – С. 20-30 (дата обращения 20.07.2025).
9. Шаубергер В.Л. Пат. 196680 (Австрия). – 1957.
10. Шаубергер, В.Л. Энергия воды / В.Л. Шаубергер. – М.: Эксмо, Яуза, 2007. – 320 с.
11. Шаубергер, Виктор. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаубергер,_Виктор (дата обращения 20.07.2025).
12. Орлов, А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие / А.И. Орлов. – М.: Экзамен, 2005. 1035 с.
13. Мицель, А.А. Методы оптимизации. Часть 1. Учебное пособие / А.А. Мицель, А.А. Шелестов, В.В. Романенко. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2020. – 350 с.
14. Терехов В.В. [и др.] Устройство для очистки горюче-смазочных материалов с прямолинейными одним входным и двумя выходными каналами: Пат. 227812 (РФ). 2024.
15. Терехов В.В. [и др.] Устройство для очистки воды в местах экологических катастроф: Пат. 277152 (РФ). 2022.

OPTIMIZATION OF THE SPIRAL VIEW OF THE DESIGN OF LIQUID PURIFICATION DEVICES BASED ON FLAT AND SPATIAL CURVES

© 2026 V.V. Terekhov, V.A. Atroschenko

Krasnodar Higher Military Flight School, Krasnodar, Russia

This scientific article discusses the optimization of the spiral type for the design of cleaning devices based on flat and spatial curves. The purpose of the study is to select the optimal type of spiral for further use in the designs of liquid purification devices. Many types of geometric curves and spirals are known, but five are of interest for research and alternative selection. The decision on the choice of the spiral type is based on the parameters (P1,...P4), and the scoring method with numbers from 1 to 10 is used to evaluate the parameters. For a complete and qualitative assessment of the alternatives, the parameter scores for each of the alternatives were summed up and the alternatives were additionally evaluated based on the standard deviation. The obtained results are used to solve a two-factor linear programming problem. The linear programming problem is solved graphically. The assigned values of the growth area of the function are determined for the optimal choice of alternatives according to the spiral type criterion. The result of solving the linear programming problem is that the Archimedes spiral is an optimal flat curve and fully corresponds to the parameters of choosing the type of spiral for use in liquid purification devices.

Keywords: mechanical cleaning of liquid, centrifugal force, liquid cleaning device, alternative, parameter, criteria, Archimedes spiral, optimization methods, linear programming problem

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-211-217

EDN: HVGQTC

REFERENCES

1. Gudkov, A. G. Mechanical Treatment of Wastewater: Textbook / A. G. Gudkov. – 2nd ed. – Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2019. 188 s.
2. Yakovlev, S.V. Mechanical Treatment of Wastewater / Yakovlev, S.V., Kalitsun, V.I. – Moscow: Stroyizdat, 1972. 199 s.
3. Chernenko Yu.V., Izyumov Yu.A., Vysotsky L.I. (2020). Mechanical cleaning of liquids using biconical hydrocyclones. The Eurasian Scientific Journal, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/46SAVN120.pdf>
4. Krivoshein D.A., Kukin P.P., Lapin V.L. Engineering Protection of Surface Waters from Industrial Wastewater //

- Textbook for Universities / D.A. Krivoshein [et al.]. – Moscow: Higher School, 2003. 344 s.
5. *Mubarakshin B.I., Khusnutdinov I.T., Petrov V.I.* Analysis of the Choice of Hydrocyclone Designs for Wastewater Treatment // Bulletin of Kazan Technological University, 2013. S. 165–166.
 6. *Blinova I.V., Popov I.Yu.* Curves Defined Parametrically and in Polar Coordinates. Study Guide. – SPb: ITMO University, 2017. 56 s.
 7. *Shustikova T.V., Sergeeva I.V.* Geometric Constructions of Curved Lines: A Study Guide for Full-Time and Part-Time Students of Technical Specialties Who Complete the Graphical Assignment «Construction of Flat Curves» / Engineering School of FEFU. Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2019. 28 s.
 8. *Klekovkin, G. A.* Spatial Spirals. All-Russian Mathematical Portal Math-Net.Ru. 2019, issue 2, 20-30 p. (accessed on 20.07.2025).
 9. *Shauberge V.L.* Patent 196680 (AU). 1957.
 10. *Shauberge, V.L.* Energiya vody / V.L. Shauberge. – M.: Eksmo, Yauza, 2007. – 320 s.
 11. *Shauberge, Viktor.* – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Shauberge,_Viktor (date of request 20.07.2025).
 12. *Orlov, A.I.* Decision Theory. Textbook / A.I. Orlov. – Moscow: Examen Publishing House, 2005. 1035 s.
 13. *Mitsel A.A., Shelestov A.A., Romanenko V.V.* Optimization Methods. Part 1. Textbook. – Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2020. 350 s.
 14. *Terekhov VV.* [and others] A device for cleaning fuel and lubricants with one straight input and two output channels: Patent 227812 (RU). 2024.
 15. *Terekhov VV.* [and others] A device for purifying water in areas affected by environmental disasters: Patent 277152 (RU). 2022.