

## ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ СЕПАРАТОР СО СПИРАЛЕОБРАЗНЫМ (ВИТЫМ) КАНАЛОМ



### CENTRIFUGAL SEPARATOR WITH SPIRAL (TWISTED) CHANNEL

**Курбасов А.М.**

доцент,  
Краснодарское высшее военное  
авиационное училище летчиков  
kvvaul@mil.ru

**Терехов В.В.**

кандидат технических наук,  
доцент,  
Краснодарское высшее военное  
авиационное училище летчиков  
kvvaul@mil.ru

**Савицкий Ю.А.**

доцент,  
Краснодарское высшее военное  
авиационное училище летчиков  
kvvaul@mil.ru

**Аннотация.** В статье авторами проведен анализ и оценка массогабаритных характеристик разработанных авторским коллективом конструкций инерционных центробежных сепараторов. Авторы в статье делают заключение об эффективности и целесообразности применения своих конструкторских разработок.

**Ключевые слова:** центробежный сепаратор, инерционный сепаратор, спиралеобразный канал, пространственный винтовой канал, массогабаритные характеристики, очистка жидкости.

**Kurbasov A.M.**

Associate Professor,  
Krasnodar Higher Military Flight School  
kvvaul@mil.ru

**Terekhov V.V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Krasnodar Higher Military Flight School  
kvvaul@mil.ru

**Savitsky Yu.A.**

Associate Professor,  
Krasnodar Higher Military Flight School  
kvvaul@mil.ru

**Annotation.** In the article, the authors analyzed and evaluated the weight and size characteristics of the designs of inertial centrifugal separators with a spiral-shaped (twisted) channel developed by the author's team. The authors in the article make a conclusion about the effectiveness and expediency of using their design developments.

**Keywords:** centrifugal separator, inertial separator, spiral channel, spatial screw channel, weight and size characteristics, liquid purification.

Современный интерес к исследованию течений многофазных несмешиваемых сред связан с большим количеством практических проблем, возникающих в таких областях, как кораблестроение, автомобилестроение, атомная промышленность, нефтегазовая промышленность – везде, где используются системы и устройства очистки жидкости. Нахождение аналитического решения для большинства индустриальных задач не представляется возможным, а проведение натурального эксперимента часто очень затратно и не всегда может дать ответы на поставленные вопросы, поэтому наиболее перспективным направлением в этой области является развитие численных методов исследования. Одной из самых простых решаемых задач является оценка массогабаритных характеристик устройства.

При рассмотрении течения жидкости в каналах нас всегда интересует два вопроса – какой расход жидкости в данном канале, и каким является характер течения жидкости в нем.

Ответ на первый вопрос дает простое уравнение:

$$Q = \bar{v} \cdot A, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где  $\bar{v}$  – средняя скорость потока в канале, м/с;  $A$  – площадь нормального сечения канала, м<sup>2</sup>.

Расход жидкости  $Q$  и площадь сечения канала  $A$  всегда можно измерить с достаточной для решения практических задач точностью, и потому значение средней скорости также будет вычислено достаточно точно. А вот выяснение, каким является реальный профиль скоростей, характеризующий течение жидкости в канале при данной средней скорости, является сложной задачей. От реального профиля скоростей в потоке зависит и гидравлическое сопротивление, и значения коэффициентов теплообмена между жидкостью и стенками канала и др.

Характер течения жидкости в канале определяет значение числа (критерия) Рейнольдса.

Число Рейнольдса, равно:

$$Re = \frac{v \cdot d_{\text{экв}}}{\nu}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость потока жидкости в канале,  $\text{м}^2$ ;  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр канала,  $\text{м}$ ,  
 $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Эквивалентный диаметр канала любого сечения определяют выражением:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot A}{P}, \quad \text{м}, \quad (3)$$

где  $A$  – площадь канала,  $\text{м}^2$ ;  $P$  – периметр канала,  $\text{м}$ .

Используемый в формуле (1) параметр «эквивалентный диаметр  $d_{\text{экв}}$ », для канала круглой формы совпадает с диаметром круга, поскольку:

$$d_{\text{экв}}^{\text{кр}} = \frac{4 \cdot A}{P} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d} = d \quad (4)$$

Для канала кольцевого сечения, имеющего наружный диаметр  $d_2$  и внутренний диаметр  $d_1$ , эквивалентный диаметр будет равен:

$$d_{\text{экв}}^{\text{кольц}} = \frac{4 \cdot A}{P} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (d_2^2 - d_1^2)}{\pi \cdot (d_2 + d_1)} = 8 \cdot (d_2 - d_1). \quad (5)$$

Для канала прямоугольного сечения, имеющего ширину  $b$  и высоту  $h$ , эквивалентный диаметр будет равен:

$$d_{\text{экв}}^{\text{пря}} = \frac{4 \cdot A}{P} = 4 \cdot \frac{b \cdot h}{2 \cdot (b + h)} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) дают соотношения двух размеров. В практических задачах, когда задан один размер, важно знать, каким должен быть второй размер, чтобы при этом число Рейнольдса  $Re$  в данном канале было равно числу Рейнольдса в аналогичном канале круглого сечения.

Выяснить это можно, приравняв площадь поперечного сечения круглого канала, определяемого по формуле  $A_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , к площади поперечного сечения канала любой другой формы.

Поскольку площадь канала прямоугольного сечения равна  $A_{\text{пря}} = b \cdot h$ , приравняем ее площади круга и получим:

$$d_{\text{экв}}^{\text{пря}} = \frac{4 \cdot A}{P} = 4 \cdot \frac{b \cdot h}{2 \cdot (b + h)} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h}, \quad (7)$$

откуда найдем, что для назначенного диаметра  $d$  и одного:

$$b = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot h} \text{ и } h = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot b}.$$

$$A_{\text{кольца}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2), \quad (8)$$

где  $d_2$  – наружный диаметр канала, м;  $d_1$  – внутренний диаметр канала, м.

Нас интересует течение жидкости в спиральных каналах, когда в потоке возникает центробежная сила.

Если спиральный канал сформирован так, что продольная ось всех витков лежит в одной плоскости, то он будет иметь форму, близкую к форме спирали Архимеда.

Если продольная ось всех витков расположена на образующей цилиндра, то он будет иметь форму пружины.

Поперечное сечение каналов может быть любым – в простейших случаях это форма круга и форма прямоугольника.

Можно рассмотреть две задачи для прямоугольного и кольцевого каналов:

– какими должны быть их размеры, чтобы площадь таких каналов была равна площади круглого канала;

– какими должны быть их размеры, чтобы эквивалентные диаметры этих каналов были равны диаметру круглого канала, т.е. чтобы их эквивалентный диаметр был равен  $d$ .

В обеих задачах как площадь, так и эквивалентный диаметр определяют всего два размера.

Поэтому для прямоугольного канала получим:

Из условия равенства эквивалентных диаметров каналов:

$$b = \frac{2 \cdot d \cdot h}{h - 2 \cdot d} \text{ и } h = \frac{2 \cdot d \cdot b}{b - 2 \cdot d}.$$

Из условия равенства площади каналов:

$$b = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot h} \text{ и } h = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot b}.$$

Для кольцевого канала получим:

Из условия равенства эквивалентных диаметров каналов:

$$d = d_{\text{экв}}^{\text{кольца}} = 8 \cdot (d_2 - d_1),$$

откуда:

$$d_1 = d_2 - \frac{d}{8} \text{ и } d_2 = d_1 + \frac{d}{8}.$$

Из условия равенства площади каналов:

$$d_1 = \sqrt{d_2^2 - \frac{d^2}{4}} \text{ и } d_2 = \sqrt{d_1^2 + \frac{d^2}{4}}.$$

Рассмотрим спиральный продольный канал, образованный винтовым шнеком, помещенным в трубу. Такой канал в осевом направлении ограничен стенками шнека, а в осевом – внутренним диаметром шнека и внутренним диаметром внешней трубы (рис. 1, а, б).

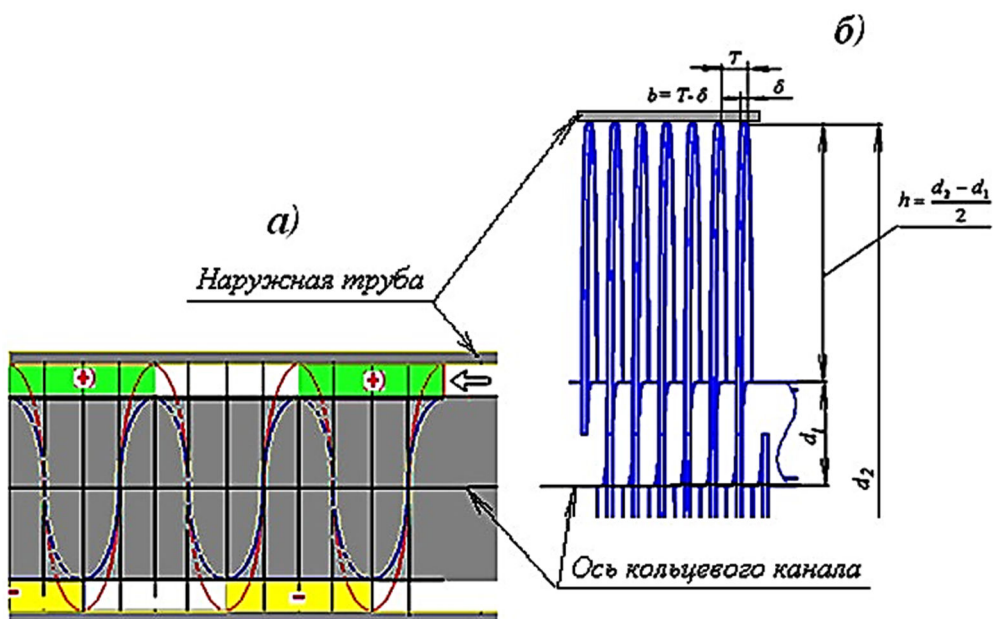


Рисунок 1 – Винтовой канал с большим (а) и малым (б) шагом

(Это может быть и стержень или толстостенная труба с нанесенной на ней резьбой с крупным шагом, помещенный в трубу). Каким должен быть размер внутреннего канала кольцевого сечения  $d_1$  при заданном значении наружного канала  $d_2$ , чтобы образованный ими кольцевой канал имел диаметр, эквивалентный диаметру назначенного канала кругового сечения  $d$ .

Для этого приравняем правые части уравнений (2) и (4), после чего получим:

$$d = 8 \cdot (d_2 - d_1),$$

откуда найдем:

$$d_1 = d_2 - \frac{d}{8}. \quad (9)$$

Аналогичный анализ, проведенный исходя из соображений равенства сечений круглого и кольцевого каналов (если приравнять уравнения (3) и (5)) приводит нас к результату:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \pi \cdot (d_2^2 - d_1^2) \frac{d^2}{4} = d_2^2 - d_1^2$$

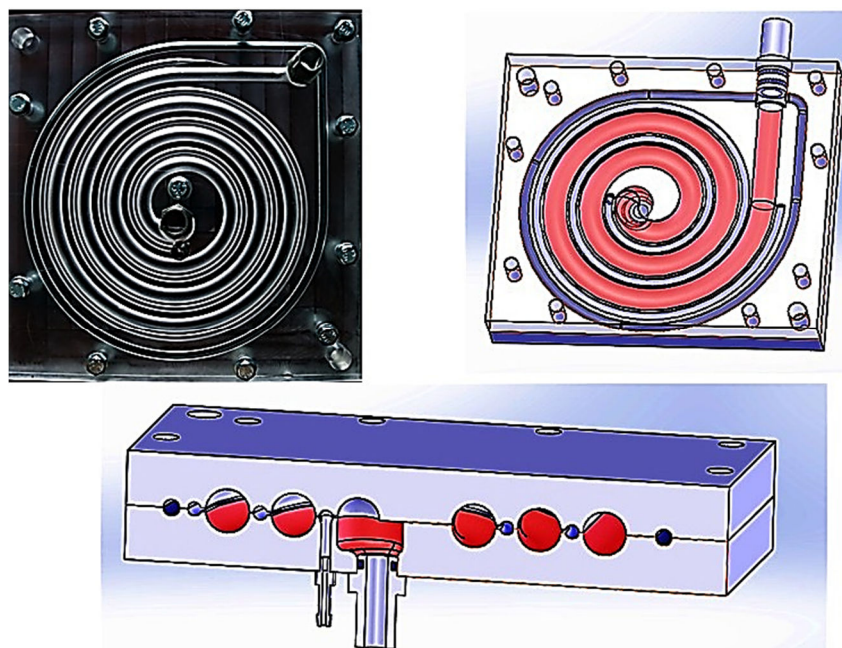
или

$$d_2 = \sqrt{d_1^2 + \frac{d^2}{4}} = \frac{\sqrt{4 \cdot d_2^2 - d^2}}{2}. \quad (10)$$

Уравнение (9) показывает нам условие равенства чисел Рейнольдса, которое характеризует аналогичность характера течения в круговом и кольцевом каналах.

Уравнение (10) показывает условие равенства сечений кругового и кольцевого каналов.

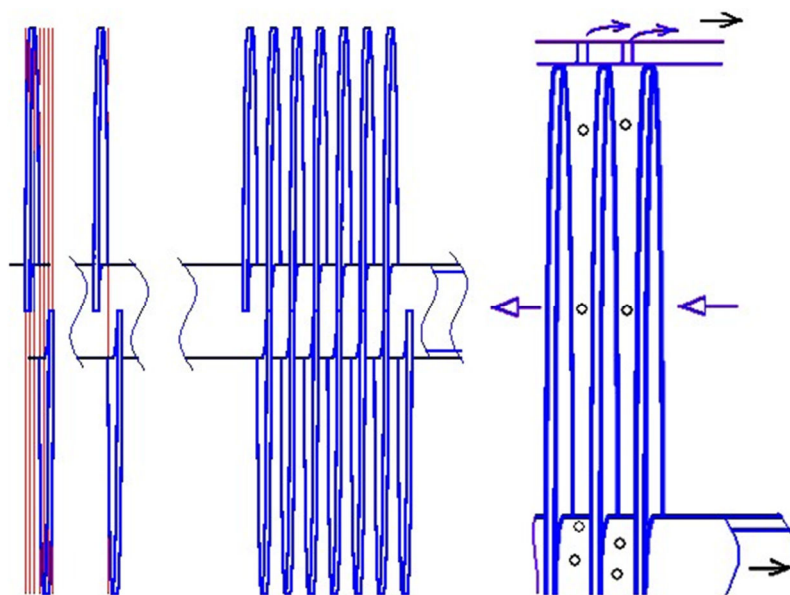
В настоящее время разработано несколько конструкций инерционных центробежных сепараторов со спиралеобразным (витым) каналом. Действующий образец экспериментальной установки инерционного сепаратора, исполнен плоским и имеет канал, закрученный по спирали на 3,5 витка (рис. 2).



**Рисунок 2** – Инерционный центробежный сепаратор со спиралеобразным каналом

Если рассмотреть конструкцию инерционного сепаратора со спиралеобразным каналом (рис. 2), то можно видеть, что диаметр внутреннего (ближнего к центру) витка спирали из чисто конструктивных соображений не может быть заметно уменьшен, а увеличение наружного диаметра уменьшает эффективность осаждения. С другой стороны, при увеличении количества витков спирали (наружного диаметра  $D$ ) приводит к увеличению приращения  $\Delta$  площади, а следовательно, увеличению массы и объема конструкции.

На наш взгляд перспективным устройством для использования в системах очистки жидкости является конструкция инерционного центробежного сепаратора с пространственным винтовым каналом, представленная на рисунке 3. Которая имеет ряд преимуществ.



**Рисунок 3** – Инерционный центробежный сепаратор с пространственным винтовым каналом

Плоский спиральный канал состоит из двух плоских пластин, на которых в зеркальном отражении выполнены спиральные каналы глубиной в половину диаметра.

Таким образом, при исполнении из одинакового материала, массы обоих рассматриваемых конструкций будут примерно одинаковыми, длина канала (и время пребывания потока в устройстве) устройства (рис. 2) будет в 2–3 раза больше, при этом возрастает эффективность очистки, за счет меньшего среднего диаметра канала.

Кроме того, можно отметить, что центральная часть устройства (рис. 2) может быть выполнена полой, что позволит уменьшить общую массу рассматриваемого устройства.

### Литература

1. Сепаратор очистки жидкости центробежный с кольцевыми каналами / В.В. Терехов, Р.Р. Черный, Ю.А. Савицкий, П.В. Чумак, В.А. Косой. Патент на полезную модель 204736 U1, 08.06.2021. Заявка № 2021102923 от 08.02.2021.
2. Устройство очистки жидкости / П.В. Чумак, В.В. Терехов, Р.Р. Черный. Патент на полезную модель RU 161442 U1, 20.04.2016. Заявка № 2015147679/05 от 05.11.2015.
3. Сепаратор очистки жидкости центробежный / В.В. Терехов, Р.Р. Черный, Л.А. Пережогин. Патент на изобретение RU 2484877 C1, 20.06.2013. Заявка № 2012109098/05 от 11.03.2012.
4. Устройство очистки жидкости / Р.Р. Черный, В.В. Терехов, М.И. Рябухин. Патент на полезную модель RU 116781 U1, 10.06.2012. Заявка № 2012101719/05 от 18.01.2012.
5. Устройство для очистки жидкости / В.Г. Докучаев, М.И. Рябухин, В.В. Терехов. Патент на изобретение RU 2404839 C1, 27.11.2010. Заявка № 2009121486/05 от 08.06.2009.
6. Докучаев В.Г., Терехов В.В. Методика численного моделирования турбулентного течения в осесимметричном канале. The Methodic of computational modeling of turbulent stream in axisymmetric channel // Техника и технология. – 2010. – № 4. – С. 29–33.
7. Терехов В.В., Чумак И.А., Терехов В.В. Инновационный метод очистки воды от техногенных загрязнений // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 1. – С. 186–190.
8. Инерционный насос-сепаратор / В.В. Терехов, Д.В. Терехов, Я.Д. Терехов, В.В. Терехов. Патент на изобретение RU 2785564, 08.12.2022. Заявка № 2022101522 от 24.01.2022.
9. Устройство для очистки воды в местах экологических катастроф / В.В. Терехов, Р.Р. Черный, Л.А. Пережогин, П.В. Чумак, Ю.А. Савицкий, В.В. Терехов. Патент на изобретение RU 277152, 01.08.2022. Заявка № 2021127498 от 20.00.2021.

### References

1. Centrifugal liquid purification separator with ring channels / V.V. Terekhov, R.R. Cherny, Yu.A. Savitsky, P.V. Chumak, V.A. Oblique. Utility model patent 204736 U1, 06/08/2021. Application № 2021102923 dated 02/08/2021.
2. Liquid purification device / P.V. Chumak, V.V. Terekhov, R.R. Black. Utility model patent RU 161442 U1, 04/20/2016. Application № 2015147679/05 dated 05.11.2015.
3. Centrifugal liquid purification separator / V.V. Terekhov, R.R. Cherny, L.A. Perezhogin. Patent for invention RU 2484877 C1, 06/20/2013. Application № 2012109098/05 dated 03/11/2012.
4. Liquid purification device / R.R. Cherny, V.V. Terekhov, M.I. Ryabukhin. Utility model patent RU 116781 U1, 06/10/2012. Application № 2012101719/05 dated January 18, 2012.
5. Device for liquid purification / V.G. Dokuchaev, M.I. Ryabukhin, V.V. Terekhov. Patent for invention RU 2404839 C1, November 27, 2010. Application № 2009121486/05 dated 06/08/2009.
6. Dokuchaev V.G., Terekhov V.V. Methodology for numerical simulation of turbulent flow in an axisymmetric channel. The Methodology of computational modeling of turbulent stream in axisymmetric channel // Equipment and technology. – 2010. – № 4. – P. 29–33.
7. Terekhov V.V., Chumak I.A., Terekhov V.V. Innovative method of water purification from technogenic pollution // Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2022. – № 1. – P. 186–190.
8. Inertial separator pump / V.V. Terekhov, D.V. Terekhov, Ya.D. Terekhov, V.V. Terekhov. Patent for invention RU 2785564, 12/08/2022. Application No. 2022101522 dated January 24, 2022.
9. Device for water purification in places of environmental disasters / V.V. Terekhov, R.R. Cherny, L.A. Perezhogin, P.V. Chumak, Yu.A. Savitsky, V.V. Terekhov. Patent for invention RU 277152, 08/01/2022. Application № 2021127498 dated 20.00.2021.