

УДК 628.16

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА  
В СПИРАЛЬНОМ КАНАЛЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТИ**



**A METHOD FOR CALCULATING THE FLOW VELOCITY PROFILE  
IN THE SPIRAL CHANNEL OF A LIQUID PURIFICATION DEVICE**

**Терехов В.В.**

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

**Чумак П.В.**

кандидат технических наук,  
доцент,  
Кубанский государственный технологический университет  
chumak1987@mail.ru

**Пережогин Л.А.**

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

**Терехов В.В.**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
mitya.ivanov.2015@gmail.ru

**Аннотация.** В статье авторами исследуется методика расчета профиля скоростей потока в спиральном канале при расчете устройства для очистки жидкости. Описывается метод очистки жидкости предложенный и разработанный авторами. Предлагается новая технология очистки жидкости путем разделения жидкости и твердых частиц по плотности за счет центробежной силы.

**Ключевые слова:** очистка жидкости, профили скоростей потока, твердые частицы и примеси, спираль Архимеда, спиралеобразный канал, центробежная сила, осаждающая сила, устройство для очистки жидкости.

**Terekhov V.V.**

PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Krasnodar Higher Military Flight School  
kvvaul@mil.ru

**Chumak P.V.**

PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Kuban State Technological University  
chumak1987@mail.ru

**Perezhogin L.A.**

PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Krasnodar Higher Military Flight School  
kvvaul@mil.ru

**Terekhov V.V.**

Student,  
Kuban State Technological University  
mitya.ivanov.2015@gmail.ru

**Annotation.** In the article, the authors investigate the methodology for calculating the flow velocity profile in a spiral channel when calculating a liquid purification device. The method of liquid purification proposed and developed by the authors is described. A new technology for liquid purification is proposed by separating liquid and solid particles by density due to centrifugal force.

**Keywords:** liquid purification, flow velocity profiles, solid particles and impurities, Archimedes spiral, spiral channel, centrifugal force, precipitating force, liquid purification device.

**В** настоящее время в крупных городах России, Краснодар не исключение, остро стоит проблема очистки промышленных сточных вод и ливневой канализации (далее – сточные воды) перед выпуском их в водоём. Очистка сточных вод осуществляется на специальных очистных сооружениях. Основной метод очистки механический, при механической очистке производится предварительная очистка поступающих на очистные сооружения сточных вод с целью подготовки их к сбросу в водоём. На механическом этапе происходит задержание грубых и тонкодисперсных примесей. Сооружения для механической очистки сточных вод включаю в себя [1, 2]:

- решётки и сита;
- песколовки;
- первичные отстойники;

- фильтры;
- септики.

Все эти сооружения имеют капитальную фундаментальную постройку, занимают большие площади муниципальной земли, очистка занимает длительное время, имеют большую себе стоимость и дороги в обслуживании.

Проведя анализ вышеизложенного, учитывая все недостатки и достоинства современных технологий очистки воды и разложения её на жидкие и твердые фракции. Назревает задача в разработки новых инновационных устройств и применения новых технологий очистки.

На основании проведенного анализа, сформулированы требования к разрабатываемому устройству для очистки воды и разложения её на жидкие и твердые фракции:

- сокращение времени на механическую очистку сточных вод;
- уменьшение расходов на содержание жилищно-коммунального хозяйства города;
- минимальный вес и габариты устройства, обеспечивающие высокую мобильность;
- отсутствие движущихся частей;
- полная герметичность устройства, обеспечивающая его пожаробезопасность;
- простота и надежность в эксплуатации;
- высокая ремонтпригодность;
- минимальная стоимость изготовления и эксплуатации.

Устройство для механической очистки воды и разложения её на жидкие и твердые фракции содержит корпус с входным и выходным патрубками. Внутри корпуса выполнен спиралеобразный проточный канал с постоянным значением площади круглого поперечного сечения, соединяющий входной и выходной патрубки. Проточный канал выведен в выходной патрубок по касательной [1, 2].

Для отвода отделяемых примесей большей плотности по сравнению с плотностью основной массы жидкости (воды) по внешней образующей проточного канала устройства, выполнена внешняя щель, соединенная с внешним каналом отвода примесей, через который отделяемые примеси с большей плотностью выводятся в первый приемник. Внешняя щель имеет в поперечном сечении сужающуюся форму, в частности, форму трапеции. Меньшее основание трапеции сообщает внешнюю щель с внешним каналом отвода примесей. Большее основание трапеции сообщает эту щель с проточным каналом. Размер внешней щели со стороны внешнего канала отвода примесей составляет 1 мм, а со стороны проточного канала – 5 мм.

Конец внешнего канала отвода примесей соединен с первым приемником через регулирующее устройство, выполненное с возможностью изменения площади поперечного сечения внешнего канала в месте его установки. Регулирующее устройство позволяет изменять скорость истечения потока отделенной жидкости и механических частиц из внешнего канала отвода примесей в первый приемник, чем регулируется степень и качество очистки.

Для отвода отделяемых примесей меньшей плотности по сравнению с плотностью основной массы жидкости (воды) по внутренней образующей проточного канала устройства, выполнена внутренняя щель, соединенная с внутренним каналом отвода примесей, через который отделяемые примеси с меньшей плотностью выводятся во второй приемник. Размер внутренней щели 1 мм. Размер внутренней щели и размер внутреннего канала определяется объемом загрязнения жидкости легкими составляющими, к которым относятся, в основном, горюче-смазочные материалы.

Устройство очистки воды работает следующим образом: загрязненная вода под давлением подается во входной патрубок, и далее поступает в спиралеобразный проточный канал. Под действием центробежные сил происходит распределение по плотности частиц жидкости и примесей в поперечном сечении канала [3, 4].

При этом частицы примесей жидкости, имеющие плотность, меньше плотности основного потока воды (например, нефтепродукты), вытесняются к внутренней стороне

спиралеобразного проточного канала. Такие частицы примесей, достигнув стенки канала с внутренней стороны спирали, и продолжая свое движение, вдоль канала, через внутреннюю щель попадают во внутренний канал отвода примесей. Двигаясь вдоль внутреннего канала, указанные легкие фракции отводятся во второй приемник через соответствующее регулирующее устройство. Изменением площади поперечного сечения в месте установки регулирующего устройства достигается изменение пропускной способности внутреннего канала, что приводит к изменению количества жидкости малой плотности, отводящихся из устройства очистки, и, следовательно – к изменению степени очистки.

Частицы механических примесей и примесей жидкости, имеющие плотность, больше, чем у основного потока, прижимаются к внешней стороне спиралеобразного проточного канала. Такие частицы примесей, достигнув стенки канала с внешней стороны спирали, и продолжая свое движение, вдоль канала, через внешнюю щель попадают во внешний канал отвода примесей. Выполнение внешней щели трапецеидальной, широким основанием сообщающейся с проточным каналом, позволяет захватить в щель большее количество частиц примесей, достигших этой щели. Если частицы примесей, двигаясь к щели, ударяются о ее стенки, то происходит их «отскок» в сторону внешнего канала отвода примесей, а не в сторону проточного канала [5].

Двигаясь вдоль внешнего канала частицы примесей, отводятся в первый приемник через регулирующее устройство. Изменением площади поперечного сечения в месте установки регулирующего устройства достигается изменение пропускной способности внешнего канала, что приводит к изменению количества частиц примеси, отводящихся из устройства очистки, и, следовательно – к изменению степени очистки.

Очищенная вода попадает в выходной патрубков, откуда выводится из устройства очистки. Конструктивная и принципиальная схема модели устройства для механической очистки воды и разложения её на жидкие и твердые фракции показана на рисунке 1 [6].

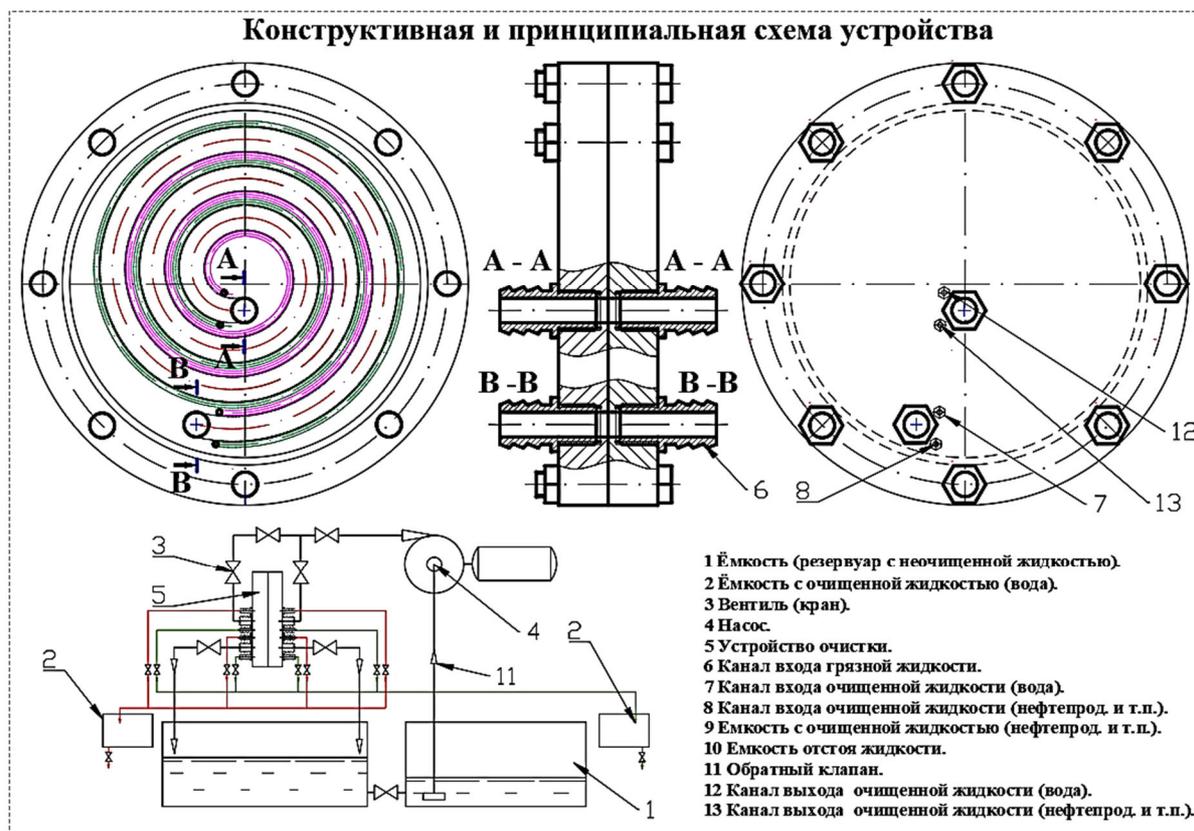


Рисунок 1 – Модель устройства для механической очистки жидкости

Для расчета профиля скоростей потока в спиральном канале устройства для очистки жидкости будем использовать основные аналитические зависимости расчета спирали Архимеда. Профили скоростей потока при ламинарном и турбулентном течении жидкости в прямолинейной трубе имеют существенные отличия. На входе в трубу скорости по сечению полагают одинаковыми, но в пределах длины некоторого участка, называемого начальным участком, происходит стабилизация профиля скоростей. Для турбулентного течения длина начального участка, составляет  $10d...15d$ , для ламинарного режима его составляет  $50d...70d$  [7].

У стенок трубы скорости принимаются нулевыми, к центру (оси трубы) они постепенно увеличиваются, т.е. у стенок трубы создается *ламинарный слой* небольшой толщины, за пределами которого располагается центральная основная часть – ядро потока или *турбулентное ядро* (при турбулентном режиме течения). В связи с малыми скоростями течения в пристенном слое, где режим течения будет ламинарным, скорости быстро и линейно нарастают, градиент скорости здесь велик, и его можно приближенно считать величиной постоянной. В пределах центрального ядра турбулентного течения изменение скоростей происходят не так интенсивно. Иллюстрация такой схемы показана на рисунке 2.

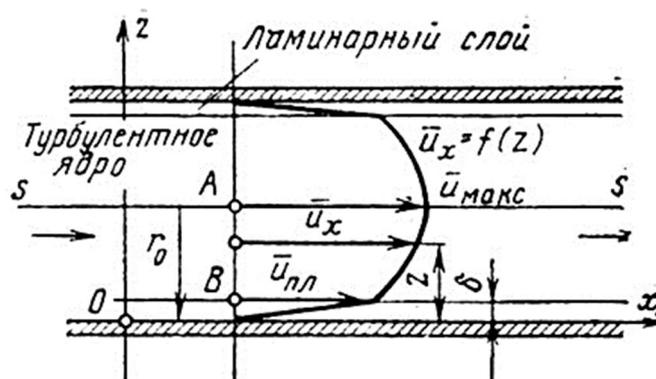


Рисунок 2 – Эпюры скоростей при турбулентном режиме движения

Важно обратить внимание на две особенности течения жидкости в спиральном канале. Первая состоит в том, что участка стабилизации, аналогичному участку прямолинейного канала здесь быть не может, поскольку радиус кривизны основного канала непрерывно изменяется. Вторая особенность состоит в том, что, профиль скоростей в любой плоскости, проведенной через точку пересечения радиуса с осью симметрии канала, будет различным из-за наличия центробежных сил [9, 10].

Если рассмотреть профиль скоростей турбулентного потока в плоскости, проведенной перпендикулярно текущему радиусу  $r$  и одновременно перпендикулярной плоскости спирали, то эпюра скоростей потока будет подобна эпюре скоростей, характерной для турбулентного потока в прямолинейной трубе, которая представлена на рисунке 3.

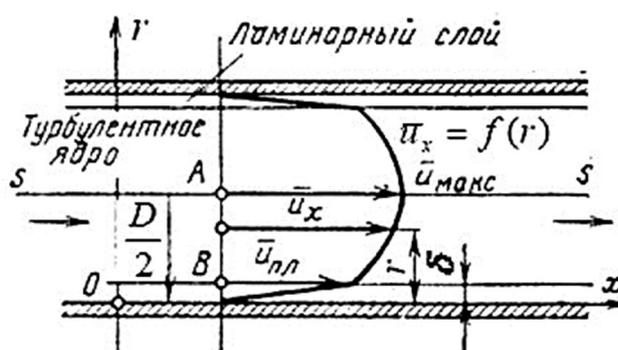


Рисунок 3 – Эпюры скоростей в прямолинейном канале при турбулентном режиме движения

Скорость потока на стенке канала равна нулю, скорость в кольцевом канале, отделяющем стенки от турбулентного ядра потока, изменяется практически линейно, а затем ее изменение соответствует профилю, показанному на рисунке 3. Поскольку расход жидкости по длине спирального канала является величиной неизменной неизменным, то и профили эпюры скоростей потока в этой плоскости будет иметь вид, сходный с показанным на рисунке 3, при любом значении радиуса  $\rho$ .

Вместе с тем, центробежное ускорение, приложенное к любому элементарному объему потока, является функцией текущего радиус спирали:

$$a = \frac{V^2}{\rho} = \frac{V^2}{k \cdot \phi}, \quad (1)$$

поэтому и профиль ускорений по своей форме не будет принципиально отличаться то вида, показанного на рис. 10. Однако он будет вытянут вдоль продольной оси канала и его значение будет пропорциональное квадрату скорости для каждого текущего радиуса основного канала.

В плоскости симметрии центробежного сепаратора, проведенной через центр основного канала, у эпюры скоростей (рис. 3) возникает одно принципиальное отличие – скорость потока при  $r = D/2$  не будет равна нулю, поскольку в этой зоне расположены щелевые каналы. Скорость потока в зоне щелевого канала может быть различной. Она зависит и от средней скорости потока, от интенсивности расхода жидкости из отводящих каналов, от количества мест отвода из отводящих каналов и другие [10].

При анализе процесса осаждения частиц под действием внешней силы следует иметь в виду, что осаждение частиц из турбулентного потока значительно отличается от процесса осаждения в ламинарном режиме, которое описывает закон Стокса.

Известно, что частицы, размер которых сопоставим с длиной теплового смещения, осаждают очень трудно. Их отделяют в центрифугах, в которых центробежные силы превосходят силу гравитации в тысячи и десятки тысяч раз. Ясно, что столь малые частицы выделить из турбулентного потока не удастся.

Однако также известно, что гидравлическое сопротивление движению частиц в ламинарном режиме в десятки раз превосходит сопротивление их движению при турбулентном режиме. Турбулентные вихри увлекают с собой содержащиеся в воде частицы, и одновременно на эти вихри воздействует внешняя центробежная сила. Под действием этой внешней силы, приложенной к частицам и находящимся в вихрях, положение вихрей в потоке будет изменяться. Вихри с более тяжелыми частицами будут оттесняться в сторону наружного щелевого канала, а с более легкими – смещаться в сторону внутреннего щелевого канала. Величину этого смещения называют *путем смещения*. На основании анализа модели турбулентности [2], разработанной исходя из понятия *пути смещения*, было показано, что величина касательного напряжения в турбулентном режиме, также, как и в ламинарном, связаны зависимостью, аналогичной закону Ньютона. Это формально позволяет говорить о коэффициенте турбулентной вязкости  $\mu_T$ . Из этого следует, что для описания турбулентного режима течения закон Ньютона можно записать в виде:

$$\tau' = \mu_T \cdot \frac{dv}{dy}. \quad (2)$$

Турбулентную вязкость называют также «кажущейся», и в настоящее время имеется ряд полуэмпирических теорий для оценки ее величины. Например, в [3] пришли к выводу, что величину отношения касательных напряжений  $\tau'/\tau$  можно определять по формуле:

$$\frac{\tau'}{\tau} = 0,01 \cdot Re. \quad (3)$$

Кроме численного значения, турбулентная вязкость  $\mu_T$  отличается от обычной вязкости  $\mu$  еще и тем, что ее значение в разных точках сечения канала различно. Вблизи стенки ее значение стремится к нулю, что важно для анализа процесса сепарации.

Скорость потока в змеевике  $u_{зм}$  и скорость частиц в начальный момент одинаковы, поскольку радиальная скорость перемещения частиц равна нулю. Полная скорость движения частицы будет равна сумме тангенциальной (линейной) скорости потока  $u_{зм}$  и радиальной скорости, которая в радиальном направлении будет возрастать до некоторой величины [10].

Когда осаждение происходит под действием центробежных сил, неизбежны дополнительные возмущения жидкости, из которой происходит осаждение, и для гарантии процесса оседания необходимо преобладание скорости оседания над скоростью теплового движения примерно на порядок, т.е. расчетное значение  $u_{ч}$ , полученное по формуле для расчета скорости осаждения при ламинарном режиме при  $t = 1$ , необходимо умножить на 10.

$$v_{ч} = \frac{d_{ч}^2 \cdot v_{зм}^2}{18 \cdot \mu_{жс} \cdot R_{зм}} \cdot (\rho_{ч} - \rho_{жс}), \text{ м/с}, \quad (4)$$

Экспериментальное исследование процессов осаждения показало, что при таком увеличении значения скорости  $u_{ч}$  наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных данных с результатами опытов.

При осаждении частиц из турбулентного потока ситуация с воздействием на частицу хаотических сил, связанных с турбулентностью, аналогична хаотическому тепловому движению молекул жидкости и их воздействию на находящиеся в ней частицы. Однако при этом величина сил, воздействующих на частицы в вихрях турбулентного потока жидкости, может превышать силу тяжести на много порядков.

Таким образом, как следует из вышеизложенного для учета этих сил в расчеты, вводят поправочный коэффициент, однако конкретное значение такого коэффициента зависит от скорости потока, от конфигурации канала, от формы и масштаба отводных каналов, и может быть оценено только по результатам экспериментов. Для предварительных расчетов можно принимать значение поправочного коэффициента, равным 102, однако решающим аргументом для оценки является эксперимент.

## Литература

1. Метод очистки авиационного топлива для ЛА малой авиации / А.А. Карташова, Ю.А. Савицкий, В.П. Панков, В.В. Терехов // В сборнике XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, Посвященной 61-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей. – Краснодар, 2022. – С. 300–304.
2. URL : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Архимедова\\_спираль](https://ru.wikipedia.org/wiki/Архимедова_спираль) (24.11.2023).
3. Лекции по гидродинамике // Казанский (Приволжский) федеральный университет. – URL : [https://kpfu.ru/Mazo\\_Potashev\\_Gidrodinamika](https://kpfu.ru/Mazo_Potashev_Gidrodinamika) (28.11.2023).
4. 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.
5. Чумак П.В. 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.
6. Терехов В.В. Сепаратор очистки жидкости центробежный / В.В. Терехов, Р.Р. Черный, Л.А. Перезогин // Патент на изобретение RU 2484877 C1, 20.06.2013. Заявка № 2012109098/05 от 11.03.2012.
7. Черный Р.Р. 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.
8. Докучаев В.Г. 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.
9. Докучаев В.Г. Методика численного моделирования турбулентного течения в осесимметричном канале / В.Г. Докучаев, В.В. Терехов // Техника и технология. – 2010. – № 4. – С. 29–33.

10. Терехов В.В. Исследование конструкции инерционного центробежного сепаратора с пространственным витым каналом / В.В. Терехов, Ю.А. Савицкий, П.В. Чумак // Естественные и технические науки. – 2023. – № 6(181). – С 236–239.

### References

1. Method of cleaning aviation fuel for small aircraft / A.A. Kartashova, Yu.A. Savitsky, V.P. Pankov, V.V. Terekhov // In the collection of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Dedicated to the 61st anniversary of the flight of Yu.A. Gagarin into space. Collection of scientific articles. – Krasnodar, 2022. – P. 300–304.
2. URL : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Archimedean\\_spiral](https://ru.wikipedia.org/wiki/Archimedean_spiral) (11/24/2023).
3. Lectures on hydrodynamics // Kazan (Volga Region) Federal University. – URL : [https://kpfu.ru/Mazo\\_Potashev\\_Gidrodinamika](https://kpfu.ru/Mazo_Potashev_Gidrodinamika) (11/28/2023).
4. 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.
5. Chumak P.V. 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.
6. Terekhov V.V. 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.
7. Cherny R.R. Liquid purification device / R.R. Cherny, V.V. Terekhov, M.I. Ryabukhin // Patent for utility model RU 116781 U1, 06/10/2012. Application № 2012101719/05 dated January 18, 2012.
8. Dokuchaev V.G. Device for liquid purification / V.G. Dokuchaev, M.I. Ryabukhin, V.V. Terekhov // Patent for invention RU 2404839 C1, 11/27/2010. Application № 2009121486/05 dated 06/08/2009.
9. Dokuchaev V.G. Methodology for numerical modeling of turbulent flow in an axisymmetric channel / V.G. Dokuchaev, V.V. Terekhov // Equipment and technology. – 2010. – № 4. – P. 29–33.
10. Terekhov V.V. Study of the design of an inertial centrifugal separator with a spatial twisted channel / V.V. Terekhov, Yu.A. Savitsky, P.V. Chumak // Natural and technical sciences. – 2023. – № 6(181). – P. 236–239.