УДК 628.164

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ

♦♦♦♦♦

COMPARATIVE TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF DEVICES MECHANICAL WATER PURIFICATION OF WATER TREATMENT SYSTEMS

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

Аннотация. В статье проведён сравнительный технико-экономический анализ устройств механической очистки воды систем водоподготовки. Для сравнения конструктивных и технических характеристик устройств грубой механической очистки воды используются качественные и количественные критерии оценки. Установлено, что рассматриваемые в исследовании одиночные устройства механической очистки фильтры и неразборные инерционные устройства очистки, а также гидроциклоны и разборные инерционные устройства очистки имеют сопоставимую массу. Рассмотренные в статье многоступенчатые системы очистки воды на фильтрах обладают высоким удельным экономическим показателем, который отражает стоимость единицы пропускной способности устройств очистки. В ходе исследования установлено, что одиночные инерционные устройства очистки могут соединяться в различные схемы соединений или агрегатироваться для решения конкретных технических задач (очистка воды от частиц разной дисперсной фазы, очистка воды от нефтепродуктов и т.д.). Выявлено, что инерционные агрегатированные устройства очистки имеют худшие экономические и массогабаритные показатели в сравнении с одиночными, соединёнными механически в конструкционные схемы. В результате исследования установлено, что инерционные устройства по своим техническим характеристикам, экономическим и массогабаритным показателям не проигрывают уже существующим устройствам механической очистки воды, а по таким показателям как стоимость, масса, объём неразборные устройства очистки значительно превосходят и могут занимать промежуточную нишу между фильтрами и гидроциклонами.

Ключевые слова: инерционное устройство очистки жидкости, фильтр, гидроциклон, центробежная очистка, агрегатирование, коэффициент гидравлического сопротивления, механическое соединение, многоступенчатые системы очистки.

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

Annotation. The article provides a comparative technical and economic analysis of mechanical water treatment devices used in water treatment systems. To compare the design and technical characteristics of coarse mechanical water treatment devices, qualitative and quantitative assessment criteria are used. It has been established that the single mechanical treatment devices considered in the study – filters and non disassemblable inertial cleaning devices, as well as hydrocyclones and disassemblable inertial cleaning devices – have comparable mass. The multi stage water treatment systems based on filters discussed in the article have a high specific economic indicator, which reflects the cost per unit of throughput capacity of the cleaning devices. The study established that single inertial cleaning devices can be connected in various configurations or aggregated to solve specific technical tasks (water purification from particles of different dispersed phases, water purification from petroleum products, etc.). It was found that inertial aggregated cleaning devices have worse economic and mass and size indicators compared to single devices mechanically connected in design configurations. The study established that inertial devices are not inferior to existing mechanical water purification devices in terms of their technical characteristics, economic indicators, and mass and size parameters. Moreover, in terms of cost, weight, and volume, non disassemblable purification devices significantly outperform them and can occupy an intermediate position between filters and hydrocyclones.

Keywords: inertial liquid purification device, filter, hydrocyclone, centrifugal purification, aggregation, hydraulic resistance coefficient, mechanical connection, multi stage purification systems.

Введение

Среди наиболее частых проблем водоподготовки для бытовых и промышленных нужд, требующих решения с помощью специальных установок и систем, является деминерализация, удаление механических примесей, деаэрация и многие другие. Создание и эксплуатация таких систем является актуальной задачей, при реализации которой должны использоваться современные достижения науки и техники. Механическая очистка воды – первый этап в комплексной системе водоподготовки. Её задача –

физически убрать крупные нерастворимые примеси: песок, окалину, ил, ржавчину и т.д. Существующие системы механической очистки воды обладают рядом недостатков, таких как завышенная стоимость, сложность конструкции, трудоёмкость изготовления. В связи с этим рассматривается применение в системах водоподготовки перспективного устройства механической очистки воды на основе спирали Архимеда (далее инерционные устройства очистки (УО)) [1, 2]. Для оценки целесообразности применения инерционных УО вместо существующих устройств проведём сравнительный анализ экономических и массогабаритных показателей (ЭиМГП).

Сравнительный анализ устройств

Цель – провести сравнительный анализ, выявить достоинства и недостатки использования устройств очистки на основе спирали Архимеда [1, 2], относительно традиционных устройств механической очистки воды при разной производительности одиночных устройств, а также в составе многоступенчатых систем очистки.

В ГОСТах нет единой, жёстко закреплённой классификации механической очистки воды по тонкости фильтрации. Однако некоторые стандарты рассматривают характеристики фильтров, устройств для механической очистки воды и эффективность их очистки от частиц определённого размера [3, 4].

В таблице 1 представлена классификация по степени механической очистки на основе анализа информационных данных заводов производителей и характеристик устройств очистки воды, представленных в розничной сети, торговых и интернет-площадках России [5, 6, 7, 8].

Таблица 1 – Классификация по степени механической очистки воды

№ п/п	Степень очистки, мкм	Тип фильтрации	Удаляемые загрязнения
1.	от 50 до 500	грубая	песок, крупная ржавчина, окалина
2.	от 20 до 50	средняя	мелкий песок, частицы ржавчины
3.	от 5 до 20	тонкая	ил, мелкая взвесь, мутность
4.	от 1 до 5	очень тонкая	коллоидные частицы, бактерии
5.	от 0,3 до 1	ультратонкая	субмикронные частицы, микроорганизмы

Устройства механической очистки воды применяются в самых разных сферах: бытовое водоснабжение, промышленные и сельскохозяйственные системы водоснабжения, а также жилищно-коммунальное хозяйство.

Для проведения сравнительного анализа определим объект исследования – устройства механической очистки воды систем водоподготовки.

В работе исследуются устройства механической очистки воды со степенью очистки от 50 до 500 мкм.

Проанализируем типы *устройств для механической очистки воды*:

– фильтры грубой очистки;
– песколовки;
– отстойники (статические и динамические);
– гидроциклоны;
– сепараторы.

Песколовки и отстойники – сложные сооружения, основное их применение - системы механической очистки ливневых канализаций и сточных вод, задача - очистка крупных частиц и мусора размером от 1 мм и более [9]. В связи с этим песколовки и отстойники в дальнейшем как объект исследования для механической очистки в системах водоподготовки рассматриваться не будут.

Сепараторы используются для тонкой водоочистки, как правило, это сложный агрегат с множеством внутренних узлов, гидроциклон – частный вид сепаратора для очистки жидкости. В связи с этим сепараторы в дальнейшем как объект исследования для механической очистки в системах водоподготовки рассматриваться не будут.

Для сравнения конструктивных и технических характеристик устройств механической очистки воды используем качественные и количественные критерии оценки. Для качественной оценки устройств очистки применяем два критерия: *принцип работы и тип фильтрации*, и второй критерий оценки – *способ обслуживания* устройств очистки. Для

количественной оценки применим критерии: *коэффициент гидравлического сопротивления*, а также *экономические и массогабаритные показатели* (ЭиМГП) [10, 11].

Критерии для сравнения устройств механической очистки воды

1. Принцип работы и тип фильтрации [12, 13, 14, 15, 16, 17]:

– фильтры грубой очистки (табл. 2):

Таблица 2 – Качественная оценка фильтров грубой очистки

№ п/п	Типы фильтров	Фильтрующий элемент	Метод фильтрации
1.	сетчатые фильтры	сетка с ячейками	частицы задерживаются на поверхности
2.	дисковые фильтры	пакет полимерных дисков с канавками, при сжатии образуют сложную систему каналов, задерживающих механические частицы	частицы задерживаются в объёме
3.	картриджные фильтры	сменный картридж из вспененного полипропилена, намотанной полимерной нити и т.д.	частицы задерживаются в объёме
4.	засыпные фильтры	очистка происходит в слое зернистого материала (кварцевый песок, антрацит и т.д.)	частицы задерживаются в объёме

– устройства центробежной очистки (табл. 3):

Таблица 3 – Качественная оценка центробежных устройств очистки

№ п/п	Тип устройства очистки	Способ очистки	Осаждение частиц
1.	гидроциклоны	работает за счёт центробежной силы, которая отбрасывает тяжёлые частицы к стенкам устройства	частицы выводятся через нижнюю коническую часть устройства к месту сбора шлама (шламосборник, грязесборник)
2.	инерционные УО (сборные и не разборные)	работает за счёт центробежной силы, которая отбрасывает тяжёлые частицы к стенкам устройства	частицы выводятся через отводной канал к месту сбора шлама (шламосборник, грязесборник)

Следовательно, рассмотрены (выявлены) два основных принципа работы устройств механической очистки: фильтрование и очистка загрязнённой жидкости за счёт центробежной силы. Фильтрование основано на прохождение жидкости под давлением через барьеры из различных материалов, которые задерживают загрязнения с помощью механического процеживания. Центробежная очистка (гидроциклоны и инерционные УО) осуществляется за счёт разделения по плотности загрязнённой жидкости и частиц, более тяжёлые частицы и примеси отбрасываются центробежной силой к внешним стенкам устройства и выводятся наружу, а очищенная вода уходит через выходной патрубок для дальнейшего использования.

2. Способ обслуживания [12, 13, 14, 15, 16, 17]:

– фильтры грубой очистки (табл. 4):

Таблица 4 – Качественная оценка фильтров грубой очистки

№ п/п	Типы фильтров	Способ обслуживания фильтров
1.	сетчатые фильтры	часто самопромывные (ручная или автоматическая промывка)
2.	дисковые фильтры	требуют разборки для промывки дисков
3.	картриджные фильтры	сменный модуль, который надо менять в зависимости от загрязнения воды
4.	засыпные фильтры	регенерация осуществляется обратной промывкой (ручная или автоматическая промывка, при большом расходе воды)

– устройства центробежной очистки (табл. 5):

Таблица 5 – Качественная оценка центробежных устройств очистки

№ п/п	Тип устройства очистки	Способ обслуживания
1.	гидроциклоны	не требуется расходных материалов, очистка происходит за счёт гидравлических условий
2.	инерционные УО (разборные и не разборные)	не требуется расходных материалов, очистка происходит за счёт гидравлических условий

Можно сделать вывод, что обслуживание фильтров заключается в промывке фильтрующего элемента или его замене. На промывку фильтров затрачивается время и вода, чем больше производительность фильтра, тем больше тратится ресурсов на его восстановление. Устройства центробежной очистки не требуют обслуживания.

3. Коэффициент гидравлического сопротивления [18, 19]

Коэффициент гидравлического сопротивления характеризует потери энергии (напора) потока жидкости при движении через элементы системы очистки. Чем выше коэффициент, тем больше потери давления на преодоление сопротивления - и тем больше энергозатраты на работу насоса для поддержания давления в системе очистки. Коэффициент сопротивления используется в гидравлических расчётах для определения падения давления и подбора мощности насосного оборудования.

Для оценки коэффициентов гидравлического сопротивления устройств механической очистки воды воспользуемся выражением Дарси-Вайсбаха [18, 19]:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot \vartheta^2}{2}. \quad (1)$$

где Δp – дифференциальное давление (потери напора на УО), определяется как $p_1 - p_2 = \Delta p$ (*Па*); p_1 и p_2 – давление на входе и выходе устройства очистки; ϑ – скорость потока жидкости ($^{\text{м}}/_{\text{с}}$); ρ – плотность жидкости ($^{\text{кг}}/_{\text{м}^3}$); ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Из выражения (1) определим коэффициент гидравлического сопротивления в общем виде:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta^2}. \quad (2)$$

а) *Определим коэффициент гидравлического сопротивления гидроциклонов*:

Коэффициент гидравлического сопротивления гидроциклонов вычислим из выражения (3):

$$\xi_{\text{гц}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta_{\text{вх}}^2}, \quad (3)$$

где $\vartheta_{\text{вх}}$ – скорость потока жидкости на входе гидроциклона.

Определим скорость потока жидкости и сечение патрубка на входе гидроциклона: $\vartheta_{\text{вх}} = \frac{Q}{S_{\text{вх}}}$, где Q – расход воды; $S_{\text{вх}}$ – сечение входного патрубка. $S_{\text{вх}} = (\frac{\pi \cdot d_{\text{вх}}^2}{4})$, где $d_{\text{вх}}$ – диаметр входного патрубка.

Для расчёта $\xi_{\text{гц}}$ необходимы технические параметры гидроциклона, которые предоставляются заводом изготовителем (Q, $d_{\text{вх}}$ и Δp). В технической литературе приводятся различные значения дифференциального давления Δp в гидроциклонах, основанные на экспериментальных данных или численных моделях. Значение дифференциального давления Δp зависит от геометрии (размера) гидроциклона, его назначения и технологической схемы, в зависимости от типа устройства Δp может изменяются в пределах от 30 до 500 кПа [18, 19].

б) *Определим коэффициент гидравлического сопротивления фильтров*:

Коэффициент гидравлического сопротивления фильтров вычислим из выражения (4):

$$\xi_{\text{ф}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta^2}, \quad (4)$$

где Δp – перепад давления на фильтре; ϑ – скорость потока жидкости.

Типовые потери давления на механических фильтрах грубой очистки (сетчатые и картриджные) изменяются от 1 до 10 кПа [18, 19].

г) *Определим коэффициент гидравлического сопротивления для инерционных УО на основе спирали Архимеда* [20, 21]:

Коэффициент гидравлического сопротивления фильтров вычислим из выражения (5):

$$\xi_{\text{спир}} = \frac{d_{\text{вх}}}{L} \cdot \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta^2}, \quad (5)$$

где Δp – дифференциальное давление на УО; $d_{\text{вх}}$ – внутренний диаметр основного канала УО; L – длина основного канала УО; ϑ – скорость потока жидкости в основном канале УО.

Методика расчёта коэффициента гидравлического сопротивления для устройств грубой механической очистки:

1. $S_{\text{вх}} = (\frac{\pi \cdot d_{\text{вх}}^2}{4})$;
2. $\vartheta_{\text{вх}} = \frac{Q}{S_{\text{вх}}}$;
3. $\xi_{\text{гц}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta_{\text{вх}}^2}$;
4. $\xi_{\text{ф}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta^2}$;
5. $\xi_{\text{спир}} = \frac{d}{L} \cdot \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \vartheta^2}$.

Плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1000\ {}^{\text{кг}}/_{\text{м}^3}$.

Для проведения расчётов $\xi_{\text{спир}}$ воспользуемся данными, полученными во время проведения экспериментальных исследований.

Проведение сравнительного анализа коэффициентов гидравлического сопротивления устройств очистки возможно при одинаковых входных параметрах. Зададим стандартные размеры диаметров входных патрубков устройств, наиболее часто используемых в трубопроводных системах водоподготовки и водоотведения. Наибольшее влияние на коэффициент гидравлического сопротивления оказывает режим течения жидкости, так как он прямо пропорционален входному диаметру устройства механической очистки и скорости течения жидкости, $Re = \frac{D_{\text{г}} \cdot \vartheta}{\nu}$. Расчёты проведем при одинаковом режиме течения жидкости, когда $Re \approx 30\,000$, все результаты вычислений занесём в таблицу 6.

Таблица 6 – Значение коэффициентов гидравлического сопротивления

№ п/п	$d_{\text{вх}}$, мм	Q, ${}^{\text{м}^3}/_{\text{с}}$	$S_{\text{вх}}$, м^2	$\vartheta_{\text{вх}}$, м/с	Re	$\xi_{\text{ф}}$	$\xi_{\text{гц}}$	$\xi_{\text{спир}}$
1.	12,7	0,000313	0,00013	2,41	30607	0,34	10,33	0,099
2.	25,4	0,000612	0,00051	1,2	30480	0,69	13,89	0,19
3.	38,1	0,00088	0,0011	0,8	30048	0,78	15,6	0,39
4.	50,8	0,00144	0,0024	0,6	30480	0,83	16,7	0,46

Итак, сравнительный анализ данных таблицы 6 свидетельствует о том, что:

– коэффициент гидравлического сопротивления устройств инерционной очистки [1, 2] соизмерим с коэффициентом гидравлического сопротивления фильтров;

– коэффициент у всех устройств грубой механической очистки с увеличением диаметра входного патрубка при неизменной величине числа Рейнольдса увеличивается коэффициент гидравлического сопротивления. Это вытекает из выражения Дарси-Вайсбаха (1) и связано со скоростью течения жидкости в устройствах механической очистки;

– коэффициент коэффициент гидравлического сопротивления инерционных УО имеет наименьшее значение среди сравниваемых устройств механической очистки;

– коэффициент гидроциклоны имеют максимальное значение коэффициента гидравлического сопротивления среди сравниваемых устройств механической очистки воды.

4. Экономические и массогабаритные показатели (ЭиМГП):

Массу, объём и стоимость фильтров и гидроциклонов получим из технических характеристик устройств механической очистки, которые предоставляют заводы производители на своих официальных сайтах, в интернет-магазинах и на маркетплейсах.

Сравнение возможно при одинаковых входных параметрах устройств. Общим параметром для всех устройств механической очистки является входной диаметр (диаметр входного патрубка) и расход. Обобщим полученную информацию о фильтрах и гидроциклонах, занесём её в таблицы 7, 8 и 9. В таблицах обозначим:

$m_{\text{ф}}$, $m_{\text{гц}}$, $m_{\text{сп}}$ – масса фильтров, гидроциклонов и инерционных УО;

$V_{\text{ф}}$, $V_{\text{гц}}$, $V_{\text{сп}}$ – объём фильтров, гидроциклонов и инерционных УО;

$C_{\text{ф}}$, $C_{\text{гц}}$, $C_{\text{сп}}$ – стоимость фильтров, гидроциклонов и инерционных УО;

$C_{\text{уд.}}$ – удельный экономический показатель, который отражает стоимость единицы пропускной способности устройства механической очистки. Помогает оценить эффективность использования ресурсов при выборе и эксплуатации устройств механической очистки.

Таблица 7 – Значение ЭиМГП фильтров

№ п/п	Наименование	Q, $м^3/ч$	$d_{\text{вх}}$, мм	$d_{\text{вх}}$, дм	$m_{\text{ф}}$, кг	$V_{\text{ф}}$, $м^3$	$C_{\text{ф}}$, руб.	$C_{\text{уд.}}$, $руб/м^3/ч$
1.	Фильтр Vaxt 1/2 [22]	0,9	12,7	$1/2$	0,8	0,0008	4 542	5 047
2.	Фильтр Наша Сталь ВВ20 1 [23]	4,5	25,4	1	2,1	0,0011	14 490	3 220
3.	Фильтр BWT Infinity HWS $1\,1/2$ (Германия) [24]	9	38,1	$1\,1/2$	7,25	0,008	80 000	8 889
4.	Фильтр BWT Infinity AP 2 (Германия) [25]	11	50,8	2	9	0,009	145 000	13 181

Таблица 8 – Значение ЭиМГП гидроциклонов

№ п/п	Наименование	Q, $м^3/ч$	$d_{\text{вх}}$, мм	$d_{\text{вх}}$, дм	$m_{\text{гц}}$, кг	$V_{\text{гц}}$, $м^3$	$C_{\text{гц}}$, руб.	$C_{\text{уд.}}$, $руб/м^3/ч$
1.	ПВО-ГЦТО-50 [26]	2–3,5	12,7	$1/2$	2	0,0051	16852	4815
2.	ПВО-ГЦ-1025 [27]	3,5–7,5	25,4	1	9	0,024	27708	3694
3.	ПВО-МПГЦ-10 [28]	8–12	38,1	$1\,1/2$	23,7	0,049	87272	7273
4.	ПВО-МПГЦ-18 [29]	14–18	50,8	2	44	0,15	162220	9012

В настоящее время разработано несколько конструкций инерционных УО. Заслуживают внимания для использования в системах водоподготовки механической очистки воды два типа устройств:

– разборные инерционные УО представляют собой параллелепипед со стороной α, состоящей из двух половин (нижней и верхней), в которых режущим инструментом изготовлена спираль Архимеда (рис. 1) [2];

– неразборные инерционные УО, представляют собой основной канал, навитый из трубы по траектории спирали Архимеда (рис. 2) [1].

Расчёт ЭиМГП разборных инерционных УО:

Для определения массы и объёма разборных инерционных УО воспользуемся программой расчёта геометрических размеров УО [30]. Определим объём заготовки устройства:

$$V_{\text{заг}} = H \cdot \left(D_{\text{уо}}\right)^2,$$

где H – высота УО; $D_{\text{уо}}$ – сторона основания разборного инерционного УО.

Выбор материала заготовки (трубы) для изготовления разборных (неразборных) инерционных УО остановим на алюминии. Расчёт массы инерционных УО проведём с учётом выбора материала заготовки (трубы).

Массу инерционного УО вычислим из выражения:

$$m_{\text{спир}} = V_{\text{спир}} \cdot \rho_{Al},$$

где ρ_{Al} – плотность алюминия, ρ_{Al} =2700 $^{\text{кг}}/_{\text{м}^3}$.

Объём инерционного УО определим, зная объём заготовки:

$$V_{\text{спир}} = V_{\text{заг}} - V_{\text{ок1}} - V_{\text{ок2}} - V_{\text{щ}},$$

где $V_{\text{ок1}}$ – объём основного канала УО; $V_{\text{ок2}}$ – объём отводного канала УО; $V_{\text{щ}}$ – объём щели.

$$V_{\text{ок1}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ок1}}^2}{4} \cdot L,$$

где $d_{\text{ок1}}$ – диаметр основного канала; L – длина основного канала УО.

$$V_{\text{ок2}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ок2}}^2}{4} \cdot l,$$

где $d_{\text{ок2}}$ – диаметр отводного канала; l – длина отводного канала УО. Длина отводного канала и длина цели равны.

$$V_{\text{щ}} = S_{\text{щ}} \cdot l,$$

где $S_{\text{щ}}$ – площадь щели; l – длина щели УО.

Для проведения вычислений МГП используем данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, полученные значения ЭиМГП запишем в таблицу 9.

Таблица 9 – Значение ЭиМГП разборных инерционных УО [2]

№ п/п	Наименование	Q, $^{\text{м}^3}/_{\text{ч}}$	$d_{\text{вх}}$, мм	$d_{\text{вх}}$, дм	$m_{\text{сп1}}$, кг	$V_{\text{сп1}}$, м^3	$C_{\text{сп1}}$, руб.	$C_{\text{уд.сп.1}}$, $^{\text{руб}}/_{\text{м}^3/\text{ч}}$
1.	ИУО-20 [1]	1,1	12,7	$^1/_2$	2,66	0,00098	11134	10122
2.	ИУО-30 [1]	3,24	25,4	1	6,42	0,0024	13548	4182
3.	ИУО-40 [1]	6,48	38,1	$1\,^1/_2$	18,54	0,0069	30395	4691
4.	ИУО-50 [1]	9,72	50,8	2	33,84	0,0125	40790	4196

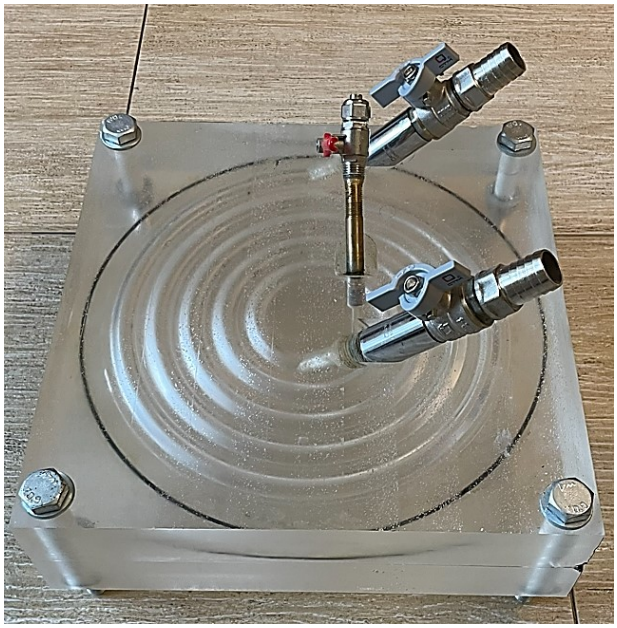


Рисунок 1 – Экспериментальное разборное инерционное УО [2]

Расчёт ЭиМГП неразборных инерционных УО [1]:
Определим объём трубы для заготовки устройства:

$$V_{\text{заг}} = S_{\text{т}} \cdot l,$$

где $S_{\text{т}}$– сечение трубы; l – длина трубы.

Массу УО вычислим из выражения:

$$m_{\text{спир}} = V_{\text{спир}} \cdot \rho_{Al},$$

где ρ_{Al} – плотность алюминия, ρ_{Al} =2700 $^{\text{кг}}/_{\text{м}^3}$.

Объём УО определим зная объём заготовки:

$$V_{\text{спир}} = V_{\text{заг}} - V_{\text{вн}},$$

где $V_{\text{вн}}$ – объём внутренней части трубы.

$$V_{\text{вн}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} \cdot l,$$

где $d_{\text{вн}}$ – диаметр внутренней части трубы.

Для проведения вычислений МГП используем данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, полученные значения ЭиМГП запишем в таблицу 10.

Таблица 10 – Значение ЭиМГП неразборных инерционных УО [1]

№ п/п	Наименование	Q, $^{\text{м}^3}/_{\text{ч}}$	$d_{\text{вх}}$, мм	$d_{\text{вх}}$, дм	$m_{\text{сп2}}$, кг	$V_{\text{сп2}}$, м^3	$C_{\text{сп2}}$, руб.	$C_{\text{уд.сп.2}}$, $^{\text{руб}}/_{\text{м}^3/\text{ч}}$
1.	ИУО-20 [2]	1,1	12,7	$^1/_2$	0,162	0,00006	3034	2758
2.	ИУО-30 [2]	3,24	25,4	1	0,54	0,0002	3745	1156
3.	ИУО-40 [2]	6,48	38,1	$1\,^1/_2$	1,35	0,0005	6000	925
4.	ИУО-50 [2]	9,72	50,8	2	3,51	0,0013	9950	1023



Рисунок 2 – Экспериментальное неразборное инерционное УО [1]

Для проведения сравнительного анализа ЭиМГП устройств грубой механической очистки воды обобщим результаты вычислений таблиц 7, 8, 9 и 10 и сгруппируем по однородным показателям – результаты запишем в таблицы 11 и 12.

Таблица 11 – МГП устройств механической очистки воды

№ п/п	$d_{вх}$, дм	$m_{ф}$, кг	$m_{гц}$, кг	$m_{сп1}$, кг	$m_{сп2}$, кг	$V_{ф}$, $м^3$	$V_{гц}$, $м^3$	$V_{сп1}$, $м^3$	$V_{сп2}$, $м^3$
1.	$1/2$	0,8	3,6	2,66	0,16	0,0008	0,0004	0,00098	0,00006
2.	1	2,1	12	6,42	0,54	0,0011	0,0016	0,0024	0,0002
3.	$1\,1/2$	7,25	18	18,54	1,35	0,008	0,036	0,0069	0,0005
4.	2	9	100	33,84	3,51	0,009	0,063	0,0125	0,0013

Таблица 12 – ЭП устройств механической очистки воды

№ п/п	$d_{вх}$, дм	$C_{ф}$, руб.	$C_{гц}$, руб.	$C_{сп1}$, руб.	$C_{сп2}$, руб.	$C_{уд.ф.}$, $руб/м^3/ч$	$C_{уд.гц.}$, $руб/м^3/ч$	$C_{уд.сп.1}$, $руб/м^3/ч$	$C_{уд.сп.2}$, $руб/м^3/ч$
1.	$1/2$	4542	17432	11134	3034	5047	4815	10122	2758
2.	1	14490	25987	13548	3745	3220	3694	4182	1156
3.	$1\,1/2$	80000	33358	30395	6000	8889	7273	4691	925
4.	2	145000	110232	40790	9950	13181	9012	4196	1023

Таким образом, анализ массогабаритных и экономических показателей (табл. 11, 12) выявил:

1. Рассматриваемые в исследовании устройства механической очистки имеют сопоставимую массу без резких перепадов и выбросов значений (табл. 11, 12). Между собой близки по своим значениям массы фильтров и неразборных инерционных УО, а также массы гидроциклонов и разборных инерционных УО.

2. Минимальным значением объёма обладают фильтры и неразборные инерционные УО. Самым большим объёмом обладают гидроциклоны.

3. Сравнительный анализ показал преимущество экспериментального неразборного инерционного УО по сравнению с другими устройствами механической очистки воды (фильтрами, гидроциклонами и разборными инерционными УО) по критериям массы, объёма, стоимости и удельного экономического показателя.

Многоступенчатые устройства очистки:

– *многоступенчатые системы очистки воды (система фильтров)*: вода проходит последовательно несколько ступеней фильтрации, каждая ступень очистки направлена на удаление определённого типа загрязнения. Количество ступеней фильтрации определяется кругом решаемых задач системы очистки, обычно ступеней от 3 до 5. Системы очистки воды могут оснащаться системой автоматики. Экономические и массогабаритные показатели многоступенчатых систем очистки воды представлены в таблице 13.

Таблица 13 – ЭиМГП многоступенчатых систем очистки воды (система фильтров)

№ п/п	Наименование	Q, $м^3/ч$	Число ступеней (ч.с.)	$d_{вх}$, *дм*	$m_ф$, кг	$V_ф$, $м^3$	$C_ф$, руб.	$C_{уд.}$, $руб/м^3/ч$
1.	Барьер Оникс ОСМО 100 [31]	0,06	5	$1/2$	5,7	0,018	16999	283317
2.	Наша Сталь Slim-line 10 [32]	0,65	3	1	7,5	0,028	42113	64789
3.	Наша Сталь Big blue 10 [33]	0,95	5	$1\,1/2$	12,5	0,067	72811	76643
4.	Max-filter 1465 [34]	3	5 (а)	2	40	0,66	105263	35083

– *коллекторные гидроциклоны*: для увеличения производительности очистки воды без потерь тонкости очистки, два и более небольших гидроциклона соединяют параллельно (в батарею) и объединяют общим коллектором. Крупный гидроциклон имеет большую производительность, но задерживает только крупные частицы, а маленькие гидроциклоны обладают тонкой очисткой, но небольшой производительностью. Коллекторные гидроциклоны решают обе эти проблемы. Экономические и массогабаритные показатели коллекторных гидроциклонов для очистки воды представлены в таблице 14, п. 1 и 2.

– *мультигидроциклоны*: решают такую же задачу, как и коллекторные гидроциклоны, состоят из множества мелких гидроциклонов, объединённых параллельно в одном корпусе. Экономические и массогабаритные показатели мультигидроциклонов для очистки воды представлены в таблице 14, п. 3 и 4.

Таблица 14 – ЭиМГП коллекторных и мультигидроциклонов для очистки воды

№ п/п	Наименование	Q, $м^3/ч$	Число ступеней (ч.с.)	$d_{вх}$, *дм*	$m_{гц}$, кг	$V_{гц}$, $м^3$	$C_{гц}$, руб.	$C_{уд.}$, $руб/м^3/ч$
1.	Коллекторный гидроциклон ПВО-ГКЦ-100-02 [35]	30–40	2	$3\,1/2$	89,2	0,84	191117	4778
2.	Коллекторный гидроциклон ПВО-ГКЦ-100-03 [36]	45–60	3	4	121,2	1,16	270686	4511
3.	Мультигидроциклон ПВО-МПГЦ-36[37]	30–40	18	$3\,1/2$	149	0,3	310162	7754
4.	Мультигидроциклон ПВО-МПГЦ-52 [38]	42–62	18	4	192	0,43	417870	6740

– *многоступенчатые разборные и неразборные инерционные УО* [39, 40]: одиночные устройства могут объединяться в механические (конструктивные) соединения или агрегатироваться для решения различных задач механической очистки воды (очистка воды от частиц разной дисперсной фазы, очистка воды от нефтепродуктов и т.д.). Количество ступеней очистки, рассматриваемые авторами при разработке многоступенчатых систем очистки в случае агрегатирования или соединения устройств – три, но количество ступеней может быть увеличено. Инерционные УО могут соединяться последовательно как фильтры, для повышения качества и тонкости очистки. Или соединяться параллельно как гидроциклоны для увеличения производительности очистки воды, а также при очистке многофазных дисперсных сред на основе воды могут использоваться комбинированные схемы соединения инерционных УО. Схемы соединения многоступенчатых инерционных УО представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Схемы соединения инерционных УО [39, 40]

№ п/п	Схемы соединения	Достоинства	Недостатки
1.	Последовательная	увеличивается тонкость и качество очистки	низкая производительность
2.	Параллельная	увеличивается производительность	низкая тонкость очистки
3.	Комбинированная	увеличивается производительность и качество очистки	увеличиваются ЭиМГП, за счёт увеличения количества ступеней очистки в 2 раза

Массогабаритные показатели инерционных УО при механическом соединении рассчитываются выражениями [41, 42, 43]:

– *масса инерционного УО*:

$$M_{\text{соед}} = k_m \cdot \sum M_i,$$

где $M_{\text{соед}}$ – масса инерционных УО, соединённых в конструкционную схему; k_m – коэффициент увеличения массы нового устройства при механическом соединении, учитывающий прирост массы при стыковке дополнительных одиночных УО (переходные соединительные трубопроводы, дополнительный крепёж, увеличение диаметра входных патрубков и т.д.); M_i – масса одиночного УО.

Значение коэффициента увеличения массы (k_m) находится в диапазоне от 1,1 до 1,45 [41, 42, 43].

объём инерционного УО:

$$V_{\text{соед}} = k_V \cdot \sum V_i,$$

где $V_{\text{соед}}$ – объём инерционного УО, соединённого в конструкционную схему; k_V – коэффициент увеличения объёма нового устройства при механическом соединении, учитывающий прирост объёма при стыковке дополнительных одиночных УО (наличие технологических зазоров для монтажа и обслуживания, не идеальная компоновка УО и т.д.); V_i – объём одиночного УО.

Значение коэффициента увеличения объёма (k_V) находится в диапазоне от 1,2 до 1,55 [41, 42, 43].

$$V_i = H_i \cdot D_{\text{уо}}^2,$$

где H_i – сумма всех высот одиночных инерционных УО; $D_{\text{уо}}$ – сторона основания инерционного УО.

$$H_i = \sum h_i,$$

где h_i – высота одиночных УО при механическом соединении.

Все результаты вычислений занесём в таблицу 16.

Таблица 16 – ЭиМГП многоступенчатых инерционных УО, соединённые механически

№ п/п	Наименование	Q, $м^3/ч$	Число ступеней (ч.с.)	$d_{\text{вх}}$, дм	$m_{\text{сп}}$, кг	$V_{\text{сп}}$, $м^3$	$C_{\text{сп}}$, руб.	$C_{\text{уд.}}$, $руб/м^3/ч$
1.	ИУО-20 [1, 2]	3	3	1	17,9	0,011	17700	5900
2.	ИУО-30 [1, 2]	10	3	2	109,6	0,073	69700	6970
3.	ИУО-40 [1, 2]	20	3	$2\,1/2$	193,1	0,13	111000	5550
4.	ИУО-50 [1, 2]	30	3	3	288,1	0,21	161100	5370
5.	ИУО-20 [1, 2]	1	6	2	176	0,12	127625	127625

Материал изготовления многоступенчатых агрегатированных инерционных УО – алюминий, плотность 2700 $^{м^3}/_{кг}$.

Таблица 17 – ЭиМГП многоступенчатых агрегатированных инерционных УО

№ п/п	Наименование	Q, $^{м^3}/_{ч}$	Число ступеней (ч.с.)	$d_{вх}$, *дм*	$m_{сп}$, кг	$V_{сп}$, $м^3$	$C_{сп}$, руб.	$C_{уд.}$, $руб/^{м^3}/_{ч}$
1.	ИУО-20 [1, 2]	3	3	1	28	0,011	27475	9158
2.	ИУО-30 [1, 2]	10	3	2	173,2	0,064	99450	9945
3.	ИУО-40 [1, 2]	20	3	$2\,^1/_2$	291	0,11	156850	7843
4.	ИУО-50 [1, 2]	30	3	3	452	0,17	257320	8577
5	ИУО-20 [1, 2]	1	6	2	242	0,098	166700	166700

Таблица 18 – ЭиМГП многоступенчатых неразборных инерционных УО

№ п/п	Наименование	Q, $^{м^3}/_{ч}$	Число ступеней (ч.с.)	$d_{вх}$, *дм*	$m_{сп}$, кг	$V_{сп}$, $м^3$	$C_{сп}$, руб.	$C_{уд.}$, $руб/^{м^3}/_{ч}$
1.	ИУО-20 [1, 2]	3	3	1	2,025	0,00081	2758	919,3
2.	ИУО-30 [1, 2]	10	3	2	13,2	0,0053	9950	995
3.	ИУО-40 [1, 2]	20	3	$2\,^1/_2$	30,4	0,065	10200	510
4.	ИУО-50 [1, 2]	30	3	3	35,4	0,093	10700	360
5	ИУО-20 [1, 2]	1	6	2	26,3	0,011	89550	3405

Обсуждение

Следовательно, проведённый анализ таблиц 13, 14, 15, 16, 17 и 18 показал, что:

1. Многоступенчатые системы очистки воды на фильтрах обладают очень большим удельным экономическим показателем, который отражает стоимость единицы пропускной способности устройств очистки (табл. 13). Но имеют, как правило, небольшую массу и производительность до 1 $^{м^3}/_{ч}$. Это объясняется тем, что в многоступенчатых системах очистки на фильтрах используется не один универсальный фильтр, а задача очистки решается комплексно, вода проходит через несколько фильтров, где каждый фильтр удаляет свой тип загрязнения. Увеличение фильтрующих элементов (ступеней) очистки, объединение их в систему приводит к увеличению стоимости и, как следствие, к снижению экономических показателей.

2. Коллекторные и мультигидроциклоны обладают большой массой и стоимостью, используются в системах очистки воды с производительностью более 30 $^{м^3}/_{ч}$. Несмотря на это, гидроциклоны для систем многоступенчатой очистки воды обладают на порядок меньшим удельным экономическим показателем (табл. 14) по сравнению с многоступенчатыми системами очистки на фильтрах.

3. Разборные и неразборные инерционные УО могут использоваться в многоступенчатых системах очистки, количество ступеней 3 и более. В зависимости от решаемых задач инерционных УО могут соединяться в различные схемы соединений (табл. 10). Разборные инерционные УО (рис. 1) в многоступенчатых системах очистки могут агрегатироваться или соединяться механически, а неразборные инерционные УО (рис. 2) из-за своих конструктивных особенностей могут соединяться только механически с использованием различных схем соединения одиночных устройств очистки.

4. Анализ таблиц 16, 17 и 18 показал, что агрегатированные инерционные УО имеют низкие ЭиМГП, по сравнению с инерционными УО, соединёнными механически в конструкционные схемы.

Заключение

Таким образом, проведённый сравнительный анализ инерционных УО относительно традиционных устройств механической очистки воды (фильтров и гидроциклонов) при разной производительности одиночных устройств, а также в составе многоступенчатых систем очистки показал, что, несмотря на отмеченные недостатки, разборные и неразборные инерционные УО по своим техническим характеристикам, экономическим и массогабаритным показателям соответствуют существующим центробежным устройствам механической очистки воды. А по качественному критерию оценки, способ обслуживания, инерционные УО – не нуждаются в обслуживании, коэффициент гидравлического сопротивления превосходит гидроциклоны на порядок. Следовательно, инерционные УО могут занимать промежуточную нишу между фильтрами и гидроциклонами, эффективно решая задачи очистки при определённых условиях.

Литература

1. Устройство для очистки жидкости / В.В. Терехов [и др.]. // Патент на полезную модель № 242865 от 15.04.2026 года.
2. Устройство для очистки горюче-смазочных материалов с прямолинейным одним входным и двумя выходными каналами / В.В. Терехов [и др.]. // Патент на полезную модель № 227821 от 07.08.2024 года.
3. ГОСТ Р 58810-2020 «Оборудование для подготовки воды внутри зданий. Механические фильтры».
4. ГОСТ Р 31952-2012 «Устройства водоочистные. Общие требования к эффективности и методы её определения».
5. URL : https://inner.su/articles/zasoryaetsya-filtr-tonkoy-ochistki-kak-vybrat-pravilnyy-kartridzh-dlya-vody (дата обращения 16.06.2026).
6. URL : https://aurusfilter.ru/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=22349442&utm_content=13080412055&utm_term=Фибос&roistat=direct2_search_13080412055_Фибос&roistat_referrer=none&roistat_pos=premium_1&etext=2202.JQelo8sRA8KqhOscS1WMo6xPuOUHzJx5svgQY6DSwuzwBjFurFySRyA8l6Wi40qEZnpxeG53dmVhenNyaHp2ZQ.9e261b15c47f45e534f40a292b4411036040f767&yclid=13235772203866783743 (дата обращения 16.06.2026).
7. URL : https://tech-intel.ru/?utm_term=ТехноИнтеллект&etext=2202.fycxCjiME_xNOz2fn9-9cjuKLpJu9fHThqpZabepzYW5kLCb15_UR589tDEsxY_8wYrXIB8J8eRJkOLy5okxGHp5Zm9ianZieG9jeXdxb3M.571796a781f2240d54f258381fe7a3111c4419fe&yclid=11900769285000658943 (дата обращения 16.06.2026).
8. URL : https://sfilter.ru/promyshlennye_filtry/?utm_source=yandex_sf&utm_medium= cpc&utm_campaign=83081403&utm_term=ooo%20нпц%20промводочистка%20нижний%20новгород.%7B13469756564%7D&utm_content=13469756564.35.Краснодар&etext=2202.J9VkWyTlQqsLjAq3FMUnE7rVn3LsbBzQm1PW2s-UmeNdutl6KAj5hClHF49e (дата обращения 16.06.2026).
9. URL : AarQhB4GZHrYYJHr9rbmC053APQjmX15rCJSOwaGUMR8s1HussOiHWWpbaK8SbJeNvdPcGVsd2F3bGhjbXF2enVjbQ.277f20f813d7080de4c257eb969705805b4a0c02&yclid=12587234581416771583 (дата обращения 16.06.2026).
10. Проектирование устройств механической очистки сточных вод : учебно-метод. пособие / О.П. Дружакина и [др.]. – Ижевск : Удмуртский государственный университет, 2024. – 110 с.
11. СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий (актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85*).
12. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения (актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*).
13. DuPont Water Solutions. FilmTec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual (Form № 45-D01504-en).
14. DuPont. Membrane System Design Guidelines for 8-inch FilmTec Elements (Form № 45-D01695-en).
15. Clack Corporation. WS1 & WS1.25 Programming Manual (V3115).
16. Кульский Л.А. Технология очистки природных вод. – 2-е изд. / Л.А. Кульский, П.П. Строкач. – Вища школа, 1986.
17. Фрог Б.Н. Водоподготовка / Б.Н. Фрог, А.Г. Первов. – М. : АСВ, 2014.
18. Stantec's Water Treatment: Principles and Design. – Updated 3rd ed. / J.C. Crittenden [et al.]. – Wiley, 2022.
19. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1992.

20. Копылов А.С. Водоподготовка в энергетике. – 3-е изд. / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – М. : МЭИ, 2022.
21. Иванов А.Н. Теплообменное оборудование промпредприятий : учеб. пособие / А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин; ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2016. – 184 с.
22. Дмитриев Е.А. Теплообменные аппараты химических производств : учеб. пособие / Е.А. Дмитриев, Е.П. Моргунова, Р.Б. Комляшёв. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. – 88 с.
23. URL : https://krasnodar.lemanapro.ru/product/filtr-mehanicheskoy-ochistki-vaxt-1-2-dlya-hvs-100-mkm-s-manometrom-82890089 (дата обращения 16.06.2026).
24. URL : https://наша-сталь.рф/filtr-ugilniy (дата обращения 16.06.2026).
25. URL : https://www.bwt.ru/product/id-264-10305-016-filtr-mekhanicheskoy-ochistki-vody-bwt-infinity-m-dr-s-reduktorom-davleniya-model_125596353 (дата обращения 16.06.2026).
26. URL : https://www.bwt.ru/product/id-264-infinity-ap-model_6125 (дата обращения 16.06.2026).
27. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-gcto-50-p (дата обращения 16.06.2026).
28. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-gc-1025 (дата обращения 16.06.2026).
29. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-mpgc-10 (дата обращения 16.06.2026).
30. URL : https://vodkit.ru/catalog/filtry-dlya-ochistki-vody/gidrociklony/multigidrociklon-pvo-mpgc-18 (дата обращения 16.06.2026).
31. Программа расчёта геометрических размеров и технологических параметров устройств очистки жидкости на основе спирали Архимеда с одним входным и двумя выходными каналами / В.В. Терехов [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025663234 от 27.05.2025 года.
32. URL : https://www.ozon.ru/product/filtr-dlya-vody-s-obratnym-osmosom-protochnyy-pod-moyku-barer-oniks-osmo-100-ochishchaet-vodu-do-3764345308/?at=w0tgjY8kJsgz9AL5FM Qx7mWIZ1WDwJHDmoDqlfzwXmMA&sh=zxeK8duxgA (дата обращения 16.06.2026).
33. URL : https://www.ozon.ru/product/trehstupenchatyy-filtr-ot-zheleza-zhestkosti-i-zapahov-nasha-stal-slim-line-10-3081911700/?at=57twJqj35cOEXJ7xTKxV3ZiJw2wpRCPZ xQnmh9xxvn8&sh=zxeK8cfHyA (дата обращения 16.06.2026).
34. URL : https://www.ozon.ru/product/filtr-dlya-vody-magistralnyy-mnogostupenchataya-ochistka-vody-ot-primesey-metallov-soley-3742457890/?at=VvtzJOwmNf7KYGGoUj5y9O 7hQn7RJxtvXRvv PsXWV7o5&sh=zxeK8ahjGg (дата обращения 16.06.2026).
35. URL : https://www.ozon.ru/product/avtomaticheskaya-sistema-ochistki-vody-dlya-doma-iz-skvazhiny-s-zasypkami-polnyy-komplekt-max-4378203350/?at=jYtZrp5DKt11MD3lC6EwgJEto7YR0N Hj3Bxzvfz8VELm&sh=zxeK8Xu1vA (дата обращения 16.06.2026).
36. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-kgc-100-02 (дата обращения 16.06.2026).
37. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-mpgc-36 (дата обращения 16.06.2026).
38. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-kgc-100-03 (дата обращения 16.06.2026).
39. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-gc-1090 (дата обращения 16.06.2026).
40. Терехов В.В. Применение агрегатирования в инерционных устройствах очистки жидкости на основе спирали Архимеда // Сборник научных статей XIV Международной научно-практической конференции молодых учёных, посвященной 63-й годовщине полёта Ю.А. Гагарина в космос. – Краснодар : Краснодарское ВВАУЛ, 2024. – С. 122–130.
41. Принципиальные гидравлические схемы агрегатируемых инерционных устройств очистки жидкости на основе спирали Архимеда / В.В. Терехов [и др.] // Сборник научных статей XIV Международной научно-практической конференции молодых учёных, посвященной 63-й годовщине полёта Ю.А. Гагарина в космос. – Краснодар : Краснодарское ВВАУЛ, 2024. – С. 174–180.
42. Семенов А.Н. Технологичность конструкции изделия машиностроения. – Рыбинск : РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2016. – 217 с.
43. Рудик Ф.Я. Основы конструирования оборудования пищевых производств» // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2018. – 53 с.
44. Скворцов В.Ф. Основы технологии машиностроения : учеб. пособие. –Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 350 с.

References

1. Device for liquid purification / V.V. Terekhov [et al.]. // Utility Model Patent № 242865, dated April 15, 2026.
2. Device for purifying fuels and lubricants, featuring a linear design with one inlet channel and two outlet channels / V.V. Terekhov [et al.]. // Utility Model Patent № 227821, dated August 7, 2024.
3. GOST R 58810-2020 «Equipment for water treatment within buildings. Mechanical filters».
4. GOST R 31952-2012 «Water treatment devices. General requirements for efficiency and methods for its determination».
5. URL : https://inner.su/articles/zasoryaetsya-filtr-tonkoy-ochistki-kak-vybrat-pravilnyy-kartridzh-dlya-vody (date of application 16.06.2026).
6. URL : https://aurusfilter.ru/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign= 22349442&utm_content=13080412055&utm_term=Фибос&roistat=direct2_search_13080412055_Фибос&roistat_referrer=none&roistat_pos=premium_1&etext=2202.JQelo8sRA8KqhOscS1WMo6xPuOUHzJx5svgQY6DSwuzwBjFurFySRyA8l6Wi40qEZnpxeG53dmVhenNyaHp2ZQ.9e261b15c47f45e534f40a292b4411036040f767&yclid=13235772203866783743 (date of application 16.06.2026).
7. URL : https://tech-intel.ru/?utm_term=ТехноИнтеллект&etext=2202.fycxCjiME_xNOz2fn9-9cjuKLpJu9fHThqpZabepzYW5kLCb15_UR589tDEsxY_8wYrXIB8J8eRJkOLy5okxGHp5Zm9ianZieG9jeXdxb3M.571796a781f2240d54f258381fe7a3111c4419fe&yclid=11900769285000658943 (date of application 16.06.2026).
8. URL : https://sfilter.ru/promyshlennye_filtry/?utm_source=yandex_sf&utm_medium=cpc&utm_campaign=83081403&utm_term=ооо%20нпц%20промводочистка%20нижний%20новгород.%7B13469756564%7D&utm_content=13469756564.35.Краснодар&etext=2202.J9VkWyTlQqsLjAq3FMUnE7rVn3LsbBzQm1PW2s-UmeNdutI6KAj5hClHF49e (date of application 16.06.2026).
9. URL : AarQhB4GZHrYYJHr9rbmC053APQjmX15rCJSOwaGUMR8s1HussOiHWWpbaK8SbJeNvdPcGVsd2F3bGhjbXF2enVjbQ.277f20f813d7080de4c257eb969705805b4a0c02&yclid=12587234581416771583 (date of application 16.06.2026).
10. Design of Mechanical Wastewater Treatment Devices: A Teaching and Methodological Manual / O.P. Druzhakina [et al.]. – Izhevsk : Udmurt State University, 2024. – 110 p.
11. SP 30.13330.2020. Internal Water Supply and Sewerage Systems for Buildings (updated version of SNiP 2.04.01-85*).
12. SP 31.13330.2021. Water Supply: External Networks and Facilities (updated version of SNiP 2.04.02-84*).
13. DuPont Water Solutions. FilmTec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual (Form № 45-D01504-en).
14. DuPont. Membrane System Design Guidelines for 8-inch FilmTec Elements (Form № 45-D01695-en).
15. Clack Corporation. WS1 & WS1.25 Programming Manual (V3115).
16. Kulsky L.A. Technology of Natural Water Purification. – 2nd ed. / L.A. Kulsky, P.P. Strokach. – Vyshcha Shkola, 1986.
17. Frog B.N. Water Treatment / B.N. Frog, A.G. Pervov. – M. : ASV, 2014.
18. Stantec's Water Treatment: Principles and Design. – Updated 3rd ed. / J.C. Crittenden [et al.]. – Wiley, 2022.
19. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. – 3rd ed. – M. : Mechanical Engineering, 1992.
20. Kopylov A.S. Water treatment in the energy sector. – 3rd ed. / A.S. Kopylov, V.M. Lavygin, V.F. Points. – M. : MPEI, 2022.
21. Ivanov A.N. Heat exchange equipment for industrial enterprises : textbook / A.N. Ivanov, V.N. Belousov, S.N. Currant; VShTE SPbGUPTD. – SPb., 2016. – 184 p.
22. Dmitriev E.A. Heat Exchangers in Chemical Production : textbook / E.A. Dmitriev, E.P. Morgunova, R.B. Komlyashev. – M. : D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2013. – 88 p.
23. URL : https://krasnodar.lemanapro.ru/product/filtr-mehanicheskoy-ochistki-vaxt-1-2-dlya-hvs-100-mkm-s-manometrom-82890089 (date of application 16.06.2026).
24. URL : https://наша-сталь.рф/filtr-ugilniy (date of application 16.06.2026).
25. URL : https://www.bwt.ru/product/id-264-10305-016-filtr-mekhanicheskoy-ochistki-vody-bwt-infinity-m-dr-s-reduktorom-davleniya-model_125596353 (date of application 16.06.2026).
26. URL : https://www.bwt.ru/product/id-264-infinity-ap-model_6125 (date of application 16.06.2026).
27. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-gcto-50-p (date of application 16.06.2026).
28. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-gc-1025 (date of application 16.06.2026).
29. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-mpgc-10 (date of application 16.06.2026).

30. URL : https://vodkit.ru/catalog/filtry-dlya-ochistki-vody/gidrociklony/multigidrociklon-pvo-mpgc-18 (date of application 16.06.2026).
31. Software for calculating the geometric dimensions and technological parameters of liquid purification devices based on an Archimedean spiral, featuring one inlet and two outlet channels / V.V. Terekhov [et al.] // Certificate of Computer Program Registration № 2025663234, dated May 27, 2025.
32. URL : https://www.ozon.ru/product/filtr-dlya-vody-s-obratnym-osmosom-protochnyy-pod-moyku-barer-oniks-osmo-100-ochishchaet-vodu-do-3764345308/?at=w0tgjY8kJsgz9AL5FMQx7mWIZ1WDwJHDmoDqlfzwXmMA&sh=zxeK8duxgA (date of application 16.06.2026).
33. URL : https://www.ozon.ru/product/trehstupenchatyy-filtr-ot-zheleza-zhestkosti-i-zapahov-nasha-stal-slim-line-10-3081911700/?at=57twJqj35cOEXJ7xTKxV3ZiJw2wpRCPZxQnmh9xxvn8&sh=zxeK8cfHyA (date of application 16.06.2026).
34. URL : https://www.ozon.ru/product/filtr-dlya-vody-magistralnyy-mnogostupenchataya-ochistka-vody-ot-primesey-metallov-soley-3742457890/?at=VvtzJOwmNf7KYGGoUj5y9O7hQn7RJxtvXRvv PsXWV7o5&sh=zxeK8ahjGg (date of application 16.06.2026).
35. URL : https://www.ozon.ru/product/avtomaticheskaya-sistema-ochistki-vody-dlya-doma-iz-skvazhiny-s-zasypkami-polnyy-komplekt-max-4378203350/?at=jYtZrp5DKt11MD3lC6EwgJEto7YR0NHj3BxzvfzVELm&sh=zxeK8Xu1vA (date of application 16.06.2026).
36. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-kgc-100-02 (date of application 16.06.2026).
37. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-mpgc-36 (date of application 16.06.2026).
38. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-kgc-100-03 (date of application 16.06.2026).
39. URL : https://prom-water.ru/catalog/vodopodgotovka/gidrociklony/pvo-gc-1090 (date of application 16.06.2026).
40. Terekhov V.V. Application of modular assembly in inertial fluid purification devices based on an Archimedean spiral // Collection of Scientific Articles of the XIV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, dedicated to the 63rd anniversary of Yu.A. Gagarin's space flight. – Krasnodar : Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (VVAUL), 2024. – P. 122–130.
41. Schematic hydraulic diagrams of modular inertial fluid purification devices based on an Archimedean spiral / V.V. Terekhov [et al.] // Collection of Scientific Articles of the XIV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, dedicated to the 63rd anniversary of Yu.A. Gagarin's space flight. – Krasnodar : Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (VVAUL), 2024. – P. 174–180.
42. Semenov A.N. Manufacturability of Engineering Product Designs. – Rybinsk : P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University (RGATU), 2016. – 217 p.
43. Rudik F.Ya. Fundamentals of Designing Equipment for Food Production Facilities. – Saratov : Saratov State Agrarian University, 2018. – 53 p.
44. Skvortsov V.F. Fundamentals of Mechanical Engineering Technology : textbook. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University Press, 2013. – 350 p.