

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ТОНКОСТЬ ОЧИСТКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФИЛЬТРА ГИДРОСИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

А. Б. Яковлев

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Статья посвящена исследованию влияния параметров потока рабочей жидкости (расхода, давления, скорости) на тонкость очистки центробежного фильтра гидросистемы энергетической установки. На основе составленной математической модели разработана методика расчета и получены зависимости, характеризующие процесс очистки, а именно предельного размера частиц загрязнителя, осаждающихся в очистителе от давления на входе в фильтр, расхода рабочей жидкости, тангенциальной и радиальной составляющих скорости жидкости.

Ключевые слова: вихревая камера, частицы загрязнителя, тонкость фильтрации, тангенциальное сопло, тангенциальная составляющая скорости, радиальная составляющая скорости.

Для цитирования: Яковлев А. Б. Исследование влияния параметров потока рабочей жидкости на тонкость очистки центробежного фильтра гидросистемы энергетической установки // Омский научный вестник. Сер. Авиацонно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 101–106. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-101-106. EDN: PEGBPY.



© Яковлев А. Б., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE WORKING FLUID FLOW PARAMETERS ON THE FINENESS OF CLEANING THE CENTRIFUGAL FILTER OF THE HYDRAULIC SYSTEM OF A POWER PLANT

A. B. Yakovlev

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article considers the influence of the parameters of the working fluid flow (flow rate, pressure, velocity) on the fineness of cleaning the centrifugal filter of the hydraulic system of a power plant. Based on the compiled mathematical model, the author develops a calculation method and obtains the dependences characterizing the purification process, namely, the limiting size of the pollutant particles deposited in the cleaner from the pressure at the filter inlet, the flow rate of the working fluid, the tangential and radial components of the fluid velocity.

Keywords: vortex chamber, pollutant particles, filtration fineness, tangential nozzle, tangential velocity component, radial velocity component.

For citation: Yakovlev A. B. Investigation of the effect of the working fluid flow parameters on the fineness of cleaning the centrifugal filter of the hydraulic system of a power plant. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 101–106. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-101-106. EDN: PEGBPY.



© Yakovlev A. B., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В настоящий момент в энергетических установках применяются различные рабочие жидкости, которые могут выступать в качестве рабочего тела в процессе преобразования энергии; охлаждающего компонента при выделении тепловой энергии; смазывающей среды для пар трения, удаляющей продукты износа и обеспечивающей необходимый срок эксплуатации установки; коррозионной защиты от окисления конструкционных материалов. Кроме перечисленного, рабочая жидкость может применяться для передачи управляющих сигналов в элементах гидроавтоматики и гасить действующие на установку ударные механические воздействия [1–3].

К рабочим жидкостям энергетических установок предъявляют ряд требований, из которых одним из важнейших является чистота, определяющая надежность и ресурс установок. Ее ненадлежащее качество может существенно увеличить износ элементов установок, снизить их срок эксплуатации или привести к частым неисправностям (отказам). Это, в свою очередь, может существенно увеличить затраты, связанные с эксплуатацией и ремонтом машин, вызвать простой оборудования или технологических процессов [2, 4].

Установлено, что наибольший абразивный износ пар трения вызывают твердые частицы размером, соизмеримым с величиной зазора этой пары [2, 5], а увеличение количества твердых частиц загрязнителя в полтора-два раза может уменьшить ресурс работы гидравлических устройств от четырех до восьми раз, приводя к простоям оборудования в 60–80 % случаев аварийных остановок [6, 7]. Требования к чистоте рабочей жидкости в настоящий момент устанавливаются для различных видов элементов гидросистем с использованием параметра «тонкость фильтрации» (наименьший размер частиц в мкм, задерживаемый фильтром, с определенной эффективностью) или с помощью класса чистоты, устанавливаемого, например, по ГОСТу 17216–2001 или ISO 4406 [1, 2, 4, 8].

Источниками твердых загрязнений рабочей жидкости могут выступать остатки производства, сборки и ремонта гидросистем; продукты износа элементов, узлов и механизмов установок; пыль и прочие вещества, попадающие в гидросистему из окружающей среды; продукты, возникающие в рабочей жидкости в процессе ее старения и деградации [1].

Основными методами удаления твердых частиц загрязнителя из рабочей жидкости являются [1]:

- механические (с помощью фильтрующих материалов);
- силовые (с использованием гравитационной, центробежной, магнитной и других сил).

Достаточно широкое распространение при очистке рабочей жидкости в энергетических установках вследствие обеспечения необходимого ресурса и производительности получили механические, гидродинамические (центробежные) фильтры и их комбинации. Для очистки больших объемов жидкости с минимальными потерями давления при относительной простоте конструкции, низкой потере давления, широком диапазоне производительности, эффективной самоочистке, невысокой стоимости конструкции и эксплуатации, безотказности работы и адаптивности применения на различных установках используют гидродинамические фильтры. Данные фильтры лучше удаляют неорга-

нический загрязнитель большей плотности, повышая тонкость фильтрации. Их можно использовать самостоятельно, а также еще более эффективно в комбинации с другими типами фильтров.

На сегодняшний день центробежные установки являются достаточно перспективными устройствами, также широко используемыми в других областях техники [9, 10]. Например, они применяются для очистки содержащихся в атмосферном воздухе твердых частиц, которые могут оказывать негативное влияние на работу систем наземного стартового комплекса ракет [11], авиационных поршневых и воздушно-реактивных двигателей, вспомогательных силовых установок и систем кондиционирования самолетов [12].

Постановка задачи

Критериями технической эффективности фильтра могут выступать [7, 13]:

- фильтрационные свойства (например, абсолютная тонкость фильтрации, т. е. минимальный размер в мкм частиц загрязнителя, задерживаемых с эффективностью 98,6 %, или коэффициент сепарации — отношение массового расхода частиц, удаляемых фильтровальным устройством, к массовому расходу частиц, поступающих на вход этого устройства);
- гидравлическое сопротивление фильтровального устройства, т. е. величина перепада давлений, требуемая для обеспечения необходимой производительности фильтра;
- ресурс или срок службы, т. е. суммарная наработка (календарная продолжительность) функционирования фильтроэлемента между его заменой, зависящая от секундного расхода протекающей через фильтр рабочей жидкости и максимально допустимого гидравлического сопротивления на нем.

В работах [7, 14] отмечены параметры, наиболее влияющие на процесс фильтрации: тангенциальная скорость или интенсивность закрутки потока; ско-

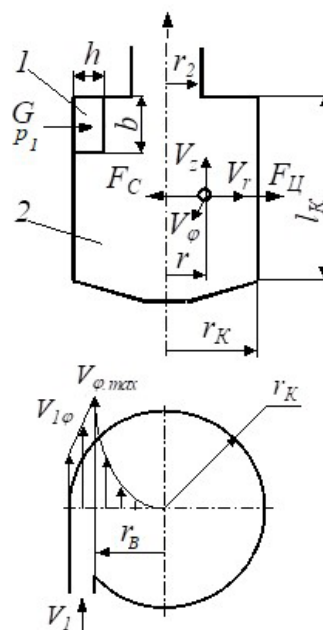


Рис. 1. Расчетная схема центробежного фильтра: 1 — сопло тангенциальное; 2 — вихревая камера

Fig. 1. Design scheme of the centrifugal filter: 1 — tangential nozzle; 2 — vortex chamber

рость потока жидкости (расход); плотность частиц загрязнителя.

Целью данной работы было исследование характеристик течения рабочей жидкости (давления на входе в центробежный фильтр, расхода, составляющих вектора скорости) на максимальный размер частиц загрязнителя, удаляемых центробежным фильтром.

Принципиальная схема центробежного фильтра описана в работе [15], расчетная схема представлена на рис. 1. Вход рабочей жидкости производится через тангенциальное прямоугольное сопло 1 прямоугольного сечения, расположенное в цилиндрической вихревой камере 2. Частицы загрязнителя отбрасываются центробежными силами к периферии вихревой камеры, опускаются по ее стенкам с последующим удалением. Выход очищенного потока жидкости осуществляется через осевой патрубок круглого сечения.

Основными геометрическими параметрами выбраны (рис. 1): r_k, l_k — радиус и длина вихревой камеры; r_2 — радиус выходного отверстия вихревой камеры; b, h — высота и ширина прямоугольного тангенциального входного сопла. Основные рабочие параметры: G, p_1 — массовый расход и давление рабочей жидкости на входе; V, V_ϕ, V_r, V_z — абсолютная скорость, тангенциальная, радиальная и осевая составляющие скорости жидкости (соответственно).

Теория

Модель центробежного фильтра построена на представлении процесса разделения частиц жидкости и загрязнителя, имеющего плотность большую, чем рабочая жидкость, за счет центробежной силы $F_{ц}$, преодолевающей силу сопротивления среды F_C (определяется по формуле Стокса [16]):

$$F_{ц} = (\rho_q - \rho_{ж}) \frac{\pi \cdot d^3}{6} \frac{V_\phi^2}{r};$$

$$F_C = 3\pi \cdot \mu \cdot d \cdot V_r,$$

где d и ρ_q — диаметр и плотность частицы загрязнителя; $\rho_{ж}$ — плотность рабочей жидкости; r — расстояние от продольной оси до частицы (текущий радиус); μ — динамическая вязкость рабочей жидкости.

Для установившегося движения частицы загрязнителя, осаждающейся на стенках вихревой камеры, можно выразить ее минимальный диаметр

$$d = \sqrt{\frac{18\mu V_r r}{(\rho_q - \rho_{ж}) V_\phi^2}}. \quad (1)$$

Принятые допущения — установившееся равномерное течение жидкости, тангенциальная и радиальная составляющие скорости частицы — равны соответствующим составляющим скорости жидкости.

Для определения по выражению (1) критического размера частиц загрязнителя, ниже которого осаждение на стенки не происходит, необходимо знать распределение тангенциальной и радиальной составляющих скорости жидкости, геометрические размеры вихревого очистителя. Распределение радиальной составляющей скорости по радиусу вихревой камеры очистителя можно определить, рассматривая уравнения установившегося осесимметричного течения вязкой жидкости [17].

Вихревое движение рабочей жидкости в фильтре (рис. 1) может быть разбито на две области, одна из них описывает изменение тангенциальной составляющей скорости уравнением $V_\phi/r = \text{const}$ (квазитвердый характер вращения), а другая — уравнением $V_\phi \cdot r = \text{const}$ (квазипотенциальное течение) [18, 19].

Радиус $r_{B'}$, соответствующий максимальной тангенциальной составляющей скорости и являющийся границей областей, определяется из условия равенства давления рабочей жидкости на поверхности вихря при $r = r_B$ внешнему давлению на выходе из вихревой камеры (рис. 1). Таким образом, на границе r_B радиальная составляющая скорости $V_r = 0$. Квазипотенциальное вращение существует при $r > r_{B'}$, при этом высоту тангенциального сопла h выбирают так, чтобы на всей его высоте течение жидкости было квазипотенциальным:

$$h = r_k - r_B \text{ или } r_B = r_k - h.$$

В итоге зависимость радиальной составляющей скорости рабочей жидкости от геометрических размеров центробежного фильтра и расположения частицы будет

$$V_r = \frac{G(r_B^2 - r^2)}{2\pi l_k r (\rho_q - \rho_{ж}) (r_k^2 - r_B^2)}. \quad (2)$$

Распределение тангенциальной скорости жидкости в области $0 \leq r \leq r_B$ (рис. 1) подчиняется параболическому закону квазитвердого вращения:

$$\frac{V_\phi}{V_{\phi, \max}} = \left(\frac{r}{r_B} \right)^2. \quad (3)$$

В области течения $r_B \leq r \leq r_k$ движение жидкости подчиняется уравнению квазипотенциального вращения:

$$\frac{V_\phi}{V_{\phi, \max}} = \frac{r_B}{r}. \quad (4)$$

Максимальное значение тангенциальной скорости жидкости в сопловом сечении в (3) и (4) определяется

$$V_{\phi, \max} = V_{1\phi} \left(\frac{h}{r_B} \right) / \ln \left(\frac{r_k}{r_B} \right), \quad (5)$$

где $V_{1\phi}$ — среднее значение тангенциальной скорости в сопловом сечении у стенки можно определить

$$V_{1\phi} = \sqrt{V_1^2 - V_{1z}^2}. \quad (6)$$

Здесь V_1, V_{1z} — абсолютная скорость и осевая составляющая скорости жидкости в сечении сопла, определяемые по следующим выражениям:

$$V_1 = \frac{G}{F_1 \Delta p}; \quad (7)$$

$$V_{1z} = \frac{G}{F_{1z} \Delta p}, \quad (8)$$

где F_1 — площадь тангенциального сопла на входе в центробежный фильтр, например, в соответствии с рис. 1 равна $F_1 = b \cdot h$; F_{1z} — площадь потока

жидкости за тангенциальным соплом нормальная осевой составляющей скорости, получаемая как $F_{1z} = \pi \cdot h(2r_k - h)$.

Для определения внутреннего радиуса камеры центробежного фильтра используем выражение

$$r_k = r_b \sqrt{\frac{k}{k-1} RT_2 \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{2}{V_{1\phi}^2} + 1}, \quad (9)$$

где T_2 , p_2 — температура и давление рабочей жидкости на выходе.

Результаты экспериментов

На основании выражений (1) – (9) по известным геометрическим размерам центробежного фильтра может быть составлена методика расчета газодинамических параметров потока рабочей жидкости. Задаваясь основными геометрическими размерами, расходом и давлениями рабочей жидкости на входе и выходе центробежного фильтра, плотностью загрязнителя, можно определить минимальный диаметр d частиц загрязнителя, осаждающийся на стенках.

Вследствие отличия скорости частицы от скорости жидкости величина d будет несколько заниженной. Варьируя параметрами рабочей жидкости,

можно получить оптимальные геометрические размеры вихревой камеры и сопла фильтра, позволяющие добиться минимального значения d .

По результатам расчета центробежного фильтра с параметрами, указанными в табл. 1, был получен минимальный размер твердых частиц загрязнителя, осаждающихся на стенках вихревой камеры фильтра, равный 16 мкм, что соответствует тонкости фильтрации фильтра тонкой очистки.

Проведение расчетного однофакторного эксперимента на основе полученной методики позволило получить зависимости минимального диаметра d частиц, осаждающихся на стенке вихревой камеры, от следующих величин: давления на входе в камеру очистителя (рис. 2а); расхода рабочей жидкости (рис. 2б); радиальной V_r (рис. 2в) и тангенциальной V_ϕ (рис. 2г), составляющих скорости рабочей жидкости.

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 2а и 2г, минимальный диаметр частиц, осаждающихся на стенках вихревой камеры фильтра (тонкость фильтрации), уменьшается с увеличением давления на входе и тангенциальной составляющей скорости рабочей жидкости. Это объясняется увеличением действия центробежной силы на частицы загрязнителя (интенсификацией процессов закрутки потока жидкости).

Таблица 1. Основные параметры центробежного фильтра
Table 1. Main parameters of the centrifugal filter

r_k , м	l_k , м	$\rho_{ж}$, кг/м ³	μ , Н·с/м ²	$\rho_{цп}$, кг/м ³	G , кг/с	p_1 , МПа
0,1	0,8	$1 \cdot 10^3$	0,022	$4 \cdot 10^3$	0,4	0,25

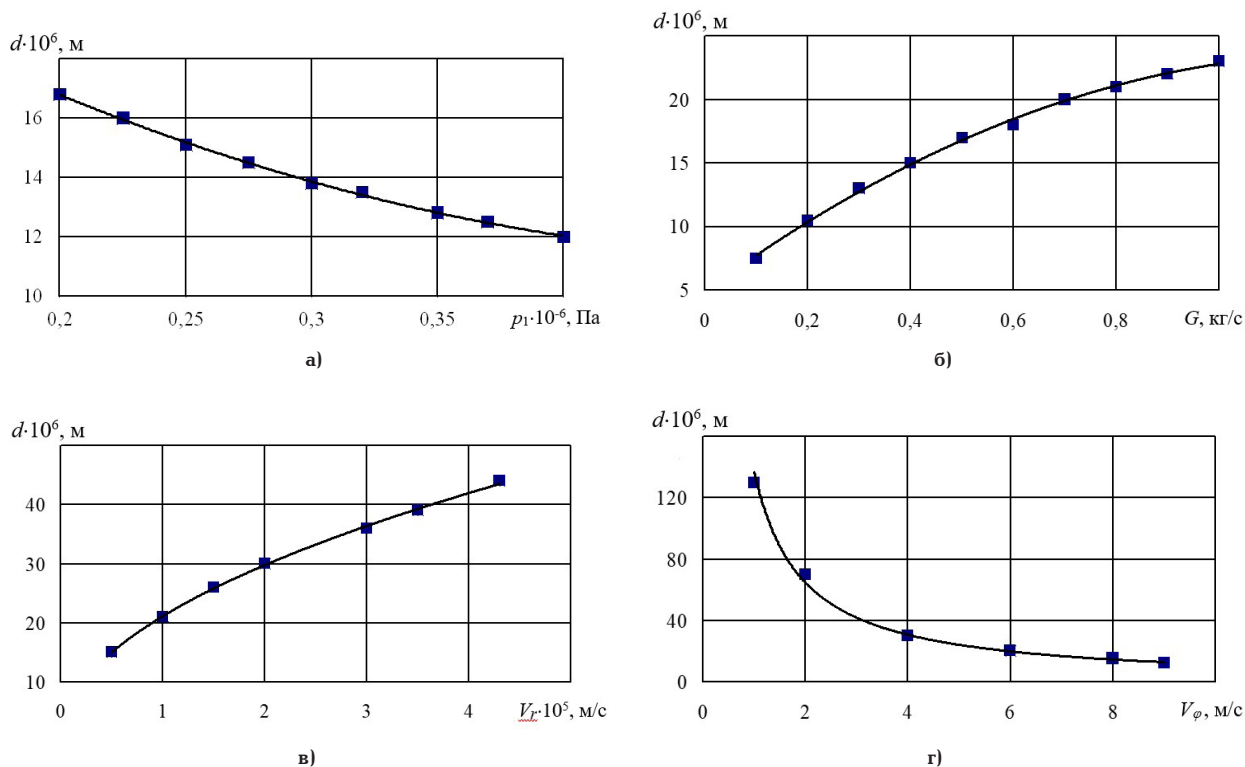


Рис. 2. Графики зависимостей минимального диаметра d осаждающихся частиц от величин:
а — давления на входе в камеру очистителя; б — расхода рабочей жидкости; в — радиальной составляющей скорости рабочей жидкости; г — тангенциальной составляющей скорости рабочей жидкости

Fig. 2. Graphs of the dependences of the minimum d diameter of the deposited particles by the following values: а — pressure at the inlet to the cleaner chamber; б — flow rate of the working fluid; в — radial component of the working fluid velocity; г — tangential component of the working fluid velocity

С увеличением расхода рабочей жидкости растет производительность центробежного фильтра, но при этом его эффективность (тонкость фильтрации) падает (рис. 2б). При этом возрастает и перепад давления жидкости на фильтре, т. е. увеличивается его гидравлическое сопротивление.

Выводы и заключение

Разработанная математическая модель и составленная методика расчета минимального диаметра частиц загрязнителя, осаждающихся на стенке вихревой камеры центробежного фильтра, позволяют определить оптимальные параметры для повышения тонкости фильтрации рабочей жидкости. Дальнейшее совершенствование модели может идти в сторону увеличения значимых для процесса очистки параметров.

Список источников / References

1. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. [и др.]. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник. Москва: Издательский дом «Альянс», 2010. 423 с. ISBN 978-5-903034-88-8.
2. Bashita T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. [et al.]. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow, 2010. 423 p. ISBN 978-5-903034-88-8. (In Russ.).
3. Бударова О. П., Болдырев А. В. Рабочие среды гидравлических и пневматических систем: учебник / под ред. И. Х. Исрафилова. Казань, 2019. 254 с. ISBN 978-5-00130-181-3.
4. Budarova O. P., Boldyrev A. V. *Rabochiye sredy gidravlicheskiykh i pnevmaticheskikh sistem* [Working conditions of hydraulic and pneumatic systems]. Ed. by I. H. Israfilov. Kazan, 2019. 254 p. ISBN 978-5-00130-181-3. (In Russ.).
5. Галдин Н. С. Основы гидравлики и гидропривода: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2006. 144 с. ISBN 5-93204-305-9. EDN: QMEZYN.
6. Galdin N. S. *Osnovy gidravliki i gidroprivoda* [Fundamentals of hydraulics and hydraulic drive]. Omsk, 2006. 144 p. ISBN 5-93204-305-9. EDN: QMEZYN. (In Russ.).
7. Плеханов Н. Г., Федоров В. С. Обоснование эффективности применения центрифуг для очистки гидравлических масел // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 4 (64). С. 15–21. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-4-15-21. EDN: DQSYKF.
8. Plekhanov N. G., Fedorov V. S. *Obosnovaniye effektivnosti primeneniya tsentrifug dlya ochistki gidravlicheskiykh masel* [Justification of the effectiveness of the use of centrifuges for cleaning hydraulic oils]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii. Systems. Methods. Technologies*. 2024. No. 4 (64). P. 15–21. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-4-15-21. EDN: DQSYKF. (In Russ.).
9. Зубкова С. Ю., Романов Р. А. Современные методы анализа масел и смазочных материалов // Химическая техника. 2018. № 9. С. 22–24. EDN: PJGWLL.
10. Zubkova S. Yu., Romanov R. A. *Sovremennyye metody analiza masel i smazochnykh materialov* [Modern methods for the oils and lubricants analysis]. *Khimicheskaya tekhnika. Chemical Engineering*. 2018. No. 9. P. 22–24. EDN: PJGWLL. (In Russ.).
11. Финкельштейн З. Л. Гидродинамическая очистка жидкостей в промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 4. С. 235–237. EDN: INTNPB.
12. Finkel'shtein Z. L. *Gidrodinamicheskaya ochistka zhidkostey v promyshlennosti* [Hydrodynamic purification of liquids in industry]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. Mining Information and Analytical Bulletin*. 2004. No. 4. P. 235–237. EDN: INTNPB. (In Russ.).
13. Литвинский Г. Г. Прямоточные центробежные гидродинамические фильтры с эжекционной рециркуляцией шлама // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института. 2022. № 28 (71). С. 121–135. EDN: JPGJVV.
14. Litvinsky G. G. *Pryamotochnyye tsentrobezhnyye gidrodinamicheskiye fil'try s ezheksionnoy retsirkulyatsiyey shlama* [Direct-flow centrifugal hydrodynamic filters with ejection sludge recirculation]. *Sbornik Nauchnykh Trudov Donbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Institute*. 2022. No. 28 (71). P. 121–135. EDN: JPGJVV. (In Russ.).
15. Барышев В. И. Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2005. № 1 (41). С. 149–161. EDN: KYSTNP.
16. Baryshev V. I. *Klassifikatsiya, kontrol' i normirovaniye promyshlennoy chistoty rabochikh zhidkostey i masel* [Classification, control and rationing of industrial purity of working fluids and oils]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. Bulletin of SUSU. Series "Mechanical Engineering Industry"*. 2005. No. 1 (41). P. 149–161. EDN: KYSTNP. (In Russ.).
17. Пиралишвили Ш. А., Гурьянов А. И., Веретенников С. В. [и др.]. Вихревые технологии в авиации и энергетике // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Казань, 08–10 августа 2018 г. Т. 1. Казань: Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева, 2018. С. 276–282. ISBN 978-5-7579-2321-5. EDN: YNBHYT.
18. Piralishvili Sh., Guryanov A., Veretennikov S. [et al.]. *Vikhrevyye tekhnologii v aviatsii i energetike* [Vortex technologies in aviation and energetics]. *Novyye tekhnologii, materialy i oborudovaniye rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli. New Technologies, Materials and Equipment of the Russian Aerospace Industry*. Kazan, 2018. Vol. 1. P. 276–282. EDN: YNBHYT. (In Russ.).
19. Яковлев А. Б. Закрученные потоки в промышленности // Омский научный вестник. 1999. № 6. С. 51–53. EDN: NSZPHS.
20. Yakovlev A. B. *Zakruchennyye potoki v promyshlennosti* [Swirling flows in industry]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 1999. No. 6. P. 51–53. EDN: NSZPHS. (In Russ.).
21. Яковлев А. Б. Разработка вихревых аппаратов осушки сжатого воздуха для систем наземного стартового комплекса // Омский научный вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. С. 111–116. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-111-116. EDN: KJXNUY.
22. Yakovlev A. B. *Razrabotka vikhrevykh apparatov osushki szhatogo vozdukha dlya sistem nazemnogo startovogo kompleksa* [Development of vortex compressed air drying devices for ground launch complex systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatсионно-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 111–116. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-111-116. EDN: KJXNUY. (In Russ.).
23. Вологодский Н. В., Проневич А. В., Яковлев А. Б. Экспериментальное исследование циклонных фильтров пневматической системы автоматического управления газотурбинного двигателя для увеличения степени очистки // Омский научный вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 101–109. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-101-109. EDN: YRZAUK.
24. Вологодский Н. В., Проневич А. В., Яковлев А. Б. Экспериментальное исследование циклонных фильтров пневматической системы автоматического управления газотурбинного двигателя для увеличения степени очистки [Experimental study of cyclone filters of pneumatic automatic control system of gas turbine engine for increasing degree of purification]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatсионно-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation Rocket and Power Engineering*. 2020.

Vol. 4, no. 3. P. 101–109. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-101-109. EDN: YRZAUK. (In Russ.).

13. Колмаков Е. А., Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 1 (113). С. 150–157. EDN: YJUWBD.

Kolmakov E. A., Kondrashov P. M., Zen'kov I. V. Obzor konstruktsey fil'trov v sostave pogruzhnykh elektrosentrobezhnykh nasosov pri dobyche nefi [Review of filter designs used in oil production by means of electric submersible pumps]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016. No. 1 (113). P. 150–157. EDN: YJUWBD. (In Russ.).

14. Девисилов В. А., Шарай Е. Ю., Агалакова Н. А. Изучение гидравлических характеристик течения жидкости в гидродинамическом фильтре с тангенциальной закруткой потока // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 2 (24). С. 32–37. EDN: REUXQJ.

Devisilov V. A., Sharay E. Yu., Agalakova N. A. Izucheniye gidravlicheskiy kharakteristik techeniya zhidkosti v gidrodinamicheskom fil'tre s tangentsial'noy zakrutkoy potoka [Investigation of the hydraulic characteristics of fluid flow in hydrodynamic filter with tangential flow swirling]. Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta. *Science Vector of Togliatti State University*. 2013. No. 2 (24). P. 32–37. EDN: REUXQJ. (In Russ.).

15. Яковлев А. Б. Влияние геометрических параметров центробежного фильтра на тонкость его очистки // Динамика систем, механизмов и машин. 2002. № 2. С. 43–45. EDN: VVNNNAV.

Yakovlev A. B. Vliyaniye geometricheskikh parametrov tsentrobezhnogo fil'tra na tonkost' ego ochestki [Influence of geometric parameters of a centrifugal filter on the fineness of its purification]. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2002. No. 2. P. 43–45. EDN: VVNNNAV. (In Russ.).

16. Смульский И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск, 1992. 301 с. ISBN 5-02-030300-3. EDN: PUHZYX.

Smulskiy I. I. Aerodinamika i protsessy v vikhrevykh kamerakh [Aerodynamics and processes in vortex chambers]. Novosibirsk, 1992. 301 p. ISBN 5-02-030300-3. EDN: PUHZYX. (In Russ.).

17. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Физическая и математическая модели рабочего процесса вихревой трубы: монография. Омск, 2018. 232 с. ISBN 978-5-8149-2671-5. EDN: EWJCVP.

Kuznetsov V. I., Makarov V. V. Fizicheskaya i matematicheskaya modeli rabochego protsessa vikhrevoy truby [Physical and mathematical models of the vortex tube workflow]. Omsk, 2018. 232 p. ISBN 978-5-8149-2671-5. EDN: EWJCVP. (In Russ.).

18. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с. ISBN 978-5-9221-1223-9. EDN: MUWSRZ.

Mitrofanova O. V. Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalah yaderno-energeticheskikh ustanovok [Hydrodynamics and heat exchange of swirling flows in channels of nuclear power plants]. Moscow, 2010. 288 p. ISBN 978-5-9221-1223-9. EDN: MUWSRZ. (In Russ.).

19. Vasilevsky M., Zyatikov P., Shishmina L. [et al.] Particles separation in a cyclone device cone. *EPJ Web of Conferences*. Vol. 82. Tomsk, 2015. P. 01049. DOI: 10.1051/epjconf/20158201049. EDN: UENNXL.

ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 8194-5800

AuthorID (РИНЦ): 488687

ORCID: 0000-0002-1987-2138

AuthorID (SCOPUS): 56503089200

ResearcherID: E-7451-2014

Адрес для переписки: yakovlev@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 18.07.2025; одобрена после рецензирования 08.08.2025; принята к публикации 18.08.2025.

YAKOVLEV Aleksey Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8194-5800

AuthorID (RSCI): 488687

ORCID: 0000-0002-1987-2138

AuthorID (SCOPUS): 56503089200

ResearcherID: E-7451-2014

Correspondence address: yakovlev@omgtu.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 18.07.2025; approved after reviewing 08.08.2025; accepted for publication 18.08.2025.