

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.339

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-132-141>

### Регенерация фильтровального материала гидродинамического фильтра

В.А. Девисиллов , Н.П. Фролов 

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва,

Российская Федерация

✉ [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

EDN: XTWYU

#### Аннотация

**Введение.** В промышленных системах фильтрации одной из ключевых проблем является снижение пропускной способности фильтра вследствие накопления улавливаемых частиц и образования слоя осадка на фильтровальной перегородке. Это ведёт к росту гидравлического сопротивления, увеличению энергопотребления и вынужденным остановкам на обслуживание. Повышение ресурса фильтрующих элементов без потери производительности остаётся актуальной технологической задачей, для решения которой применяются методы регенерации гидродинамических фильтров — в частности, вращение фильтровального элемента и наложение вибрационных воздействий. Однако существующие исследования рассматривают эти методы преимущественно изолированно: отсутствуют теоретические модели, описывающие совместное действие центробежных и вибрационных сил, не получены экспериментальные данные о синергетическом эффекте их комбинирования, а также не разработаны критерии оптимизации такого комбинированного воздействия с учётом режимных параметров и адгезионных свойств осадка. Целью работы являлась разработка расчётного метода оптимизации комбинированного центробежно-вибрационного воздействия на основе аналитического и экспериментального исследования его влияния на эффективность регенерации гидродинамических фильтров.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на экспериментальном стенде с гидродинамическим вибрационным фильтром, оснащённым цилиндрической фильтровальной перегородкой из комбинированного пористого сетчатого металла (тонкость очистки 10 мкм), которой независимо сообщались вращательное и вибрационное движения. Для описания условий отрыва частиц осадка была разработана аналитическая модель на основе баланса сил, действующих на частицу на вращающейся и вибрирующей поверхности. Она позволила оценить эффективность регенерации фильтра в зависимости от режимных параметров. Эксперименты проводились на водных суспензиях электрокорунда (200–250 мкм) и карбида кремния (60–80 мкм) объёмной концентрацией 0,1 %. Режим регенерации включал одновременное увеличение скорости вращения перегородки до 1000 об/мин и наложение вибрации с амплитудой 1 мм при варьируемой частоте 50, 60 и 70 Гц с перекрытием патрубка фильтрата для устранения удерживающего перепада давления.

**Результаты исследования.** Экспериментально установлены количественные зависимости эффективности регенерации от частоты вращения, амплитуды и частоты вибрации. Разработана аналитическая модель баланса сил, позволяющая прогнозировать степень очистки для произвольных сочетаний указанных параметров. Верификация модели показала, что расхождение расчётных и экспериментальных данных не превышает 15–20 %, что подтверждает её пригодность для инженерных расчётов. На базе модели предложен расчётный метод оптимизации, обеспечивающий выбор комбинации режимных параметров, при которой достигается требуемый уровень очистки при минимальных энергозатратах и допустимых механических нагрузках на конструкцию.

**Обсуждение.** Низкая эффективность чисто центробежной регенерации (2–20 %) объясняется тем, что для мелкодисперсных частиц отношение адгезионных сил к инерционным существенно выше, чем для крупных, что согласуется с классической теорией адгезии Дерягина. Синергетический эффект комбинированного воздействия обусловлен дополнением радиального центробежного усилия тангенциальными сдвиговыми напряжениями, генерируемыми вибрацией, что обеспечивает более полное разрушение адгезионных связей в слое осадка. Расхождение модели с экспериментом в пределах 15–20 % связано главным образом с неопределённостью в определении адгезионных характеристик пары «частица – фильтровальная перегородка», однако такая точность

© Девисиллов В.А., Фролов Н.П., 2026

является приемлемой для инженерного подбора режимных параметров. Полученные закономерности качественно согласуются с известными литературными данными о раздельном влиянии вращения и вибрации на удаление осадков, но впервые количественно описывают их совместное действие. Ограничением работы является валидация модели только для водных суспензий, что требует дополнительных исследований при переходе к вязким и неньютоновским средам.

**Заключение.** Экспериментально доказано, что комбинирование центробежного и вибрационного воздействий позволяет повысить эффективность регенерации фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра до 60–80 % по сравнению с 2–20 % при использовании только вращения. Разработана аналитическая модель на основе баланса сил, верифицированная экспериментально с погрешностью не более 20 %, пригодная для инженерного расчёта оптимальных режимов регенерации. Показано, что ключевым параметром, определяющим точность прогноза, являются адгезионные свойства частиц, требующие экспериментального определения для каждой конкретной системы. Результаты создают научную основу для проектирования самоочищающихся фильтровальных аппаратов непрерывного действия. Перспективным направлением является адаптация предложенной методики для реологически сложных промышленных сред и оптимизация энергопотребления вибросистемы.

**Ключевые слова:** фильтрование, регенерация, гидродинамический фильтр, центробежная очистка, вибрационная очистка

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

**Для цитирования.** Девисилов В.А., Фролов Н.П. Регенерация фильтровального материала гидродинамического фильтра. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(2):132–141. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-132-141>

*Original Empirical Research*

## Regeneration of Filter Material of Hydrodynamic Vibration Filter

Vladimir A. Devisilov , Nikita P. Frolov 

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

✉ [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

### Abstract

**Introduction.** In industrial filtration systems, one of the main challenges is reducing the filter capacity due to the accumulation of retained particles and the formation of sediment layer on the filter baffle. This results in increased hydraulic resistance, increased energy consumption, and forced service stops. Extending the lifespan of filter elements while maintaining productivity is a crucial technological challenge. This involves methods such as the regeneration of hydrodynamic filters, including the rotation of the filter element and the use of vibration effects. However, current research focuses on these methods individually, with no theoretical models for the combined effect of centrifugal and vibrational forces. Experimental data on the synergy between these forces has not been collected, and criteria for optimizing this combined effect have not been established considering operating parameters and the adhesive properties of sediment. The aim of this research was to develop a computational method for optimizing the combined centrifugal-vibration effect, based on an analytical and experimental study of its impact on the regeneration efficiency of hydrodynamic filters.

**Materials and Methods.** The research was conducted on a laboratory test bench with a hydrodynamic vibrating filter equipped with a cylindrical filter baffle made of a combined porous mesh metal (fineness of 10  $\mu\text{m}$ ), which could perform independent rotational and vibrational movements. To describe the condition for sediment particle detachment, an analytical model was developed based on the balance of forces acting on a particle on a rotating and vibrating surface. This allowed us to evaluate the effectiveness of filter regeneration based on operating parameters. The experiments were conducted using aqueous suspensions of electrocorundum (200–250  $\mu\text{m}$ ) and silicon carbide (60–80  $\mu\text{m}$ ) with a volume concentration of 0.1%. The regeneration mode involved a simultaneous increase in the rotational speed of the baffle to 1000 rpm and vibration with an amplitude of 1 mm at a variable frequency of 50, 60 and 70 Hz with the filtrate outlet closed to eliminate the change of pressure.

**Results.** Quantitative dependencies of the regeneration efficiency on rotational speed, vibration amplitude and frequency were experimentally determined. An analytical model of force balance was developed, which allowed predicting the degree of purification for any combination of these parameters. Verification of the model showed that the discrepancy between the calculated and experimental data did not exceed 15–20%, confirming its suitability for engineering calculations. Based on the model, a computational optimization method was proposed that provided a choice of a combination of operating parameters at which the required level of cleaning was achieved with minimal energy consumption and permissible mechanical loads on the structure.

**Discussion.** The low efficiency of purely centrifugal regeneration (2–20%) was explained by the fact that for fine particles, the ratio of adhesive forces to inertial forces was significantly higher than for coarse particles. This was consistent with the Derjaguin classical theory of adhesion. The synergistic effect of the combined effect was due to the addition of radial centrifugal force by tangential shear stresses generated by vibration, which ensured a more complete destruction of adhesive bonds in the sediment layer. The discrepancy between the model and the experiment in the range of 15–20% was mainly due to uncertainty in determining the adhesion characteristics of the particle – filter baffle pair. However, this level of accuracy was acceptable for the engineering selection of operating parameters. The obtained patterns were qualitatively consistent with the known literature data on the individual effects of rotation and vibration on sediment removal, but for the first time, they quantitatively describe their combined effect. One limitation of the study was the validation of the model for aqueous suspensions only, which required additional research to extend it to viscous and non-Newtonian media.

**Conclusion.** It has been experimentally proven that the combination of centrifugal and vibrational effects can increase the regeneration efficiency of the hydrodynamic filter baffle by 60–80%, compared to 2–20% with rotation alone. An analytical model has been developed based on the balance of forces, and verified experimentally with an error of no more than 20%. This model is suitable for engineering calculations of optimal regeneration modes. It is demonstrated that the key parameter determining the accuracy of the forecast is the adhesion properties of particles, which require experimental determination for each system. The results provide a scientific basis for designing continuous self-cleaning filtration devices. A promising direction for future research is the adaptation of this technique to rheologically complex industrial environments, as well as optimizing energy consumption in the vibration system.

**Keywords:** filtration, regeneration, hydrodynamic filter, centrifugal cleaning, vibration cleaning

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

**For Citation.** Devisilov VA, Frolov NP. Regeneration of Filter Material of Hydrodynamic Vibration Filter. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):132–141. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-132-141>

**Введение.** Очистка технологических жидкостей и сточных вод [1] от механических примесей методом фильтрования представляет собой обязательный и критически важный процесс в таких отраслях, как нефтехимия, энергетика и водоподготовка [2]. Результативность данного процесса напрямую определяет стабильность технологических циклов, срок службы оборудования, качество конечной продукции и соответствие экологическим нормативам [3]. Ключевой эксплуатационной проблемой в рассматриваемой области является интенсивное загрязнение фильтровального материала (фильтровальной перегородки) в ходе работы. Это приводит к резкому возрастанию гидравлического сопротивления, что, в свою очередь, вызывает значительное увеличение энергозатрат [4]. Помимо этого, активное зарастание перегородки осадком повышает риск её механического разрушения и ведёт к незапланированным остановкам производства для регенерации или замены фильтрующих элементов. Традиционные методы очистки, такие как обратная промывка, требуют прекращения работы фильтра или применения сложных систем с дублирующими линиями, что снижает общую производительность и увеличивает капитальные затраты [5].

В качестве перспективного решения указанной проблемы рассматривается использование фильтров с возможностью непрерывной или периодической регенерации без остановки основного процесса. Одним из таких типов аппаратов являются гидродинамические фильтры (ГДФ), в которых для снижения осаждения частиц на фильтровальной перегородке (ФП) комбинируется эффект центробежной сепарации и тангенциальная подача потока вдоль её поверхности [6]. В отличие от фильтрующих центрифуг, в ГДФ поток направляется снаружи внутрь вращающейся ФП, что усиливает действие центробежных сил на сформировавшийся слой осадка [7]. Самостоятельным направлением интенсификации регенерации фильтров служит вибрационное воздействие на фильтровальный элемент, способствующее разрушению адгезионных связей в слое загрязнений [8].

Анализ современных исследований свидетельствует о том, что влияние вращения ФП [7] и вибрационного воздействия [8] на процесс фильтрования изучалось, как правило, изолированно. Вместе с тем в научной литературе практически отсутствуют систематические исследования комбинированного влияния этих двух типов силовых полей на результативность регенерации гидродинамических фильтров. Кроме того, недостаточно разработаны универсальные расчётные методы, позволяющие количественно оценивать эффективность подобного комбинированного воздействия с учётом ключевых факторов, прежде всего адгезионных свойств улавливаемых частиц по отношению к материалу фильтровальной перегородки [9]. Таким образом, существует очевидный научно-практический пробел, обусловленный отсутствием методики для обоснованного выбора оптимальных режимов совместного центробежного и вибрационного воздействия, основанной на физической модели процесса отрыва частицы.

Целью настоящей работы является экспериментальное и аналитическое исследование синергетического эффекта от комбинированного центробежно-вибрационного воздействия на процесс регенерации фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра и разработка на этой основе верифицированной расчётной методики для оптимизации параметров регенерации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие последовательные задачи:

- анализ литературных данных по методам регенерации ФП и выявление пробела, касающегося комплексного воздействия силовых полей;
- разработка аналитической и расчётной моделей процесса отрыва частицы от ФП, основанных на балансе удерживающих (силы адгезии, сила давления потока) и отрывающих (центробежная сила, инерционная сила от вибрации) сил;
- экспериментальное исследование на специально созданном испытательном стенде отдельного и совместного влияния скорости вращения ФП, а также амплитуды и частоты вибрации на эффективность удаления осадка при фильтровании суспензий с частицами различной природы (электрокорунд, карбид кремния);
- верификация разработанной расчётной модели путём сопоставления аналитических оценок эффективности регенерации с полученными экспериментальными данными.

**Материалы и методы.** Исследования проводились на специально разработанном стенде с гидродинамическим вибрационным фильтром, схема которого представлена на рис. 1.

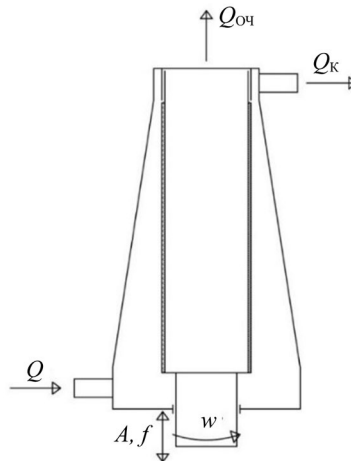


Рис. 1. Схема гидродинамического вибрационного фильтра ( $Q$  — расход исходной жидкости,  $Q_{оч}$  — расход очищенной жидкости,  $Q_k$  — расход концентрата,  $w$  — скорость вращения фильтровальной перегородки,  $A$  — амплитуда вибровоздействия,  $f$  — частота вибровоздействия)

Основная конструктивная особенность аппарата заключается в возможности независимого сообщения цилиндрической фильтровальной перегородке (ФП) вращательного движения от электродвигателя и возвратно-поступательного (вибрационного) движения от вибростенда. Основные геометрические параметры: высота корпуса — 186 мм, внешний диаметр ФП — 21 мм, толщина ФП — 1 мм. Более подробное описание принципа действия и компоновки приведено в работе [10].

Для анализа процесса регенерации применена модель, основанная на балансе сил, действующих на частицу в слое осадка на вибрирующей и вращающейся поверхности (рис. 2), по аналогии с подходами, изложенными в работах «Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок» [11] и «Эффективность регенерации щелевого фильтра» [12].

Условие отрыва частицы описывается неравенством:

$$\cos(\varphi) \left( (mg + F_{wv})^2 + (F_{wc})^2 \right) > (F_t)^2 + (F_n + F_{\Delta P})^2 \quad (1)$$

Разделив обе части на величину  $(mg)^2$ , характеризующую общий вес загрязнений на фильтровальной перегородке, получаем выражение для эффективности регенерации:

$$\eta < \left[ \frac{(mg + F_{wv})^2 + (F_{wc})^2}{(gm)^2} - \frac{(F_t)^2 + (F_n + F_{\Delta P})^2}{(gm)^2} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\eta$  характеризует эффективность регенерации. В случае, если  $\eta = 1$ , при регенерации все частицы удаляются с фильтрующего материала.

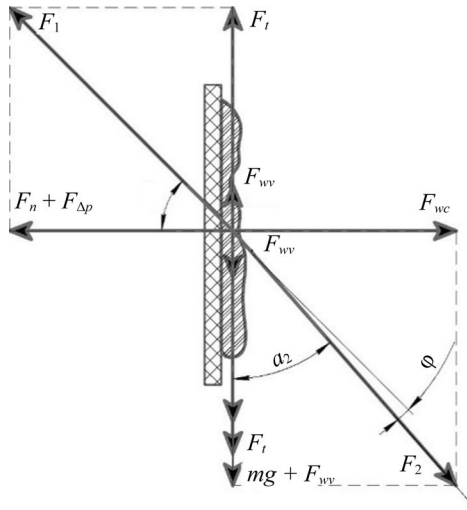


Рис. 2. Схема действия сил, где  $mg$ , Ньютон (далее – н) — вес слоя загрязнений ( $m$  – масса, кг;  $g$  – ускорение свободного падения  $m/c^2$ );  $F_n$ ,  $H$  и  $F_t$ , н – нормальная и тангенциальная составляющие силы адгезии,  $F_{vv}$ , н и  $F_{vc}$ , н – силы, возникающие в процессе регенерации из-за воздействия вибрации и вращения фильтровальной перегородки соответственно,  $F_{\Delta p}$ , н – сила перепада давления на перегородке

Силы  $F_{vc}$  и  $F_{vv}$  зависят от режима работы аппарата — скорости вращения и параметров вибрации [13] — и рассчитываются по формулам:

$$F_{vc} = mr \left( \frac{2\pi v}{60} \right)^2, \tag{3}$$

$$F_{vv} = mA(2\pi f)^2, \tag{4}$$

где  $r$  — радиус фильтровальной перегородки, м;  $v$  — скорость вращения фильтровальной перегородки, об/мин;  $A$  — амплитуда вибрации, м;  $f$  — частота вибрации, Гц [14].

Сила перепада давления, согласно теории фильтрации с образованием несжимаемого осадка будет равна [15]:

$$F_{\Delta p} = \Delta P S, \tag{5}$$

где  $\Delta P$  — перепад давления на перегородке, Па;  $S$  — площадь фильтровальной перегородки,  $m^2$ . Перепад давления в процессе работы и накопления осадка будет возрастать [16].

По теории Дерягина сила нормального отрыва выражается формулой:

$$F_n = 4\pi\sigma r, \tag{6}$$

$$F_t = \mu F_n, \tag{7}$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границах двух тел;  $r$  — радиус кривизны частиц,  $\mu$  — коэффициент трения.

В качестве механических примесей (дисперсной среды) использовались два типа частиц: электрокорунд и карбид кремния. В качестве очищаемой среды (дисперсионной среды) использовалась вода. Характеристики частиц приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики частиц загрязнения

Тип частицы	Коэффициент проницаемости слоя частиц, $m^2$	Плотность, $кг/м^3$	Диаметр частиц, $мкм$
Электрокорунд	$3,2 \cdot 10^{-14}$	3950	200–250
Карбид кремния	$4,2 \cdot 10^{-14}$	3200	60–80

В качестве фильтровальной перегородки применяли проницаемый материал, изготовленный по технологии, разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана, а именно методом горячей прокатки в вакууме на основе металлических сеток с толщиной очистки 10  $мкм$  — так называемых комбинированных пористых сетчатых металлов [17]. Характеристики фильтровальной перегородки определяли в соответствии с [18]. Проницаемость перегородки и слоя осадка [19] устанавливали экспериментально непосредственно на исследуемом аппарате. В качестве дисперсионной среды использовали воду комнатной температуры. Суспензию объёмной концентрацией 0,1 % приготавливали в ёмкости объёмом 300 л, оснащённой лопастной мешалкой для поддержания однородности состава.

Эксперимент осуществлялся следующим образом.

1. Подготовка суспензии. В баке, оснащенной электромешалкой, готовилась однородная водная суспензия с массовой концентрацией твердых частиц (загрязнений) 0,1 % по объему.

2. Цикл фильтрования (рабочий режим). Суспензия подавалась на вход фильтра. Фильтровальная перегородка вращалась с постоянной скоростью 300 об/мин. Процесс фильтрования продолжался в течение заданного времени или до достижения определенного перепада давления.

3. Инициация режима регенерации. По истечении времени фильтрования начиналась 30-секундная стадия регенерации, которая включала:

- перекрытие патрубка отвода очищенного фильтрата для устранения удерживающей силы, вызванной перепадом давления;

- одновременное увеличение скорости вращения фильтровальной перегородки до 1000 об/мин;

- одновременное включение вибрационного воздействия на перегородку с амплитудой 1 мм. При этом частота вибрации варьировалась от эксперимента к эксперименту, принимая значения 50, 60 или 70 Гц.

4. Удаление регенерированного осадка. В течение всей стадии регенерации жидкость направлялась в патрубок для отвода концентрата, увлекая тем самым отделенные от перегородки частицы.

5. Возврат в рабочий режим. По окончании 30 секунд режим регенерации отключался: вибрация прекращалась, скорость вращения перегородки снижалась до 300 об/мин, а патрубок фильтрата открывался. Аппарат возвращался к шагу 2 для следующего цикла фильтрования.

Для измерения расхода использовали магнитно-индукционный расходомер Dwyer MFS-11 с относительной погрешностью измерений  $\pm 2\%$  производства США. Для измерения перепада давления — датчики давления Nyadac HDA 4748-N-0009-000 (приведенная погрешность  $\pm 0,5\%$ ) производства Германии с регистратором данных HMG 3000. Контроль концентрации проводили с использованием анализаторов FCU 2000 и CS 2000 или фотонелиметра «Фотон-965» (Россия). В качестве привода использовали асинхронный электродвигатель (Россия) и вибростенд Tira Vib (Германия).

**Результаты исследования.** Результаты расчетных и экспериментальных исследований эффективности регенерации фильтровального материала при очистке жидкости от электрокорунда приведены на рис. 3.

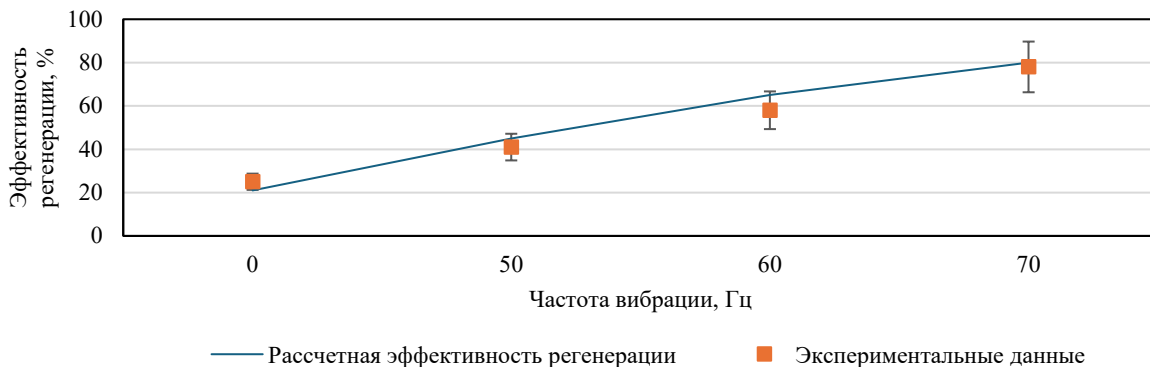


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные данные при регенерации фильтровальной перегородки после выполнения цикла фильтрации жидкости от электрокорунда

Результаты расчетных и экспериментальных исследований эффективности регенерации фильтровального материала при очистке жидкости от карбида кремния приведены на рис. 4.

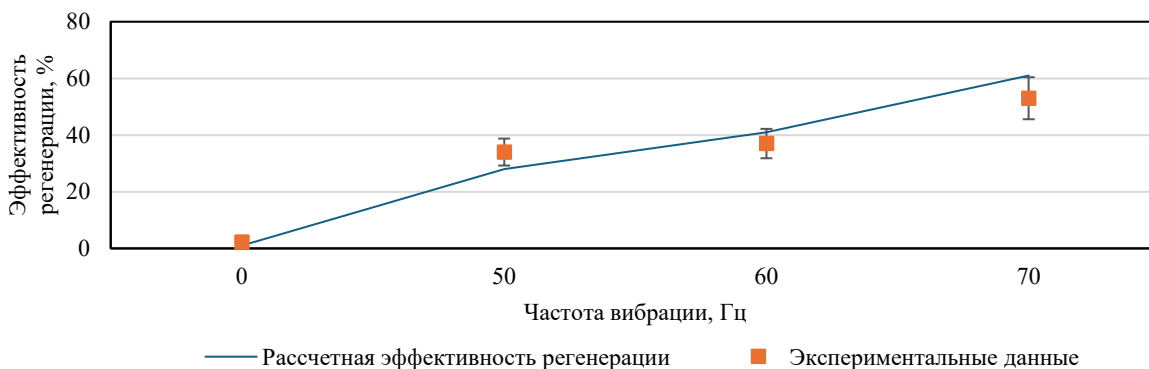


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные данные при регенерации фильтровальной перегородки после выполнения цикла фильтрации жидкости от карбида кремния

Результаты экспериментальной эффективности регенерации ( $\eta$ ), проведенной для двух типов загрязнений — крупнодисперсного электрокорунда и мелкодисперсного карбида кремния — представлены на рис. 3 и 4. Они показывают следующее:

– применение только центробежного воздействия (импульсный разгон ФП до 1000 об/мин) показывает низкую эффективность: для электрокорунда  $\eta \approx 20\%$ , а для карбида кремния — лишь около 2 %;

– комбинирование центробежного воздействия с вибрацией (амплитуда 1 мм, частота 70 Гц) приводит к синергетическому эффекту. Эффективность регенерации для электрокорунда возрастает до 80 %, а для карбида кремния — до 60 %.

На рис. 3 и 4 приведены также расчетные кривые, полученные по разработанной модели, основанной на балансе сил (1). Как для электрокорунда, так и для карбида кремния наблюдается удовлетворительное качественное и количественное соответствие модели экспериментальным точкам. Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями эффективности регенерации не превышает 15–20 %, что является приемлемой точностью для инженерных расчетов динамики процесса.

**Обсуждение.** Полученные результаты позволяют проанализировать физические механизмы, лежащие в основе процесса регенерации, и оценить границы применимости разработанной модели.

1. Анализ эффективности различных режимов регенерации. Существенное различие в эффективности центробежного воздействия для электрокорунда (20 %) и карбида кремния (2 %) полностью согласуется с теорией адгезии. Для более мелких частиц карбида кремния (60–80 мкм) отношение адгезионных сил к массе частицы (следовательно, и к инерционным силам) значительно выше, чем для крупных частиц электрокорунда (200–250 мкм). Таким образом, одного лишь центробежного усилия недостаточно для преодоления адгезионных связей мелкодисперсного осадка.

2. Природа синергетического эффекта. Достижение эффективности 60–80 % при комбинированном воздействии подтверждает гипотезу о различных и взаимно дополняющих механизмах разрушения слоя. Центробежная сила создаёт преимущественно радиальное отрывающее усилие. Вибрация, в свою очередь, индуцирует тангенциальные сдвиговые напряжения в толще осадка и снижает силу трения между частицами и поверхностью ФП за счёт микросмещений. Совместное действие указанных факторов обеспечивает более полное разрушение адгезионных связей.

3. Верификация расчётной модели. Расхождение между расчётными и экспериментальными данными в пределах 15–20 % свидетельствует об адекватности предложенного подхода, основанного на балансе сил. Основным источником погрешности, по всей видимости, связан со сложностью точного определения адгезионных сил ( $F_n$ ,  $F_t$ ) для конкретной пары «материал частицы — материал ФП». Достигнутая точность является удовлетворительной для инженерных расчётов, целью которых служит не абсолютный прогноз, а сравнительный анализ режимов и выбор оптимальных параметров.

4. Практическая значимость и ограничения. Результаты доказывают, что комбинированный метод позволяет увеличить ресурс ФП по сравнению с использованием только центробежного эффекта. Основное практическое ограничение — необходимость экспериментального определения адгезионных характеристик для новых типов загрязнений, поскольку их теоретический расчёт сопряжён со значительной неопределённостью. Помимо этого, модель была валидирована для водных суспензий; её применение к вязким или неньютоновским жидкостям требует дополнительных исследований с учётом изменения гидродинамических и адгезионных условий.

**Заключение.** В ходе проведенного исследования достигнута поставленная цель: экспериментально и теоретически обоснована эффективность комбинированного центробежно-вибрационного метода регенерации фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра. Сформулированы следующие основные выводы:

1. Установлено, что раздельное применение центробежного воздействия (скорость вращения до 1000 об/мин) характеризуется низкой эффективностью регенерации (2–20 %), особенно для мелкодисперсных частиц с высокой удельной адгезией.

2. Доказан возрастающий эффект от комбинирования вращения ФП с вибрационным воздействием (амплитуда 1 мм, частота 70 Гц), что позволяет повысить эффективность регенерации до 60 % для карбида кремния и до 80 % для электрокорунда.

3. Разработана и экспериментально верифицирована расчетная модель, основанная на балансе удерживающих и отрывающих сил. Модель позволяет с приемлемой для инженерной практики точностью (погрешность  $\leq 20\%$ ) прогнозировать эффективность регенерации и подбирать оптимальные параметры (скорость вращения, частота и амплитуда вибрации) в зависимости от дисперсного состава и природы загрязнений.

4. Критически важным для точности модели является учет адгезионных свойств частиц, что определяет необходимость их экспериментального определения для конкретных условий фильтрации.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются адаптация методики для реологически сложных сред (нефтепродукты, пульпы), а также минимизация энергопотребления системы вибровозбуждения. Запланировано проведение дополнительных испытаний разработанного гидродинамического вибрационного фильтра [20] в условиях, моделирующих реальные промышленные процессы. Полученные результаты создают основу для разработки высокоэффективных фильтровальных систем для химической, нефтехимической и водоочистной отраслей.

#### Список литературы / References

1. Ксенофонов Б.С., Ширниех А.А. Разработка методики расчета комбифильтра. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>
1. Ksenofontov BS, Shirniekh AA. Development of a Calculation Method for a Combined Filter. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>
2. Ильющенко А.Ф., Черняк И.Н., Жегздринь Д.И., Илюкевич А.И., Кусин А.Р., Кусин Р.А. и др. Регенерация порошковых фильтрующих элементов в процессе фильтрации водной суспензии гидрогумата торфа. В: *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: Материалы международной научно-практической конференция «Белагро-2018»*. Минск: БГАТУ, 2018. С. 168–172. URL: <http://rep.bsatu.by/bitstream/doc/4523/1/Regeneraciya-poroshkovyh-filtruyushchih-ehlementov.pdf> (дата обращения 13.04.2026).
2. Ilyushchenko AF, Chernyak IN, Zhegzdrin' DI, Ilyukevich A.I., Kusin A.R., Kusin R.A et al. Regeneration of Powder Filter Elements during Filtration of Aqueous Suspension of Peat Hydrohumate. In: – *Modern Problems of Mastering New Equipment, Technologies, and Organization of Technical Services in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Belagro-2018”*. Minsk: BSATU, 2018. P. 168–172. (In Russ.) <http://rep.bsatu.by/bitstream/doc/4523/1/Regeneraciya-poroshkovyh-filtruyushchih-ehlementov.pdf> (accessed: 13.04.2026)
3. Камалетдинов Р.С., Лазарев А.Б. Обзор существующих методов борьбы с мехпримесями. *Инженерная практика*. 2010;2:6–13.
3. Kamaletdinov RS, Lazarev AB. An Overview of Existing Methods of Combating Mechanical Impurities. *Engineering Practice*. 2010;2:6–13. (In Russ.)
4. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Эффективность сепарации взвешенных примесей вращающимся фильтроэлементом. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. 2011;10:3–9.
4. Mochalin EV, Mochalina IG. Efficiency of Separating Suspended Impurities with a Rotating Filter Element. *Vestnik National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. 2011;10:3–9. (In Russ.)
5. Бревнов А.А. Совершенствование гидродинамических фильтров за счет закрутки потока в кольцевой области снаружи фильтроэлемента: дис. ... канд. полит. наук. Сумы, Сумской государственный университет, 2009. 165 с.
5. Brevnov AA. *Improvement of Hydrodynamic Filters by Swirling the Flow in the Annular Region outside the Filter Element*. Cand. Sci. (Polit.), diss. Sumy, Sumy State University, 2009. 165 p. (In Russ.)
6. Frolov NP, Devisilov VA. Investigation of the Pressure Drop on the Filtration and Protective Baffles of a Hydrodynamic Vibration Filter Using ANSYS CFX. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;815:012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012008>
7. Белоков А.А. Фильтр с непрерывной регенерацией. Патент RU 2 651 210, B01D 46/00, 2006 г.
7. Belukov AA. *Filter with Continuous Regeneration*. RF Patent 2 651 210, B01D 46/00. 2006. (In Russ.)
8. Konstantinos Hatzikostanitis. *Using High Frequency Vibration for Operational Improvement of Membrane Filtration Process*. Patent, WO2015198080A1, 2015.
9. Фетисова Е.Г., Голованчиков А.Б., Милова Д.А. Перспективные конструкции фильтрующих центрифуг для псевдопластических жидкостей. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2010; 3(1):86–88. URL: <https://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/9/2010-01.pdf> (дата обращения 13.04.2026).
9. Fetisova EG, Golovanchikov AB, Milova DA. The Centrifugal Dryer Long-Range Design for Pseudoplastic Fluids. *Izvestia VSTU*. 2010;3(1):86–88. (In Russ.) URL: <https://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/9/2010-01.pdf> (accessed: 13.04.2026).
10. Девисилов В.А., Мягков И.А., Шарай Е.Ю. Исследование гидродинамического вибрационного фильтрования и разработка конструкции фильтра. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012;14(1-3):866–876. URL: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_1\\_866\\_876.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_866_876.pdf) (дата обращения 13.04.2026)
10. Devisilov VA, Myagkov IA, Sharay EYu. Investigation of Hydrodynamic Vibrational Filtering and Development of Construction of a Filter. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1–3):866–876. (In Russ.) URL: [http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012\\_1\\_866\\_876.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2012/2012_1_866_876.pdf) (accessed: 13.04.2026)

11. Панов Ю., Белых О.Н., Зинковский А.В., Момотов В.С. Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок. *Вестник ВГУИТ*. 2015;1:175–179.

Panov SY, Belyh ON, Zinkovskii AV, Momotov VS. Features of the Regeneration Process of the Filter. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015;1:175–179. (In Russ.)

12. Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Эффективность регенерации целевого фильтра. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015;8(1):99–105.

Zykova YA, Samokhvalov NM, Vinogradov VV. Slotted Filter Regeneration Efficiency. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2015;8(1):99–105. (In Russ.)

13. Xiao Hu, Xinyu Li, Sanchuan Yu, Peifeng Lin, Zuchao Zhu. Hydrodynamic Effects of the Flow-Induced Vibrations on the Mass Transfer and Permeate Flux in a Desalination Membrane. *Desalination*. 2023;564:116710. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116710>

14. Фролов Н.П. Применение вибрации для регенерации фильтровального материала. *Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции, Кемерово, 21–23 ноября 2023 года*. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 306-1–306-7.

Frolov NP. The Use of Vibration to Regenerate Filter Material. In: *Life Safety of Enterprises in Industrially Developed Regions: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, 21–23 November, 2023*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2023. P. 306-1–306-7. (In Russ.)

15. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. Издательство «Химия», М., 1971 г. 440 с. URL: <https://djuv.online/file/ouPBj3waRovON?ysclid=mnx4lh5goh883436464> (дата обращения 13.04.2026)

Zhuzhikov VA. *Filtering. Theory and Practice of Suspension Separation*. Moscow: Khimiya Publishing House; 1971. 440 p. (In Russ.) URL: <https://djuv.online/file/ouPBj3waRovON?ysclid=mnx4lh5goh883436464> (accessed: 13.04.2026)

16. Девисилов В.А., Фролов Н.П. Использование вибрации для интенсификации очистки проницаемой перегородки гидродинамического фильтра. *Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2023: Сборник трудов девятого международного экологического конгресса (одинадцатой международной научно-технической конференции), Самара – Тольятти, 20–24 сентября 2023 года*. Самара–Тольятти: Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 2023. С. 127–136.

Devisilov VA, Frolov NP. Theoretical Approaches to Calculating the Required Vibration Intensity for Regeneration of the Filter Baffle. In: *Proceedings of the Ninth International Environmental Congress (Eleventh International Scientific Technical Conference) Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes ELPIT 2023, Samara–Togliatti, September 20–24, 2023*. Samara–Tolyatti: Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; 2023. P. 127–136. (In Russ.)

17. Девисилов В.А., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Комбинированные пористые сетчатые металлы и изделия из них. *Безопасность в техносфере*. 2020;9(2):43–48. <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-43-48>

Devisilov VA, Novikov YuM, Bolshakov VA. Combined Porous Mesh Metals and Products Made from Them. *Safety in Technosphere*. 2020;9(2):43–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-43-48>

18. Девисилов В.А., Фролов Н.П. Моделирование сепарации механических частиц в гидродинамическом фильтре при очистке воды. *Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии*. 2024;1:88–98.

Devisilov VA., Frolov NP, Simulation of Separation of Mechanical Particles in a Hydrodynamic Filter. *The Legacy of V.I. Vernadsky and Modern Problems of Ecology*. 2024;1:88–98. (In Russ.)

19. Сираев Р.Р. Фильтрация жидкости в пористой среде Форштеймера с пространственно неоднородными пористостью и проницаемостью. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2019;12(3):281–292.

Siraev RR. Fluid Transport in Forchheimer Porous Medium with Spatially Varying Porosity and Permeability. *Computational Continuum Mechanics*. 2019;12(3):281–292. (In Russ.)

20. Девисилов В.А., Мягков И.А., Шарай Е.Ю. Патент на полезную модель № 150506 УИ «Фильтр гидродинамический вибрационный». Патент РФ, № 2014131794/05. 2015.

Devisilov VA, Myagkov IA, Sharai EYu. *Utility Model Patent No. 150506 U1 “Hydrodynamic Vibration Filter”*. RF Patent, No. 2014131794/05. 2015. (In Russ.)

#### Об авторах:

**Владимир Аркадьевич Девисилов**, к.т.н., доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

**Никита Платонович Фролов**, аспирант кафедры «Экология и промышленная безопасность» Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1) [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [Researcher ID](#)

***Заявленный вклад соавторов:***

**В.А. Девисилов:** Разработка концепции; проведение исследования; разработка методологии; научное руководство; написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

**Н.П. Фролов:** Разработка концепции; проведение исследования; разработка методологии; написание черновика рукописи.

***Конфликт интересов:*** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.***

***About the Authors:***

**Vladimir A. Devisilov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya St., building 1, Moscow, 105005, Russian Federation) [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

**Nikita P. Frolov**, Postgraduate Student of the Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya St., building 1, Moscow, 105005, Russian Federation) [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [Researcher ID](#)

***Claimed Contributorship:***

**VA Devisilov:** conceptualization, investigation, methodology, supervision, writing – review & editing.

**NP Frolov:** conceptualization, investigation, methodology, writing – original draft preparation.

***Conflict of Interest Statement:*** the authors declare no conflict of interest.

***All authors have read and approved the final version of manuscript.***

**Поступила в редакцию / Received** 12.02.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 15.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 21.03.2026