

УДК 628.339

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРАЦИИ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Н.П. Фролов, аспирант группы Э9-51А, 3 курс

Научный руководитель: В.А. Девисилов к.т.н., доцент

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

В статье рассмотрена аналитическая модель процесса регенерации проницаемой перегородки гидродинамического фильтра, которая позволяет оценить параметры вибрации, необходимые для эффективной регенерации фильтровальной перегородки. В работе предлагается учитывать силы адгезии между поверхностью перегородки и улавливаемыми частицами, формирующими на ней слой загрязнений и силы отрыва, возникающие под действием вибрации и вращения. В модели используется теоретические подходы в оценке сил адгезии, предложенные отечественным ученым Б.В. Дерягиным.

Ключевые слова: адгезия, регенерация, гидродинамический фильтр, вибрация, фильтровальный материал.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ АДГЕЗИИ

Основным фактором образования осадка на фильтровальной перегородке в процессе работы фильтра является адгезионное взаимодействие частиц загрязнений с поверхностью фильтровального материала. Внимание теме адгезионных взаимодействий возникло во второй половине XX века.

Первая попытка описать адгезионное взаимодействие вылилась в создание в 1971 г. модели ДКР по первым буквам фамилий авторов (Джонсон, Кендал, Робертс) [1]. В данной модели рассматривается задача для двух упругих сфер без трения с учетом изменения поверхностной энергии при вступлении тел в контакт. В решении этой задачи получились нулевые напряжения вне области контакта и растягивающие внутри области.

В 1975 г. нашим соотечественником Дерягиным Б.В.[2] была предложена теория адгезии для двух упругих тел, так называемая теория ДМТ (Дерягин, Муллер, Топоров). Данная теория учитывала растягивающие напряжения вне области контакта, но предполагалось, что они не влияют на напряжения внутри контакта.

Позже [3] было показано, что данные теории могут адекватно описывать адгезионный контакт, но для двух различных случаев. Первая теория подходит для частиц относительно большого радиуса, тогда как теория Дерягина подходит для частиц малого радиуса. В нашем случае теория ДМТ подходит больше нежели ДКР. Неоспоримое преимущество двух

классических теорий заключается в простых аналитических соотношениях для сил адгезии, что позволяет просто оценить необходимую силу отрыва и, как следствие, параметры вибрации и скорость вращения фильтровальной перегородки. Недостатком данных моделей является невозможность их применения во всем диапазоне упругости и адгезии, а так же в невозможности учесть наличие микрорельефа частиц.

Для более точного решения задач связанных с вычислением адгезионных сил был разработан подход, основной принцип которого заключается в расчете упругих деформаций границ контактирующих тел таким образом, что сохранялось равенство деформационных и молекулярных сил на границах. В рамках данного подхода работал в том числе и Дерягин Б.В..

На основе этого подхода стали появляться и численные решения задачи. В году. Дерягиным, Ющенко и Муллером [4] было получено решение подтверждавшее влияние параметра Тейбора [3] на расчеты по ДМТ и ДКР. Численные решения данной задачи для пыли получены, например, в [5-7].

В 1992 г. на основе самосогласованного подхода была предложена модель Можи Дагдейла [8]. В данной модели на контактное давление оказывают адгезионные силы вне области контакта. Данная теория адгезии и описанные выше классические теории широко применяются для экспериментального исследования адгезии.

Классические теории дают простые соотношения для сил отрыва, зависящие от приведенного радиуса и поверхностной энергии тел.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМОГО АППАРАТА

На Рис. 1 приведена схема конструкции фильтра. Более подробное описание конструкции исследуемого аппарата и принципы его работы приведены в работах [9], [10], [11].

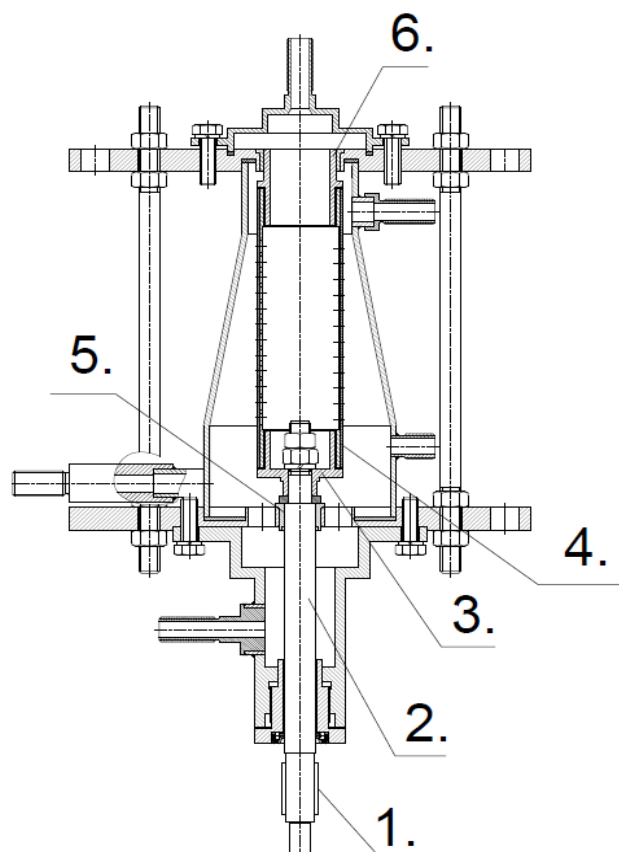


Рисунок 1. Геометрическая и сеточные модели ГДВФ.

При таком исполнении вращение от электродвигателя передается посредством ремённой передачи, шкив которой соединен с валом (2) посредством шлицевого соединения (1), вращение от вала передается на штуцер (3), который соединен с фильтровальной перегородкой (4) посредством резьбового соединения. Относительное движение вала и перегородки обеспечивают подшипники скольжения (5), (6)..

Основные геометрические размеры: высота фильтра – 186 мм, внешний диаметр фильтровальной перегородки – 21 мм, толщина фильтровальной перегородки – 1 (0,1) мм, диаметр меньшей цилиндрической части – 52 мм, диаметр большей цилиндрической части – 90 мм, диаметры входного и выходного патрубков – 15 мм.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ ПЕРЕГОРОДКИ.

В процессе эксплуатации большое влияние на эффективность и надежность фильтров оказывает работа системы регенерации, т.к. гидравлическое сопротивление непрерывно растет, а проницаемость снижается. В рассматриваемом аппарате перепад давления складывается из двух составляющих: центробежная [1], гидравлическое сопротивление перегородки, возрастающее в процессе фильтрования. Для сохранения пропускной способности в нормальных пределах фильтровальный материал необходимо заменять или регенерировать. В работе [2] процесс регенерации разделяют на 3 периода:

1. В слое осадка появляются микротрещины, начинают рушиться аутогезионные связи, что проявляется в незначительном падении гидравлического сопротивления.
2. Полное нарушение аутогезионных связей, осадок отделяется от перегородки, гидравлическое сопротивление резко падает.
3. Нарушение адгезионных связей, которые заметно сильнее аутогезионных, заметного снижения гидравлического сопротивления не происходит.

Закономерности процесса регенерации с применением вибрации рассмотрены на примере слоя осадка на вертикальной пористой перегородке (рис.21). По аналогии с методом, приведенным в работе [13].

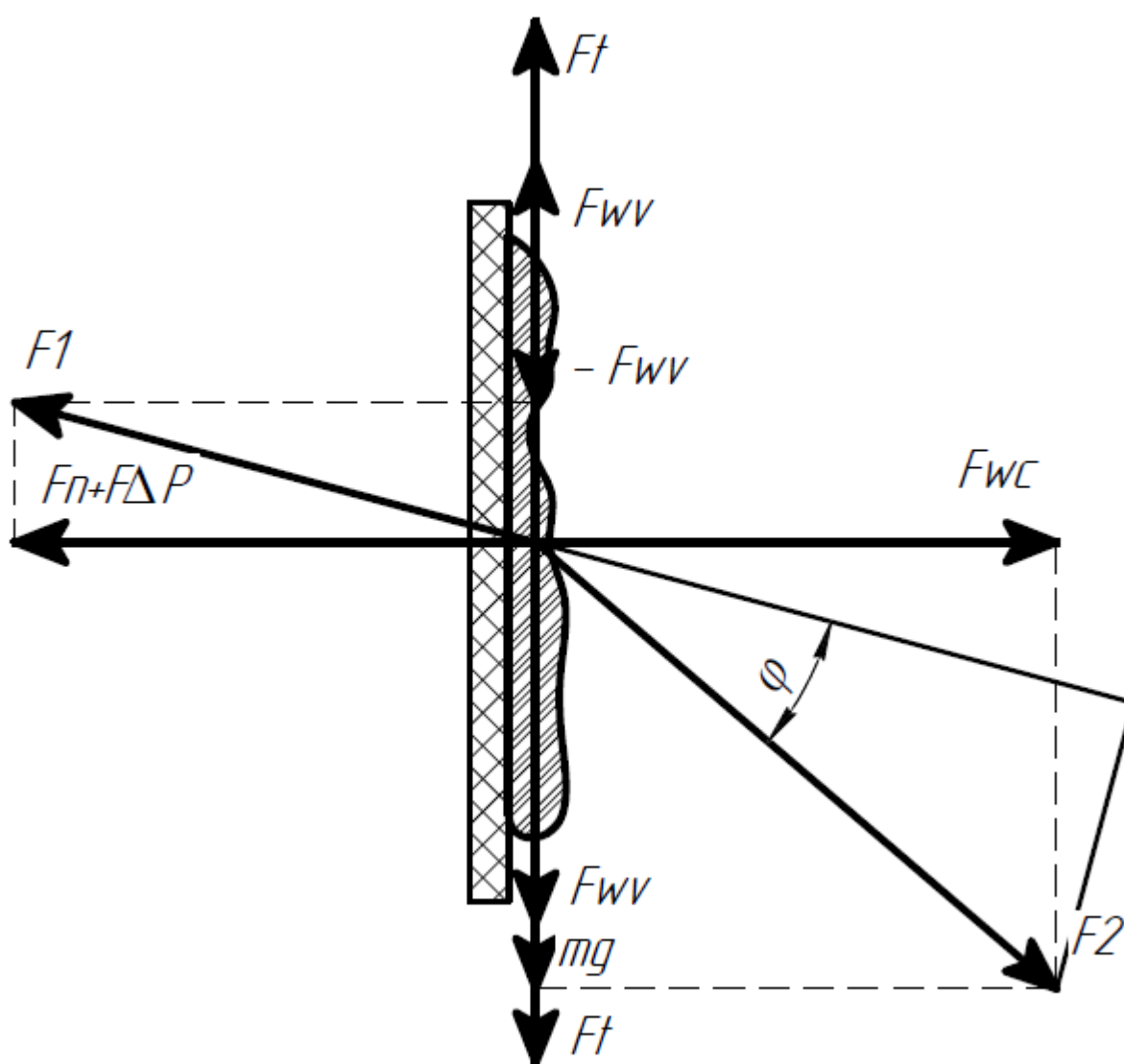


Рисунок 21, Схема действия сил, где gm — вес слоя загрязнений, F_n и F_t — нормальная и тангенциальная составляющие силы адгезии, F_{wv} и F_{wc} — силы, возникающие в процессе регенерации из-за воздействия вибрации и вращения фильтровальной перегородки соответственно, $F_{\Delta p}$ — сила перепада давления на перегородке.

Таким образом вес частиц загрязнения и силы, созданные вращением и вибрацией фильтровальной перегородки, стремятся оторвать частицы загрязнений, а силы адгезии и сила давления поступающего потока жидкости удерживают частицы на поверхности перегородки.

Тогда условие отрыва частиц загрязнений будет следующим:

$$\cos(\varphi) ((mg)^2 + Fwc^2) > (Ft - Fwv)^2 + (Fn + F\Delta P) \quad (1)$$

Разделив левую и правую часть на величину $(gm)^2$, которая характеризует общий вес загрязнений на ФП, то получим:

$$\eta < \frac{1}{g} \left[\frac{Fwc^2}{m^2} - \frac{(Ft - Fwv)^2 + (Fn + F\Delta P)}{m^2} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где η – характеризует эффективность регенерации, при $\eta = 1$ при регенерации все частицы удаляются с фильтрующего материала.

Величины, входящие в условие (2) могут иметь достаточно сложные функциональные зависимости. Силы сцепления с поверхностью, обусловленные адгезионными свойствами частиц могут в принципе могут зависеть от десятка параметров [2]. Но по теории Дерягина, если одна из поверхностей является плоской [3]:

$$Fn = 4\pi\sigma r, Ft = \mu Fn, \quad (3), (4)$$

где σ – поверхностное натяжение на границах двух тел, r – радиус кривизны частиц, μ – коэффициент трения. Теория Дерягина подходит для определения силы отрыва в случае частиц малого размера, как в нашем случае.

Силы Fwc и Fwv носят инерциальный характер и напрямую зависят от рабочего режима аппарата (скорости вращения перегородки и параметров вибрации):

$$Fwc = mr \left(\frac{60v}{2\pi} \right)^2, Fwv = mA(2\pi f)^2, \quad (5), (6)$$

где r – радиус фильтровальной перегородки, м; v – скорость вращения фильтровальной перегородки, об/мин; A – амплитуда вибрации, м; f – частота вибрации, Гц.

Сила перепада давления будет равна [15]:

$$F\Delta p = \Delta P S, \quad (7)$$

где ΔP – перепад давления на перегородке, Па, S – площадь фильтровальной перегородки, м². Перепад давления в процессе работы и накопления осадка будет возрастать.

Допущения, принятые в данной математической модели:

1. Не учитываются силы когезии, т.е. предполагается образование монослоя;
2. частицы загрязнения имеют одинаковый размер и форму;
3. характер загрязнений однородный.

В дальнейшем будет проводиться определение применимости данной модели для расчёта интенсивности регенерации рассматриваемого аппарата, а

также определение зависимости, требуемой вибрации, от времени работы аппарата, через раскрытия зависимости перепада давления от времени работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson K. L., Kendall K., and Roberts A. D. Surface energy and the contact of elastic solids // *Proc. Roy. Soc. London A*. 1971. 324. P. 301–313.
2. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Yu.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. // *J. Colloid. Interface Sci.* 1975. V. 53, N 2, P. 314–326.
3. Tabor D., Surface forces and surface interactions // *J. Colloids Interface Sci.* 1977, V. 58. N 2. P.13.
4. Muller V.M., Yushchenko V.S., Derjaguin B.V. On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane // *J. Colloid Interface Sci.* 1980. V. 77. № 1.P. 91–101.
5. Feng J.Q. Contact behavior of spherical elastic particles: a computational study of particle adhesion and deformations // *Colloids Surf.* 2000 A 172 P. 175–98
6. Attard P., Parker J.L. Deformation and adhesion of elastic bodies in contact // *Phys. Rev. A*. V. 46. № 12. P. 7959–7971, 1992.
7. Feng J.Q. Adhesive contact of elastically deformable spheres: a computational study of pull-off force and contact radius // *J. Colloids Interface Sci.* 2001. V. 238 P. 318–23
8. Maugis D., Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale model // *J. Colloid Interface Sci.* 1992. 150 P. 243–269.
9. Александров А.А., Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Численное исследование течения жидкости между проницаемыми вращающимися цилиндрическими поверхностями // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2020. № 1 (88). С. 32-45.
10. Влияние геометрических параметров рабочего канала гидродинамического фильтра с защитной перегородкой на структуру течения среды / Александров А.А. [и др.] // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2018. № 2 (77). 2018. С. 23-38.
11. 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. Т. 14. № 1-3. С. 866-876.
12. Фролов Н.П., Девисилов В.А. Исследование перепада давления на гидродинамическом фильтре посредством машинного моделирования с применением программного комплекса ANSYS/CFX // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 1-3. С. 866-876.

- 13.С. Ю. Панов, О.Н. Белых, А.В. Зинковский, В.С. Момотов – Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок // Вестник ВГУИТ, №1, 2015. – С.175-179.
- 14.50. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков / А.Д. Зимон. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Химия, 1976. - 431 с.
- 15.Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. – Издательство «Химия», М., 1971 г. 440 с.