

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-114-120

Титов Д.П.

Тульский государственный университет

E-mail: titovd1981@yandex.ru

## РАБОТА РОТОРА В АППАРАТЕ ВИХРЕВОГО СЛОЯ

**Аннотация.** Аппараты вихревого слоя могут выступать средствами интенсификации большинства процессов во многих случаях. Особенно эффективно применение этих аппаратов при производстве резиновых изделий, ускорения химических процессов, для приготовления исходных материалов в металлургии, использование в обогащительных процессах переработки руд, решения экологических проблем при очистке сточных вод и во многих других областях. Такое широкое применение возможно благодаря свойствам вихревого слоя, который обеспечивает помимо механического воздействия ещё и электрохимическое. Эффективность традиционных аппаратов данного класса можно повысить путем применения новой конструкции. Эта конструкция отличается наличием в рабочей зоне ротора, который активно влияет на электромагнитные процессы. Исследованию работы ротора в аппарате вихревого слоя посвящена данная статья. Исследование носит практический характер и заключается в изучении работы экспериментальной установки. Конструкция этой установки позволяет выявить закономерности в обозначенной области исследования. Это достигается использованием легкоъемных роторов различного диаметра, которые позволяют получать зазор между ротором и индуктором различной величины. Так же конструкция экспериментальной установки позволяет вводить в активную зону различное количество ферромагнитных элементов. Основным оценочным критерием при исследовании является коэффициент использования энергии ротором. Оценивая абсолютную величину этого коэффициента, был сделан вывод о бесперспективности классических аппаратов для механического воздействия на продукт. Результатами исследования является установление зависимости рабочих параметров от зазора между ротором и индуктором, а также количества ферромагнитных элементов в исследуемом аппарате.

**Ключевые слова:** аппарат вихревого слоя (АВС), опытная установка, исследование, моторный режим, электрические характеристики, реактивная мощность, исследуемые параметры.

**Введение.** Одним из методов интенсификации технологических процессов является комплексная обработка в аппарате вихревого слоя ферромагнитными частицами, за счет воздействия на них вращающегося электромагнитного поля [1, 2]. Использование принципа вихревого слоя позволяет интенсифицировать целый ряд технологических процессов [3, 4] за счет комплексного воздействия на обрабатываемые вещества активного перемешивания и диспергирования [5, 6, 7, 8, 9], акустической и электромагнитной обработки, трения, высоких локальных давлений, электролиза [10].

Основной недостаток аппаратов вихревого слоя как электрической машины заключается в плохом коэффициенте мощности [1] ( $\cos\phi$ ), порядка 0,2–0,4. Это связано с большой долей реактивной мощности, которую эти аппараты потребляют. Реактивная мощность необходима на образование магнитного поля. Этот недостаток общий для всех аппаратов вихревого слоя, так как магнитное поле, генерируемое индуктором,

не замыкается на магнитопровод, а через ферромагнитные элементы рассеивается в пространстве [11]. Поскольку масса ферромагнитных элементов невысока, порядка 400 гр., то полноценным магнитопроводом они выступить не могут.

Реактивная мощность осложняет работу установки в составе электрической сети [12], поэтому её нужно компенсировать или уменьшать [13, 14]. Основным способом компенсации реактивной мощности является параллельное подключение соответствующей данной индуктивности ёмкости. При этом создаётся колебательный контур, в котором при определённой настройке может возникнуть резонанс [12]. Резонанс в параллельном контуре является резонансом напряжений и характерен тем, что потребление реактивной мощности из сети уменьшается, а в идеале становится равным нулю. Этот способ распространён в промышленности и до появления других электронных способов являлся основным. Компенсация реактивной мощности при индуктивном нагреве в печах и других промышленных установках.

Уменьшить реактивную мощность можно только совершенствованием АВС как электроустановки. Для этого необходимо магнитное поле замыкать на магнитопровод. В электродвигателях таким магнитопроводом является вращающийся ротор [12], поэтому  $\cos \varphi$  асинхронных короткозамкнутых двигателей равен 0,9. Ротор в электродвигателях выполнен с минимальными зазорами, чтобы рассеивание магнитного поля было минимальным. Такая конструкция не подходит, потому что аппарат вихревого слоя является машиной, через которую должно проходить обрабатываемая среда. Это подразумевает наличие проходного сечения, то есть между ротором и индуктором должен присутствовать зазор. Предметом проведённого исследования является работа АВС в моторном режиме, с ротором, имеющим увеличенный зазор между индуктором и поверхностью ротора. С заполнением свободного зазора  $H$  (рис. 4) различным количеством ферромагнитных элементов.

С точки зрения концентрации магнитной энергии наличие ротора является положительным моментом, так как позволяет обрабатывать продукт не во всём объёме индуктора, а только в строго определённом зазоре между индуктором и ротором.

Наличие вращающегося ротора так же полезно с точки зрения конструирования перерабатывающих машин на принципах аппаратов вихревого слоя. Это позволит приводить различные агрегаты: насосы, мешалки, дробилки от вала вращающегося ротора.

**Методология.** Для исследования работы ротора в активной зоне аппарата вихревого слоя разработана лабораторная установка [15, 16]. Общий вид установки представлен на рис. 1., устройство и состав представлены на рис. 2. Установка (рис. 2) состоит из индуктора 7, помещённого в корпус 8, в который герметично заделана труба 18 с фланцами. Корпус закреплён на радиаторе охлаждения 11, который соединён трубопроводами 19 с корпусом. Через трубопроводы 19 циркуляционным насосом 13 осуществляется циркуляция охлаждающего масла. Охлаждается радиатор установленным на него вентилятором 12. Радиатор 11 является основанием, на котором смонтированы все агрегаты установки. В корпус установлен термометр 17, по которому контролируется температура охлаждающего масла. К фланцам трубы 18 крепятся фланцы 14 с установленными в них подшипниками, на которых вращается вал 15. На последнем закрепляется ротор 9, помещённый в активную зону  $K$  индуктора 7. Фланцы 14 легко снимаются, что позволяет производить замену ротора 9. Между ротором 9 и трубой 18 вводятся ферромагнитные элементы 10.

Шайбы 16 препятствуют разлёту ферромагнитных элементов 10 при работе установки.



Рис. 1. Установка для исследования работы АВС (общий вид)

Для затормаживания ротора установка оснащена устройством, позволяющим измерять момент при торможении ротора.

Тормозное устройство состоит: из тормозного барабана 1, закреплённого на валу 15 ротора 9. Тормозной барабан охватывают накладки, закреплённые на планках тормозного рычага 2. Сила нажима накладок на барабан контролируется загрузочным устройством 3. Создающийся момент на плече  $L$  загружает весы 5, которые и измеряют этот момент. Устройство 6 позволяет управлять работой весов. Упор 4 позволяет фиксировать положение рычага 2, тем самым разгружаются весы 5.

**Основная часть.** При выполнении исследования проводилась работа с пятью роторами рис. 3.

Роторы представляют собой металлическую болванку различного диаметра. Диаметры  $D$  роторов следующие: ротор 1 –  $D=80$  мм, ротор 2 –  $D=70$  мм, ротор 3 –  $D=50$  мм, ротор 4 –  $D=30$  мм, ротор 5 –  $D=18$  мм. Учитывая, что диаметр внутренней трубы 20 – 100 мм можно вычислить зазор  $H$  (рис. 2.).

$$H = \frac{100-D}{2} \quad (1)$$

Вычисляя по формуле (1), получаем зазор  $H$ : ротор 1 –  $H=10$  мм, ротор 2 –  $H=15$  мм, ротор 3 –  $H=25$  мм, ротор 4 –  $H=35$  мм, ротор 5 –  $H=41$  мм.

Порядок проведения экспериментов.

При фиксированной частоте тока в 25, 50, 75, 100 Гц (что для 2-х полюсной обмотки равнозначно 1500, 3000, 4500, 6000 об/мин соответственно), подаваемой на индуктор установки, замерялись параметры: сила  $F$  на роторе, которую показывают весы загрузочного устройства [Кг],

частота вращения ротора  $n_1$  [об/мин], ток потребляемый индуктором  $I$  [А], напряжение межфазное, подаваемое на индуктор  $U$  [В], мощность

электрическая потребляемая индуктором  $N_e$  [кВт].

Замеряемые параметры фиксировались следующими приборами.

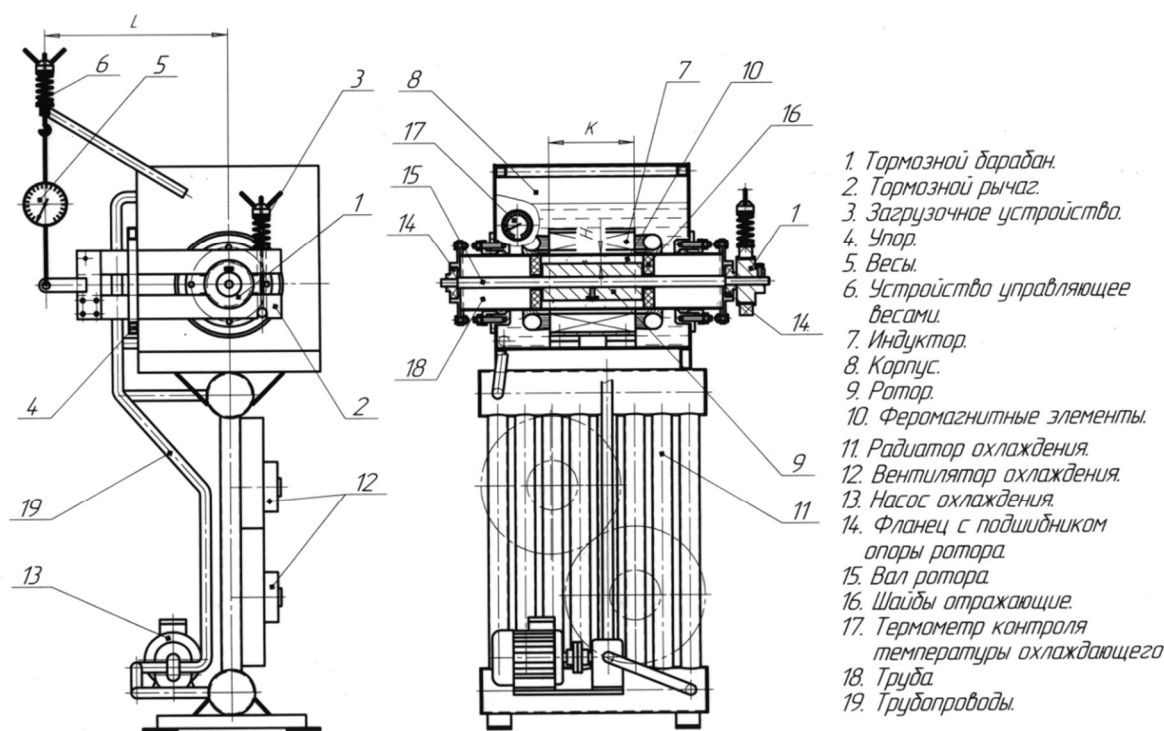


Рис. 2. Установка для исследования работы АВС (устройство и состав)

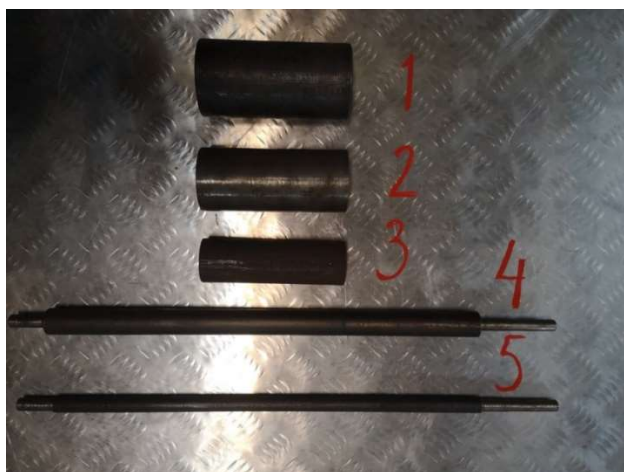


Рис. 3. Сменные роторы различного диаметра

Сила  $F$  – подвесными электронными весами, частота вращения  $n_1$  – часовым тахометром, питание индуктора установки осуществляется от частотного преобразователя HYUNDAI N700E, электрические параметры  $I$ ,  $U$  и  $N_e$  фиксировались частотным преобразователем HYUNDAI N700E.

При каждом замере фиксировались также расчётные параметры, являющиеся производными замеренных параметров: скольжение  $S$  –

отставание вращения ротора от вращения магнитного поля,

$$s = \frac{n - n_1}{n} 100\% \quad (2)$$

мощность на роторе  $N$  – мощность, снимаемая с ротора с помощью тормозного устройства,

$$N = \frac{FLn_1}{6} = 0,048Fn_1 \quad (3)$$

где  $L=0,29$  м – плечо загрузочного устройства, коэффициент использования энергии ротором,

$$k = \frac{N}{N_e} 100\% \quad (4)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{N_e}{\sqrt{3}IU} \quad (5)$$

Обработывая результаты экспериментов была выявлена зависимость коэффициента  $K$  использования энергии ротором, от зазора  $H$  между статором и ротором. Эта зависимость, для частот 25, 50, 75 и 100 Гц, приведена на рис. 4. Из рис. 4 видно, что с увеличением зазора  $H$ , коэффициент  $K$  очень сильно уменьшается.

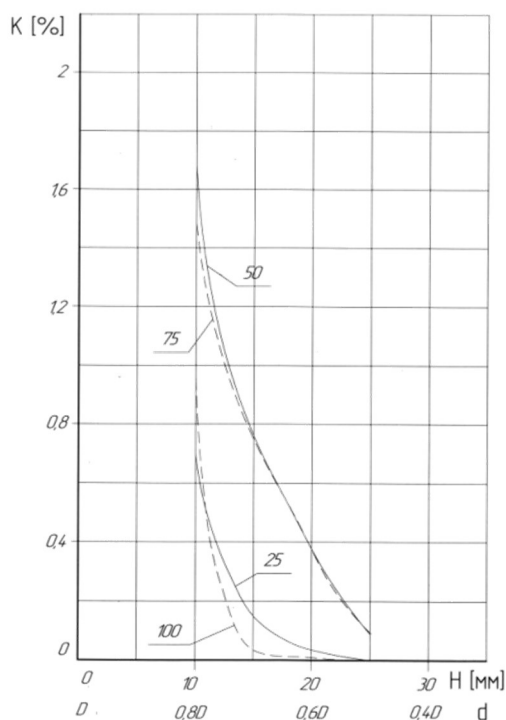


Рис. 4. Зависимость  $K$ , его максимального значения от  $H$  при различных частотах питающего тока

Анализируя данные по коэффициенту мощности, не удалось выявить чёткой зависимости между  $\cos \varphi$  и размерами роторов. Выявлена зависимость от частоты питающего тока и определен порядок его значения 0,5–0,75, что является достаточно большой величиной.

Порядок проведения исследования с ферромагнитными элементами такой же, как и в предыдущих экспериментах. Отличие заключается во введении в активную зону  $K$  (рис. 2) различного количества ферромагнитных элементов (рис. 5.) Ферромагнитные элементы выполнены в виде стальных цилиндров с диаметром 1,5 мм и длиной 12 мм.

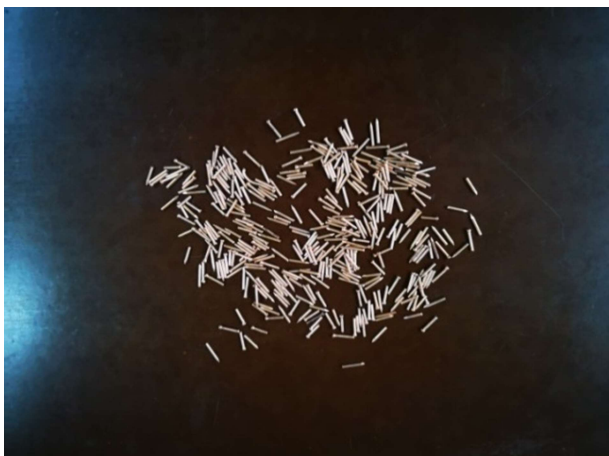


Рис. 5. Ферромагнитные элементы

В виду малости зазоров  $H$  (рис. 2.), ротор 1 и ротор 2 (рис. 5.) из экспериментов этого раздела

были исключены, так как зазор  $H$  соизмерим с длиной ферромагнитного элемента, что может повлиять на результаты экспериментов. Работа с ферромагнитными элементами проводилась на роторе 3 рис.3.

Анализируя результаты экспериментов, было замечено, что при работе с 50 и 100 граммами ферромагнитных элементов наблюдается увеличение коэффициента использования энергии ротором. Для более четкого выявления этой зависимости построен график  $K$  от  $M$  (рис. 6.).

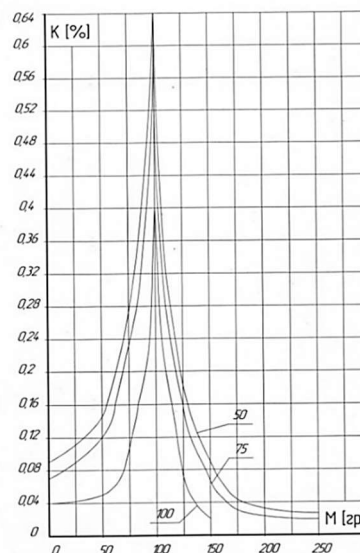


Рис. 6. Зависимость  $K$ , его максимального значения от  $M$  при различных частотах питающего тока

Из рис. 6 видно, что на 100 граммах ферромагнитных элементов наблюдается значительное возрастание  $K$  коэффициента использования энергии ротором. Это объясняется тем, что введенные ферромагнитные элементы сгущают магнитное поле, и оно с меньшими потерями доходит до поверхности ротора. Затем после 150 граммов наблюдается значительное уменьшение коэффициента использования энергии ротором  $K$ , это связано с тем, что набирается масса ферромагнитных элементов, которая начинает экранировать ротор от магнитного поля.

Этот эффект, может быть использован для совершенствования процессов, происходящих в аппаратах вихревого слоя. Так же на его основе можно создать прибор для контроля заполнения ферромагнитными элементами активной зоны аппарата вихревого слоя. Вводя измерительный ротор в середину можно контролировать степень поглощения ферромагнитными элементами генерируемого индуктором магнитного поля.

Несмотря на увеличение  $K$  его значение составляет порядка 0,5–1 %, что недопустимо мало и показывает несовершенство преобразования электрической энергии в механическую аппара-

тами вихревого слоя. Это затрудняет использование этих аппаратов для механического воздействия на обрабатываемый материал. Этот вывод можно распространить на все аппараты вихревого слоя классической конструкции, так как 400 грамм ферроэлементов являются, по сути, являются бесформенным ротором.

Анализируя данные по коэффициенту мощности, не удалось выявить чёткой зависимости между  $\cos \varphi$  и количеством иголок. Установлена зависимость от частоты питающего тока, и определен порядок его значения 0,5–0,75, что является достаточно большой величиной.

**Выводы.** В статье описано исследование моторных режимов работы аппарата вихревого слоя, по результатам которого можно заключить.

Исследованы моментные характеристики роторов с различными размерами как отдельно, так и с отмеренными массами навесок ферромагнитных элементов. Это позволило выявить зависимости скольжения  $S$  и коэффициента использования энергии ротором  $K$  от мощности развиваемой ротором, по которым определилось влияние зазора  $H$ , между индуктором и стенкой ротора, на коэффициент  $K$ .

Проведенные замеры позволили выявить зависимость скольжения  $S$  и коэффициента использования энергии ротором  $K$  от мощности  $N$  развиваемой ротором, для различного количества ферромагнитных элементов. Это выявило особенность, которая отражена на рис. 6. При введении ферромагнитных элементов на первом этапе осуществляется резкое повышение коэффициента использования энергии ротором, с последующим его резким падением. Этот эффект может полезно использоваться для улучшения работы АВС как в моторном, так и в генераторном режиме.

Определён порядок коэффициента использования энергии ротором  $K$ , что выявило его явную недостаточность. Выяснилось, что  $\cos \varphi$  зависит от частоты питающего тока и для данной установки имеет достаточно высокое значение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах вихревого слоя. Киев: Изд. «Техника», 1976. 144 с.
2. Нгуен В.М., Конюхов Ю.В., Рыжонков Д.И. Исследование влияния электромагнитного поля и энергомеханической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта восстановлением водородом // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. №2. С. 96–101.
3. Селиверстов Г.В., Титов Д.П. Необходимость утилизации золошлаковых отходов с использованием перерабатывающих машин на принципах аппаратов вихревого слоя // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы междунар. научно-технической конф. Под общ. Редакцией Ш.М. Мерданова. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. С. 276–278.
4. Селиверстов Г.В., Титов Д.П. Использование машин на принципах аппаратов вихревого слоя для утилизации золошлаковых отходов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы междунар. научно-технической конф. Под общ. Редакцией Ш.М. Мерданова. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. С. 279–282.
5. Войтович В.А., Шварев Р.Р., Захарычев Е.А., Феокристова Е.П., Деревнев Р.Я., Захарычева Н.С. Эффективность применения аппаратов вихревого слоя в процессах измельчения порошковых материалов // Новые огнеупоры. 2017. №10. С. 48–53.
6. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Дебердеев Т.Р., Лексин В.В. Прочность тяжелого бетона на портландцементе, обработанном в аппарате вихревого слоя // Строительные материалы. 2017. №10. С. 28–31.
7. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Дебердеев Т.Р., Лексин В.В. Оптимальные параметры и картина магнитного поля рабочей камеры в аппаратах с вихревым слоем // Строительные материалы. 2018. №7. С. 64–67.
8. Ибрагимов Р.А., Королёв Е.В., Дебердеев Т.Р. Влияние пластификаторов на свойства гипсовых вяжущих, активированных в аппаратах вихревого слоя // Вестник МГСУ. 2019. Т14. Вып. (126). С. 293–300.
9. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete. Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54 DOI: 10.5862/mce.54.7
10. Mischenko M.V., Bokov M.M., Grishaev M.E. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field // Technical Sciences. 2015. № 2. Pp. 3508–3512.
11. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses // ZKG International. 2018. № 5. Pp. 28–35.
12. Данилина Э.М., Володин Г.И., Бреславец В.П. Потери энергии на вихревые токи в электромагнитных аппаратах вихревого слоя и способы их снижения // Известия вузов. Электромеханика. 2015. №1. С. 43–47.

13. Данилина Э.М., Астахов В.И. Вихревые токи и потери на них в пластине с разрезами // Известия вузов. Электромеханика. 2015. №4. С. 5–12.

14. Кицис С.И. Режимы установившегося самовозбуждения асинхронного генератора // Электричество. 2004. №2. С. 64–66.

15. Исследование параметров и характеристик машин с разомкнутым магнитопроводом. Под ред. Резина М.Г. Свердловск: УПИ, 1977. 137 с.

16. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 185 с.

Информация об авторах

**Титов Дмитрий Петрович**, аспирант кафедры ПТМиО. E-mail: titovd1981@yandex.ru. Тульский государственный университет. Россия 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Поступила в февраль 2020 г.

© Титов Д.П., 2020

**Titov D.P.**

Tula State University

E-mail: titovd1981@yandex.ru

## ROTOR OPERATION IN THE VORTEX LAYER DEVICE

**Abstract.** *Vortex layer devices can be means of intensification of most processes. It is particularly effective to use these devices to produce rubber products, to accelerate chemical processes, to prepare raw materials in metallurgy, to use them in ore processing processes, to solve environmental problems in wastewater treatment and in many other areas. Such widespread use is possible due to the properties of the vortex layer, which, in addition to mechanical impact, also provides electrochemical effects. The efficiency of traditional devices of this class can be improved by using a new design. This design is characterized by the presence of a rotor in the working area, which actively affects electromagnetic processes. This article is devoted to the study of the rotor operation in the vortex layer device. The research is of a practical nature and consists in studying the operation of an experimental installation. The design of this installation makes it possible to identify patterns in the designated area of research. This is achieved by using easily removable rotors of different diameters, which allow getting a gap between the rotor and the inductor of different sizes. Also, the design of the experimental installation allows to enter a different number of ferromagnetic elements into the active zone. The main evaluation criterion for the study is the coefficient of energy use by the rotor. Estimating the absolute value of this coefficient, a conclusion is drawn about the futility of classical devices for mechanical impact on the product. The results of the study are to determine the dependence of the operating parameters on the gap between the rotor and the inductor, as well as the number of ferromagnetic elements in the device under study.*

**Keywords:** *device of a vortex layer (DVL), pilot plant, research, motor mode, electrical characteristics, reactive power, the studied parameters.*

## REFERENCES

1. Logvinenko D.D., Shelyakov O.P. Intensification of technological processes in apparatus of the vortex layer [Intensifikaciya tekhnologicheskikh processov v apparatah vihrevogo sloya]. Kiev: Tekhnika, 1976. 144 p. (rus)

2. Nguyen V.M., Konyukhov Yu.V., Ryzhonkov D. I. Investigation of the influence of the electromagnetic field and energy-mechanical processing on the process of obtaining nanoscale powders of metallic cobalt by hydrogen reduction [Issledovanie vliyaniya elektromagnitnogo polya i energomekhanicheskoy obrabotki na process polucheniya nanorazmernyh poroshkov metallicheskogo kobal'ta vosstanovleniem vodorodom]. Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy. 2018. No. 2. Pp. 96–101. (rus)

3. Seliverstov G.V., Titov D.P. The Need for utilization of ash and slag wastes using processing

machines based on the principles of vortex layer devices [Neobhodimost' utilizacii zoloshlakovyh othodov s ispol'zovaniem pererabatyvayushchih mashin na principah apparatov vihrevogo sloya]. Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы i sredstva: Materialy mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konf. Pod obshch. Redakciej Sh.M. Merdanova. Tyumen': Izd-vo TIU 2017. Pp. 276–278. (rus)

4. Seliverstov G.V., Titov D.P. Using machines based on the principles of vortex layer apparatuses for utilization of ash and slag wastes [Ispol'zovanie mashin na principah apparatov vihrevogo sloya dlya utilizacii zoloshlakovyh othodov]. Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы i sredstva: Materialy mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konf. Pod obshch. Redakciej Sh.M. Merdanova. Tyumen': Izd-vo TIU 2017. Pp. 279–282. (rus)

5. Voitovich V.A., Shvarev R. R., Zakharychev E.A., Feokristova E.P., Derebnev R.Ya., Zakharycheva N. S. Efficiency of using vortex layer devices in the processes of grinding powder materials [Effektivnost' primeneniya apparatov vihrevoogo sloya v processah izmel'cheniya poroshkovykh materialov]. New refractories. 2017. No. 10. Pp. 48–53. (rus)

6. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Strength of heavy concrete on Portland cement processed in a vortex layer apparatus [Prochnost' tyazhelogo betona na portlandcemente, obrabotannom v apparate vihrevoogo sloya]. Building materials. 2017. No. 10. Pp. 28–31. (rus)

7. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Optimal parameters and picture of the magnetic field of the working chamber in devices with a vortex layer [Optimal'nye parametry i kartina magnitnogo polya rabochej kamery v apparatah s vihrevym sloem]. Building materials. 2018. No. 7. Pp. 64–67. (rus)

8. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T. R. Influence of plasticizers on the properties of gypsum binders activated in vortex layer devices [Vliyanie plastifikatorov na svoystva gipsovykh vyazhushchih, aktivirovannykh v apparatah vihrevoogo sloya]. Vestnik MGSU, 2019. Vol. 14. № (126). Pp. 293–300. (rus)

9. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Effect of mechanical activation of binder on properties of fine-grained concrete [Vliyanie mekhanohimicheskoy aktivatsii vyazhushchego na svoystva melkozernistogo betona]. Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54 DOI: 10.5862 mce. 54.7 (rus)

10. Mischenko M.V., Bokov M.M., Grishaev M.E. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field [Aktivizatsiya tekhnologicheskikh processov obrabotki

materialov v ustrojstve vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem]. Technical Sciences. 2015. No. 2. Pp. 3508–3512. (rus)

11. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Structural parameters and properties of fine-grained concrete on Portland cement, activated with grained concrete on Portland cement, activated with plasticizers in vortex layer apparatuses [Strukturnye parametry i svoystva melkozernistogo betona na portlandcemente, aktivirovannogo zernistym betonom na portlandcemente, aktivirovannogo plastifikatorami v apparatah vihrevoogo sloya]. ZKG International. 2018. No. 5. Pp. 28–35. (rus)

12. Danilina E.M., Volodin G.I., Breslavets V.P. Energy losses on eddy currents in electromagnetic devices of the vortex layer and ways to reduce them [Poteri energii na vihrevye toki v elektromagnitnykh apparatah vihrevoogo sloya i sposoby ih snizheniya]. Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2015. No. 1. Pp. 43–47. (rus)

13. Danilina E.M., Astakhov V.I. The eddy currents and the losses energy in the plate with the slits [Vihrevye toki i poteri na nih v plastine s razrezami]. Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2015. No. 4. Pp. 5–12. (rus)

14. Kitsis S.I. Modes of steady-state self-excitation of an asynchronous generator [Rezhimy ustanovivshegosya samovozbuzhdeniya asinhronnogo generatora]. Electricity. 2004. No. 2. Pp. 64–66. (rus)

15. Investigation of parameters and characteristics of machines with an open magnetic circuit [Issledovanie parametrov i harakteristik mashin s razomknutym magnetoprovodom]. Edited by Rezina M. G. Sverdlovsk: UPI, 1977. 137 p. (rus)

16. Ivobotenko B.A. Design of experiments in electrical engineering [Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike]. Moscow: Energiya, 1975. 185 c. (rus)

#### *Information about the authors*

**Titov, Dmitriy P.** Postgraduate. E-mail: titovd1981@yandex.ru. Tula State University, Russia, 300012, Tula, Lenin Avenue, 92.

---

*Received in February 2020*

#### **Для цитирования:**

Титов Д.П. Работа ротора в аппарате вихревого слоя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 114–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-114-120

#### For citation:

Titov D.P. Rotor operation in the vortex layer device. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 114–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-114-120