



**Е. В. Подоплелов, А. И. Дементьев, И. Ю. Антоненко, Н. А. Корчевин**

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

Дата поступления: 16 октября 2018 г.

## НОВОЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ДВОЙНОЕ СИЛЬФОННОЕ УПЛОТНЕНИЕ ШТОКОВ ВИБРОПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

**Аннотация.** В работе представлена установка для выращивания микроорганизмов с аппаратом, имеющим пружинное виброперемешивающее устройство, обеспечивающее эффективное равномерное перемешивание во всем рабочем объеме жидкой среды. Обращается внимание на герметизацию штока мешалки, необходимую при проведении пенообразующих процессов, предложена конструкция нового уплотнения штоков виброперемешивающих устройств. Герметизация осуществляется путем использования сильфонов, имеющих малую жесткость, в которых благодаря несжимаемости жидкости, находящейся внутри сильфона и аппарата, сохраняется форма гофр, что эффективно уплотняет аппарат даже при сравнительно больших перемещениях штока. Использование такого уплотнения позволяет снизить затраты энергии на перемешивание. Проведенные испытания на модельной установке с вибромешалкой для выращивания микроорганизмов с максимальным перемещением штока 20 мм показали хорошую герметичность и работоспособность перемешивающего устройства и установки в целом. Предлагаемое уплотнение может быть использовано не только в микробиологической промышленности, но и в технологических процессах в других отраслях и, прежде всего, в процессах, при осуществлении которых наблюдается пенообразование, используются агрессивные для материала оборудования среды и вещества, наносящие вред окружающей среде. Надежная работа аппаратов в таких процессах определяется герметизацией оборудования. Усложняющим фактором работы аппаратов является использование давления, превышающего атмосферное. В таких ситуациях особенно важно обеспечивать надежную герметизацию.

**Ключевые слова:** установка, аппарат, микроорганизмы, вибромешалка, герметизация, шток.

**E. V. Podoplelov, A. I. Dement'ev, I. Yu. Antonenko, N. A. Korchevin**

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

Received: October 16, 2018

## NEW HIGH-PERFORMANCE DOUBLE BELLOWS SEAL FOR RODS OF VIBRATION-MIXING DEVICES

**Abstract.** The paper presents a plant for growing microorganisms with a device having a spring vibration-mixing device that provides effective uniform stirring in the entire working volume of the liquid medium. The attention is paid to the sealing of the mixer rod, which is necessary during the foaming processes, and the design of a new seal of the rods of vibration-mixing devices is proposed. Sealing is carried out by using bellows with low rigidity, in which, due to the incompressibility of the liquid inside the bellows and the apparatus, the shape of the corrugations is preserved, which effectively seals the apparatus even with relatively large movements of the rod. The use of that seal makes it possible to reduce the energy consumption for mixing. The tests carried out on a model plant with a vibration mixer for growing microorganisms with a maximum rod displacement of 20 mm showed good performance of the mixing device and the plant as a whole. In addition, the proposed seal can be used in plants and apparatus to implement technological processes associated with the use of toxic and highly aggressive media, the components of which affect not only the material used in the walls of the equipment, but also have an impact on the environment. This is especially evident in processes where foaming is possible. The impact of harmful substances on the environment is determined to a large extent by the sealing of equipment used for such processes. Leakage of the working components involved in the process is complicated by the fact that, in most cases, not only toxic or aggressive components are used in the devices, but also excessive pressure is applied. In this regard, special attention is paid to the sealing units in this sort of devices.

**Keywords:** plant, machinery, microorganisms, vibration mixer, sealing, rod.

### Введение

В настоящее время промышленное производство развивается высокими темпами. Одновременно с этим постоянно ужесточаются требования со стороны экологической безопасности, что, в свою очередь, подразумевает минимизацию выбросов в окружающую среду при работе промышленного оборудования. Прежде всего это касается установок для осуществления технологических процессов, непосредственно связанных с

химическими превращениями используемых компонентов рабочих сред. Следует учитывать, что химическое взаимодействие наиболее интенсивно протекает при перемешивании среды в рабочей зоне. Как правило эффективное перемешивание осуществляется с использованием механических мешалок [1–5]. Особенность микробиологических процессов заключается в высокой дисперсности перемешиваемой среды, обусловленной наличием микроорганизмов, и в обеспечении требуемых



условий для их выживания и развития. При использовании аэробных микроорганизмов необходимо обеспечивать их постоянный контакт с кислородом (воздухом) при соблюдении постоянства температуры. Указанные особенности накладывают отпечаток на конструкцию соответствующего оборудования. Используемые аппараты и вспомогательные устройства должны обеспечивать:

- интенсивное перемешивание, не оказывающее механического воздействия на живые организмы;
- постоянство температуры, оптимальной для обеспечения максимальной скорости роста и развития используемых микроорганизмов;
- непрерывную подачу воздуха и его эффективный контакт с жидкой рабочей средой;
- герметичность при перемещении штока мешалки при использовании виброперемешивающего устройства;
- стерильность рабочего объема [6].

В данной статье обсуждается работа лабораторной установки, которая содержит элементы нового способа герметизации перемешивающего устройства.

#### **Разработка модельной лабораторной установки для выращивания микроорганизмов**

Для исследования уплотнения штоков виброперемешивающих устройств предложена лабораторная установка, которая может применяться для выращивания микроорганизмов штамма *Bacillus subtilis* (рис. 1). Разработка и эксплуатация установки выполнена с соблюдением указанных условий.

С учетом этих требований с целью обеспечения работы установки в условиях выращивания микроорганизмов в ней смонтированы

специальные приспособления, стерелизующие рабочие зоны реактора, а также штуцера для подачи теплоносителя в реакторную рубашку, барботер – подача сжатого воздуха и пульт – изменение частоты колебаний штока мешалки.

Проведенные лабораторные исследования установки позволили получить эмпирическую зависимость, с помощью которой можно рассчитать объемный коэффициент массопередачи ( $K_V$ ) в аппарате, оборудованном пружинной вибромешалкой:

$$K_V = 1,5 \cdot n^{-0,5} \cdot W^{0,7} \cdot \varphi_G^{1,1} \cdot N_V^{0,45},$$

где  $n$  – частота колебаний штока мешалки ( $c^{-1}$ );  $W$  – скорость газа, проходящего через барботер ( $m/c$ );  $\varphi_G$  – газосодержание реакционной смеси;  $N_V$  – удельная объемная мощность ( $Вт$ ).

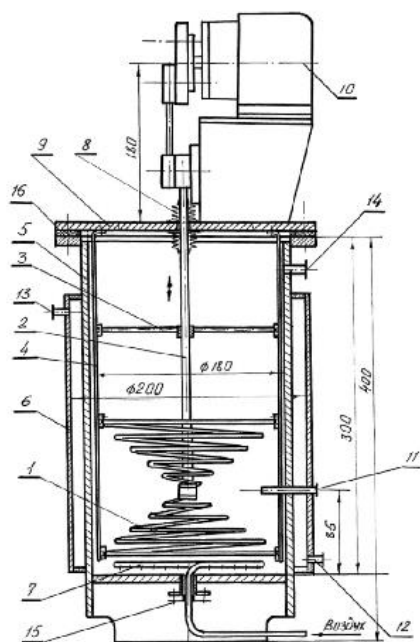
Коэффициент массопередачи, полученный по данному уравнению, отражает эффективность эксплуатации установки в зависимости от гидродинамического режима ее работы и параметров технологического процесса. Поскольку между факторами, входящими в уравнение для расчета коэффициента массопередачи, существует взаимная корреляция, оптимизация работы реактора осуществлена методом перебора вариантов.

Конструкция биохимического реактора – основного аппарата модельной установки, схематично представлена на рис. 2. Здесь приведены габаритные размеры модельного реактора, рабочий объем которого составил 3,5 л.

Для защиты от коррозии, а также с целью исключения отрицательного воздействия материала аппарата и применяемых приспособлений на выращиваемые микроорганизмы корпус биохимического реактора был изготовлен из высоколегированной стали 12Х18Н10Т.



Рис. 1. Установка для выращивания микроорганизмов



**Рис. 2. Аппарат для выращивания микроорганизмов штамма *Bacillus mucilaginosus*:**  
 1 – пружины для перемешивания; 2 – металлический шток; 3 – пеногаситель; 4 – рамка для фиксации пружин мешалки; 5 – корпус биохимического реактора; 6 – теплообменная рубашка; 7 – барботер для подачи воздуха; 8 – сильфонное уплотнение (верхнее и нижнее); 9 – крышка аппарата; 10 – привод; 11 – штуцер для отбора проб; 12 и 13 – штуцера для входа и выхода воды; 14 – технологический штуцер для регулировки давления; 15 и 16 – уплотнение барботера и аппарата

Эта же сталь использовалась для изготовления штока, стоек, крышки, крепежных деталей, барботера. В качестве материала для прокладок и сильфонов использована термостойкая резина. Пружины мешалки изготовлены из алюминиевой проволоки диаметром 2,6 мм и шагом 5,2 мм. Приводом служит кривошипно-шатунный механизм, работу которого обеспечивает двигатель постоянного тока. Применяемый привод мешалки поддерживал заданную амплитуду колебаний штока, равную 0,02 м, и переменную частоту колебаний от 0 до 5 кол./с.

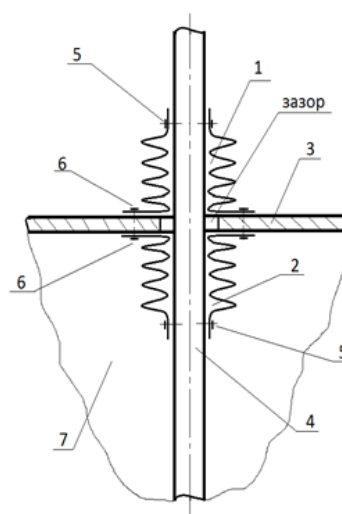
Используемая мешалка, уже ранее представленная [7], позволяет перемешивать рабочую среду равномерно по всему поперечному сечению рабочего объема реактора, чем обеспечивается хороший контакт микроорганизмов с воздушной средой. Перемешивание осуществляется благодаря инжекционно-эжекционному эффекту, возникающему при проходе жидкости через изменяющийся зазор между витками мешалки. Противофазовое перемещение пружин, зафиксированных в поджатом состоянии, позволяет накапливать энергию в

процессе возвратно-поступательного движения штока, что приводит к значительному снижению расхода энергии привода.

Жизнедеятельность микроорганизмов обеспечивается потреблением кислорода, растворенного в жидкости. При его недостатке рост микроорганизмов замедляется или полностью прекращается. В предлагаемой конструкции аппарата кислород подается с воздушным потоком через эффективный барботер, который располагается как можно ближе к пружинам применяемой вибромешалки. Массу кислорода, растворенного в реакционной жидкости, можно определить с помощью ранее предложенной методики [8].

Биохимический процесс, связанный с жизнедеятельностью микроорганизмов в модельном аппарате с мешалкой, сопровождается пенообразованием. По этой причине в верхней части реактора установлен пеногаситель, представляющий собой спираль Архимеда, изготовленный из алюминиевой проволоки диаметром 1,5 мм с шагом 4,5 мм. В качестве материала пеногасителя использован заведомо менее жесткий материал по сравнению с материалом рабочей пружины мешалки. Такое конструктивное решение предполагает эффективное разрушение пены за счет воздействия инерционно выбрасываемых средних витков, материал которых обладает меньшей жесткостью.

В аппаратах с пенообразующей средой необходима надежная герметизация. В исследуемом аппарате предлагается новая конструкция двойного сильфонного уплотнения штоков виброперемешивающих устройств (рис. 3).



**Рис. 3. Используемое двойное сильфонное уплотнение:**  
 1 – верхний сильфон; 2 – нижний сильфон; 3 – крышка реактора; 4 – металлический шток; 5 и 6 – крепеж сильфонов к штоку и крышке; 7 – полость



Отличительной особенностью предлагаемого двойного сифонного уплотнения, по сравнению с аналогичными уплотнительными устройствами [9–14], является то, что в нижнем сифоне содержится жидкость, и внутренние полости сифонов сообщаются между собой с помощью зазора между штоком и крышкой. В уплотнении используются два зеркально установленных относительно крышки сифона (рис. 3, 1, 2). Верхняя часть верхнего сифона и нижняя часть нижнего сифона закреплены на штоке с помощью крепежных элементов, (рис. 3, 4, 5). Нижняя часть верхнего сифона и верхняя часть нижнего сифона закреплены соответствующими крепежными элементами (рис. 3, 6) на крышке (рис. 3, 3), закрывающей рабочую полость реактора (рис. 3, 7). Здесь также показан зазор, предусмотренный между металлическим штоком и крышкой. В нижний сифон, расположенный внутри реактора, заливается жидкость, объем которой определяется в зависимости от внутреннего давления в рабочей полости и размеров применяемого сифона. Жидкость во внутренней полости уплотнения позволит снизить нагрузки на стенки сифонов от воздействия внутреннего давления в уплотняемой полости, а также под влиянием деформационных усилий, возникающих при движении металлического штока, что препятствует деформации гофр применяемых сифонов и способствует надежному уплотняющему эффекту. Низкая жесткость резины, из которой изготовлены стенки сифонов (гофры), дает возможность существенно снизить потери мощности в предлагаемом уплотнении, что уменьшает общие затраты энергии, потребляемой приводным механизмом [15].

Проведенные лабораторные испытания показали хорошую работоспособность установки в целом. Использование аппарата с эффективным пружинным виброперемешивающим устройством для биохимических процессов позволит выращивать микроорганизмы с достаточно эффективной массопередачей кислорода в рабочую среду при низких энергозатратах и обеспечит надежную герметичность реактора.

#### Разработка лабораторного аппарата для испытания нового уплотнения

Предлагаемая конструкция нового уплотнения была испытана на лабораторном аппарате с виброперемешивающим устройством объемом 3 л. (рис. 4).

В приводе мешалки установлен кривошипно-шатунный механизм с диаметром штока 8 мм. Шток уплотнен предлагаемым двойным сифонным соединением с наружным диаметром

сифонов 26 мм. Сифоны выполнены из резины и в свободном состоянии имеют высоту рабочей части 40 мм, внутренний диаметр гофр 16 мм. В качестве рабочей среды использовались вода и воздух. Перед началом работы в рабочую полость аппарата при открытом вентиле (см. рис. 4, 6), заливалось 2 л воды, после чего вентиль закрывался. Затем включалась в работу вибромешалка с приводом постоянного тока мощностью 40 Вт, позволяющим развивать частоту возвратно-поступательных перемещений от 0 до  $5\text{ с}^{-1}$ , амплитудой колебаний 10 мм, т. е. с максимальным перемещением штока 20 мм. При этом в нижний сифон была залита вода объемом 10 мл. Далее через вентиль (см. рис. 4, 7) подавался воздух с давлением 0,2 МПа. При работающем аппарате проводилось визуальное наблюдение за работой уплотнения через прозрачную стенку обечайки, выполненную из оргстекла.

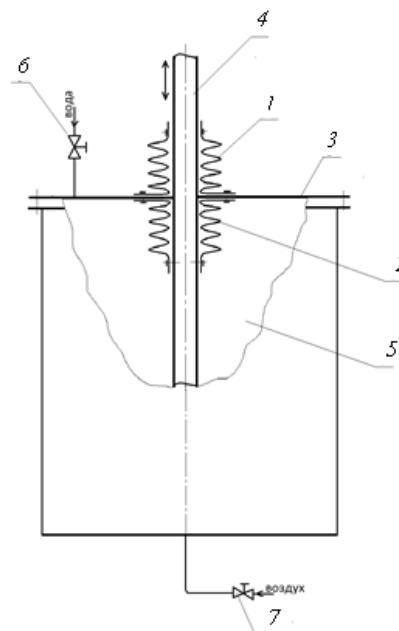


Рис. 4. Лабораторный аппарат с двойным сифонным уплотнением:

1 – верхний сифон; 2 – нижний сифон; 3 – крышка сосуда; 4 – шток; 5 – полость уплотняемого сосуда; 6, 7 – вентиль

#### Заключение

Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность работы предлагаемого нового уплотнительного устройства, доказали, что сифоны, имеющие малую жесткость, благодаря несжимаемости жидкости, перемещающейся внутри них, сохраняют форму гофр и эффективно уплотняют аппарат при сравнительно больших перемещениях штока и малых затратах энергии.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л. : Машиностроение, 1979. 272 с.
2. Радюк П.А., Салькова А.Г., Подоплелов Е.В. Установка для приготовления топливной эмульсии // Сб. науч. тр. молодых ученых и студентов Ангарск. гос. техн. ун-та. 2016. № 1. С. 57–59.
3. Салькова А.Г., Подоплелов Е.В. Герметичные аппараты с механическими мешалками // Сб. науч. тр. Ангарск. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 1. № 1. С. 49–52.
4. Салькова А.Г., Подоплелов Е.В. О герметизации аппаратов с механическими мешалками // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2017. № 1. С. 58–59.
5. Работоспособность перемешивающих устройств при удалении донных отложений из цилиндрических резервуаров / А.Г. Салькова и др. // Современ. технологии и науч.-техн. прогресс. 2015. № 1. С. 66–68.
6. Салькова А.Г., Подоплелов Е.В. Установка для выращивания микроорганизмов // Вестн. Ангарск. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 1. № 1. С. 255–257.
7. А.с. 1134227 СССР. Вибромешалка / А.Г. Салькова, В.Н. Кольчуганов, Н.Н. Кулик ; опубл. 15.01.1985 Бюл. № 2.
8. РД 26.260-008-92. Ферментаторы для производства микробиологического синтеза. Методика расчета основных конструктивных элементов и режимов работ ; введ. 01.01.93.
9. Pat. № 6382633 USA. Shaft seal device using gland packing / Hideto Hashiguchi (Hyogo), Takahisa Ueda (Hyogo). May 7, 2002.
10. Pat. № 3510422 Germany. Sealings between relatively-moving surfaces with stuffing-boxes for elastic or plastic packings with lubricating, cooling or draining means using a lantern ring / Klaus Dipl Ing Koehnen, Adolf Ing Grad Linke, Hans Ing Grad Niermann. March 22, 1985.
11. Pat. № 3280002 USA. Seal for a control rod apparatus / Hutter Ernest, Thomas E Sullivan. October 18, 1966.
12. Pat. № 2431638 European. Sealing device and method / Anders Erik Hjelmberg. Bul. 2012/12.
13. Пат. № 2378533 Рос. Федерация. Сильфонный компрессор с приводом от электрического разряда ; опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1.
14. Пат. № 2298127 Рос. Федерация. Клапан ; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
15. Пат. № 2586233 Рос. Федерация. Двойное сильфонное уплотнение ; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16.

## REFERENCES

1. Vasil'tsov E.A., Ushakov V. G. Apparaty dlya peremeshvaniya zhidkikh sred [Apparatus for mixing liquid media]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1979. 272 p.
2. Radyuk P.A., Sal'kova A.G., Podoplelov E.V. Ustanovka dlya prigotovleniya toplivnoi emul'sii [Installation for the preparation of fuel emulsion]. *Sbornik nauchnykh trudov molodykh uchenykh i studentov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific works of young scientists and students of Angarsk State Technical University], 2016. No. 1, pp. 57-59.
3. Sal'kova A.G., Podoplelov E.V. Germetichnye apparaty s mekhanicheskimi meshalkami [Sealed apparatuses with mechanical mixers]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific works of the Angarsk State Technical University], 2017. No. 1, pp. 49-52.
4. Sal'kova A.G., Podoplelov E.V. O germetizatsii apparatov s mekhanicheskimi meshalkami [About sealing devices with mechanical mixers]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2017. No. 1, pp. 58-59.
5. Sal'kova A.G., Podoplelov E.V. Privezentsev A.Yu., Novopashina M.V. Rabotosposobnost' peremeshivayushchikh ustroystv pri udalenii donnykh otlozhenii iz tsilindricheskikh rezervuarov [Efficiency of mixing devices when removing bottom sediments from cylindrical tanks]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2015. No. 1, pp. 66-68.
6. Sal'kova A.G., Podoplelov E.V. Ustanovka dlya vyrashchivaniya mikroorganizmov [Installation for the cultivation of microorganisms]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Angarsk State Technical University], 2016. Vol. 1, No. 1, pp. 255-257.
7. Sal'kova A.G., Kol'chuganov V.N., Kulik N.N. *Vibromeshalka* [Vibration mixer]. Author's certificate No. 1134227 USSR. Bull. No. 2.
8. RD 26.260-008-92. Rukovodyashchii dokument. Fermentatory dlya proizvodstva mikrobiologicheskogo sinteza [Guidance document. Fermenters for the production of microbiological synthesis].
9. Hashiguchi H. Ueda T. *Shaft seal device using gland packing*. Pat. US No 6382633. May 7, 2002.
10. Koehnen K., Linke A., Niermann H. *Sealings between relatively-moving surfaces with stuffing-boxes for elastic or plastic packings with lubricating, cooling or draining means using a lantern ring*. Pat. DE No 3510422. March 22, 1985.
11. Hutter E., Sullivan T. *Seal for a control rod apparatus*. Pat. US No 3280002. October 18, 1966.
12. Hjelmberg A.E. *Sealing device and method*. Pat. EP No 2431638. Bull. 2012/12.
13. Andrianov A.V., Guzel'baev Ya.Z., Eranov A.P., Suslikov E.V. *Sil'fonnyi kompressor s privodom ot elektricheskogo razryada* [Bellows compressor with an electric discharge drive]. Pat. RF No. 79952. Bull. No. 2.
14. Evsikov V.E. *Klapan* [Valve]. Pat. RF No. 2298127. Bull. No. 12.
15. Sal'kova A.G., Prokop'ev A.A., Podoplelov E.V. *Dvoinoe sil'fonnoe uplotnenie* [Double bellows seal]. Pat. RF No. 2586233. Bull. No. 16.





## Информация об авторах

*Подоплелов Евгений Викторович* – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств», Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: uch\_sovet@angtu.ru

*Дементьев Анатолий Иванович* – к. т. н., доцент, декан технологического факультета, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: andemtev@mail.ru

*Антоненко Иван Юрьевич* – магистрант, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск.

*Корчевин Николай Алексеевич* – д. х. н., профессор, профессор кафедры «Технология электрохимических производств», Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск.

## Authors

*Evgenii Viktorovich Podoplelov* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., head of the Subdepartment of Machines and Apparatus of Chemical Production, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: uch\_sovet@angtu.ru

*Anatolii Ivanovich Dement'ev* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., dean of the Technology Department, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: andemtev@mail.ru

*Ivan Yur'evich Antonenko* – Master's student, Angarsk State Technical University, Angarsk.

*Nikolai Alekseevich Korchevin* – Doctor of Chemical Science, Prof. of the Subdepartment of Electrochemical Production Technology, Angarsk State Technical University, Angarsk.

## Для цитирования

Подоплелов Е. В. Новое высокоэффективное двойное сальфонное уплотнение штоков виброперемешивающих устройств / Е. В. Подоплелов, А. И. Дементьев, И. Ю. Антоненко, Н. А. Корчевин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 14–19. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).14–19

## For citation

Podoplelov E. V., Dement'ev A. I., Antonenko I. Yu., Korchevin N. A. Novoe vysokoeffektivnoe dvoinoe sil'fonnoe uplotnenie shtokov vibroperemeshivayushchikh ustroystv [New high-performance double bellows seal for rods of vibration-mixing devices]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 14–19, DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).14–19

УДК 621.33

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).19–28

## Г. А. Большанин

*Братский государственный университет, г. Братск, Российская Федерация*

*Дата поступления: 05 апреля 2018 г.*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Аннотация.** Передача электрической энергии от места ее генерации до места потребления выполняется с помощью линий электропередачи разного исполнения различных классов напряжения. Оптимизация передачи электрической энергии предполагает, в первую очередь, повышение пропускной способности линий электропередач. Передача электрической энергии обеспечивается падающими и отраженными волнами электромагнитного поля. Их количество зависит от исполнения линии электропередачи. Электрическая энергия от источника потребителю доставляется падающими волнами электромагнитного поля, но потребляется только часть энергии, а другая часть отраженными волнами электромагнитного поля возвращается назад к источнику. Отраженные волны электромагнитного поля уменьшают пропускную способность линий электропередачи, снижают количество и качество электрической энергии. Оптимизация передачи электрической энергии в данном случае предполагает уменьшение амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля. Снижение амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля предполагает решение задачи минимизации функции по одной или нескольким переменным в зависимости от исполнения линий электропередач. Численные значения отраженных волн электромагнитного поля характеризуются соответствующими постоянными интегрирования, поэтому для достижения поставленной цели должны быть определены эти постоянные интегрирования. Для линий электропередач однопроводного исполнения задача минимизации амплитудного значения отраженной волны электромагнитного поля имеет однозначное решение. Здесь эта операция определяется как согласование электрической нагрузки с электрической сетью; для линий многопроводного исполнения поставленная задача имеет неоднозначные решения. Предлагается методика минимизации амплитудных значений отраженных волн электромагнитного поля в линиях электропередач однопроводного, двухпроводного и трехпроводного исполнений.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, отраженная волна, падающая волна, постоянные интегрирования, волновые сопротивления, напряжение, ток, электромагнитное поле.

## Г. А. Bolshinin

*Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation*

*Received: April 05, 2018*

## OPTIMIZATION OF TRANSFER OF ELECTRIC ENERGY