

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 1 (46)
2024



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

Главный редактор журнала
В. И. Лысак — академик РАН,
д-р техн. наук, профессор

Редакционная коллегия:

Е. В. Балакина — д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. В. Баранов — д.ф.-м.н., проф.
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков — д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. Е. Городецкий — д.т.н., проф. ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. В. Дмитриев — д.т.н., проф. КГЭУ,
г. Казань
А. Ю. Дунин — д.т.н., проф. МГТУ
(МАДИ), г. Москва
В. Ф. Желтобрюхов — д.т.н., проф.
ВолгГТУ, г. Волгоград
А. В. Келлер — д.т.н., проф. Московского
политехнического университета, г. Москва
И. А. Коняхин — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
В. В. Коротаев — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов — д.т.н., проф. СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
В. А. Марков — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Е. Р. Мошев — д.т.н., проф. ПНИПУ,
г. Пермь
А. Е. Новиков — чл.-корр. РАН, д.т.н., проф.
ВолгГТУ
Е. А. Федянов — д.т.н., проф. ВолгГТУ
Н. М. Филькин — д.т.н., проф. ИжГТУ
им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск
А. Н. Шилин — д.т.н., проф. ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев — к.т.н., доц., ВолгГТУ
Тел. 8-(8442)24-84-31

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала
по объединенному каталогу
«Пресса России» — 94193
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-08
+7 (8442) 24-84-05
e-mail: zavrio@vstu.ru

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт научно-технический журнал

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

№ 1 (46)
Март
2024

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»
Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 24-80-03
e-mail: lysak2@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Авторское право на журнал в целом принадлежит
Учредителю, на отдельные статьи — сохраняется за авторами

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:
промышленность и транспорт» категорически запрещена без
оформления договора в соответствии с действующим
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго-
и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

Energo- i resursosberezhenie:

Promyshlennost' i transport

(Energy and Resource Saving:
Industry and Transport)
science-technical journal

ISSN 2500-0586

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН N° (ФС77-64543, registration date: 22 January 2016)

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor

Editorial Board:

E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering), Prof.
KSPEU, Kazan
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering), Prof.
MADI, Moscow
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.
Prof. Moscow Poly, Moscow
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering), Prof.
ITMO University, St. Petersburg
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.
SSTU, Saratov
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.
BMSTU, Moscow
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering), Prof.
PNRPU, Perm
A. E. Novikov – Corresponding Member
of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU,
Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.
VSTU, Volgograd
B. T. Filkin – D. Sc. (Engineering), Prof.
ISTU, Izhevsk
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.
Тел. 8-(8442)24-84-31

The journal is distributed by subscription.
Index of the magazine according to the unit-
ed catalog «Press of Russia» – 94193.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/)

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2024

№ 1 (46)
March
2024

FOUNDER:

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Volgograd State Technical University»**

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28. Editor-In-Chief:
tel.: +7 (8442) 23-00-76 e-mail: lysak2@vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

Published by the decision of editorial review board
of Volgograd State Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – retained by the authors***

*Reprint from the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost'
i transport» is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accord-
ance with the current legislation of the Russia Federation*

*When reprint the materials, the citation to the journal «Energo-
i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory*

The articles are published for free

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Баев Д. П. 6	Нго Д. Т. 33
Васильев П. С. 6	Нгуен Ч. З. 33
Голованчиков А. Б. 11, 16	Нефедьев А. И. 26
Доронин Д. А. 16	Новиков А. Е. 6
Дубровская С. А. 21	Потапов П. В. 38, 45
Ермоловский А. В. 21	Прохоренко Н. А. 11
Искалиев А. И. 38, 45	Садманова М. В. 21
Кузнецова Н. С. 33	Тарасова Ю. С. 21
Левшина Е. В. 11	Шеховцов В. В. 38, 45
Ляшенко М. В. 38, 45	Шибитова Н. В. 16
Меренцов Н. А. 11	Энрикес Ш. Я. Э. 45

AUTHOR INDEX

Baev D. P. 6	Nefed'ev A. I. 26
Doronin D. A. 16	Ngo D. T. 33
Dubrovskaya S. A. 21	Nguyen C. Z. 33
Enrikes Sh. Ya. E. 45	Novikov A. E. 6
Ermolovskiy A. V. 21	Potapov P. V. 38, 45
Golovanchikov A. B. 11, 16	Prokhorenko N. A. 11
Iskaliev A. I. 38, 45	Sadmanova M. V. 21
Kuznetsova N. S. 33	Shekhotsov V. V. 38, 45
Levshina E. V. 11	Shibitova N. V. 16
Ljashenko M. V. 38, 45	Tarasova Yu. S. 21
Merentsov N. A. 11	Vasilyev P. S. 6

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Баев Д. П., Новиков А. Е., Васильев П. С.</i> Вопросы ресурсосбережения в технологии производства технического углерода.....	6
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А., Левшина Е. В.</i> Оптимальная установка колец Рашига в насадочной ректификационной колонне.....	11
<i>Шибитова Н. В., Голованчиков А. Б., Доронин Д. А.</i> Экспериментальные исследования центробежного биконусного распределительного устройства для жидкости.....	16
<i>Ермоловский А. В., Дубровская С. А., Тарасова Ю. С., Садманова М. В.</i> Использование методов резервуарной геохимии при оценке ресурсов и запасов углеводородов.....	21
<i>Нефедьев А. И.</i> Исследование электростатического компаратора напряжения.....	26
<i>Кузнецова Н. С., Нго Д. Т., Нгуен Ч. З.</i> Цифровое моделирование динамических процессов в системах релейной защиты.....	33

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Шеховцов В. В., Ляшенко М. В., Потапов П. В., Исканиев А. И.</i> Планетарная передача с упругими шарнирными связями между сектором сателлитного блока и водилом.....	38
<i>В. В. Шеховцов, Ш. Я. Э. Энрикес, М. В. Ляшенко., П. В. Потапов, А. И. Исканиев</i> Технические решения упругих муфт для трансмиссий колесных и гусеничных машин.....	45

CONTENTS

Part I. INDUSTRY

<i>Baev D. P., Novikov A. E., Vasilyev P. S.</i> Issues of resource saving in carbon black production technology.....	6
<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A., Levshina E. V.</i> Optimal installation of rashig rings in a packed rectifying column.....	11
<i>Shibitova N. V., Golovanchikov A. B., Doronin D. A.</i> Experimental studies of centrifugal bicone distribution device for liquids.....	16
<i>Ermolovskiy A. V., Dubrovskaya S. A., Tarasova Yu. S., Sadmanova M. V.</i> The use of reservoir geochemistry methods when assessing hydrocarbon resources and reserves.....	21
<i>Nefed'ev A. I.</i> Research of electrostatic voltage comparator.....	26
<i>Kuznetsova N. S., Ngo D. T., Nguyen C. Z.</i> Digital modeling of dynamic processes in relay protection systems.....	33

Part II. TRANSPORT

<i>Shekhotsov V. V., Ljashenko M. V., Potapov P. V., Iskaliev A. I.</i> Planetary gear with elastic joints between satellite sector block and carrier.....	38
<i>Shekhovtsov V. V., Enrikes Sh. Ya. E., Ljashenko M. V., Potapov P. V., Iskaliev A. I.</i> Technical solutions of elastic couplings for wheeled and tracked vehicles transmissions.....	45

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 661.666.4

Д. П. Баев¹, А. Е. Новиков², П. С. Васильев²

ВОПРОСЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

¹ Волгоградский филиал ООО «Омсктехуглерод»

² Волгоградский государственный технический университет

denispetrovichbaev@mail.ru; ae_novikov@mail.ru; nestorvv@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Андрей Евгеньевич Новиков (ae_novikov@mail.ru)

Повышение эффективности производства технического углерода (техуглерода) главным образом связано с рациональным использованием таких энергетических ресурсов, как сырье, газ, электроэнергия и вода. В статье рассмотрены отдельные аспекты использования тепла аэрозоля техуглерода для подогрева воздуха. Повышение температуры воздуха способствует снижению расходов газа в реакторе и воды для охлаждения аэрозоля, росту производительности реактора по сырью. Для реализации рекуперативного подогрева воздуха, перспективного с экономико-технологических позиций, представляется использование кожухотрубных высокотемпературных теплообменных аппаратов с двухступенчатой системой подогрева. Сравнение значений параметров эксплуатации аппаратов с одноступенчатой системой подогрева фирмы Alstom и с двухступенчатой системой подогрева в производстве техуглерода марки П-324 доказывает эффективность последних. В частности, температура подогрева воздуха на горение увеличивается с 522 до 785 °С, температура в зоне горения возрастает на 11,5 % при экономии расходов газа и воздуха соответственно 13,5 % и 16,4 %, а воды в зону заковки – более 50 %.

Ключевые слова: техуглерод, энергетические ресурсы, ресурсосбережение, рекуперация тепла, подогреватели воздуха.

D. P. Baev¹, A. E. Novikov², P. S. Vasilyev²

ISSUES OF RESOURCE SAVING IN CARBON BLACK PRODUCTION TECHNOLOGY

¹ Volgograd Branch, Omsk Carbon Group OOO

² Volgograd State Technical University

denispetrovichbaev@mail.ru; ae_novikov@mail.ru; nestorvv@mail.ru

Corresponding author: Andrey E. Novikov (ae_novikov@mail.ru)

Increasing the efficiency of carbon black production is mainly associated with the rational use of energy resources such as raw materials, gas, electricity and water. This article discusses separate aspects of using the heat of a carbon black aerosol to heat the air. An increase in air temperature helps to reduce the consumption of gas into the reactor and water for cooling the aerosol, and increases the productivity of the reactor in terms of raw materials. To implement recuperative air heating, it seems promising from an economic and technological point of view to use shell-and-tube high-temperature heat exchangers with a two-stage heating system. A comparison of the operating parameters of devices with a single-stage heating system from Alstom and a two-stage heating system in the production of P-324 carbon black proves the effectiveness of the latter. In particular, the combustion air heating temperature increases from 522 to 785 °C, the temperature in the combustion zone increases on 11,5 % while saving gas and air consumption by 13,5 % and 16,4 %, respectively, and water in the quenching zone – more 50 %.

Keywords: carbon black, energy resources, resource conservation, heat recovery, heaters air.

Технический углерод (техуглерод) широко востребован различными отраслями промышленности при выпуске товарных продуктов, номенклатура и качественные характеристики которых обуславливают необходимость увеличения как объемов его производства, так и расширения ассортимента специальных марок [1; 2]. Увеличение спроса в шинной индустрии, строительном секторе, производстве ре-

зинотехнических изделий в ближайшей перспективе обеспечит темпы роста рынка техуглерода на уровне 3–4 % [3]. Однако применение техуглерода промышленностью не ограничивается, ведутся поисковые исследования по использованию этого высокодисперсного продукта пиролиза углеводородов для рекультивации и повышения плодородия почв [4; 5].

Получение технического углерода реализу-

ется при введении сырья в высокотемпературный поток газа (плазмы). В процессе смешения компонентов и теплообмена сырье быстро разогревается, а температура плазмы снижается. Расход сырья ограничивается доступным количеством тепловой энергии, а его увеличение без изменения теплового потока снижает температуру реакции и качество техуглерода. При этом увеличение количества тепла ограничено техническими параметрами оборудования, используемого в технологии, а также потерями тепла при охлаждении [6; 7].

Основные затраты при производстве техуглерода приходятся на сырье, газ, электроэнергию и воду. Электроэнергия расходуется в компрессорной и нагнетательной станциях для сжатия и подачи воздуха в реактор. Для охлаждения аэрозоля техуглерода безвозвратно расходуется большое количество очищенной воды [8–10]. Поиск путей рационального использования основных и вторичных ресурсов в технологии производства технического углерода, которые определяют его себестоимость и конкурентоспособность, представляет собой цель настоящей работы.

В работе [11] предложено водород, образующийся при пиролизе метана в рассматриваемом производстве, использовать в технологическом процессе синтеза аммиака, а в перспективе и других технологиях связанного азота – азотных минеральных удобрений и иных азотосодержащих веществ. Немаловажным с позиции экологических ограничений является модернизация системы аспирации для более полной утилизации пылящего техуглерода. Здесь перспективным видится замена типовых циклонов на аппараты ВЗП, обеспечивающие повышение эффективности улавливания с 64 % до 92 % [12; 13].

Основным параметром, влияющим на выход техуглерода из сырья, является температура в зоне горения реактора. Чем выше температура газов в зоне горения, тем меньше требуется дополнительного тепла, получаемого за счет сжигания части сырья, на проведение процесса разложения углеводородов. При повышении температуры в камере горения реактора с 1600 до 1800 °С выход активных марок техуглерода возрастает до 4 % [14].

Однако температура в камере горения реактора напрямую связана с допустимой температурой применяемых огнеупоров и их стоимостью. Основные требования, предъявляемые к огнеупорам – высокие огнеупорность (устойчивость к воздействию высоких температур) и термостойкость (устойчивость к резким колебаниям температур). Этим требованиям отвечают высокоглиноземистые огнеупоры с содержанием оксида алюминия более 90 %. При содержании Al_2O_3 99 % процесс может осуществляться при температуре 1925 °С. Огнеупоры из хромистого корунда и оксида циркония, стабилизированного оксидом натрия, выдерживают температуру, превышающую 2000 °С, но имеют более высокую стоимость [15].

Температура подогрева воздуха является вторым по значимости фактором повышения эффективности процесса. При подогреве воздуха используется физическое тепло аэрозоля, выходящего из реактора (рекуперативный подогрев). С повышением температуры воздуха уменьшается расход газа в реакторе и расход воды для охлаждения аэрозоля, что позволяет увеличить производительность реактора по сырью и выход техуглерода на единицу затрачиваемого сырья (рис. 1). Если для непосредствен-

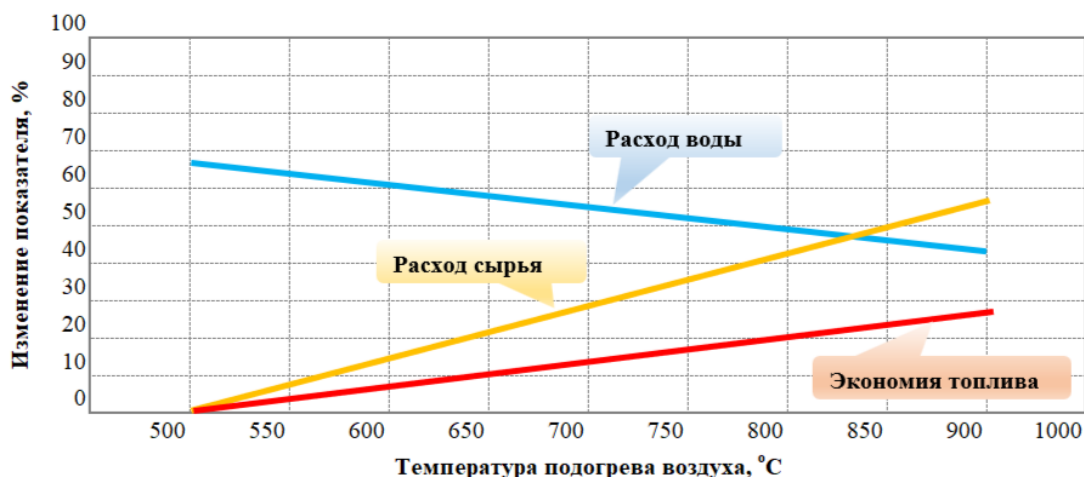


Рис. 1. Влияние температуры подогрева воздуха на затраты ресурсов

ного получения техуглерода расходуется около 70 % всего природного газа, затрачиваемого на производстве, то при повышении температуры подогрева воздуха с 500 до 900 °С экономия газа составит более 17 %.

Некоторые зарубежные фирмы, например Alstom, предлагают теплообменные аппараты, позволяющие повысить температуру нагрева воздуха до 900 °С и выше (рис. 2, а). В подогревателе используется противоточная схема движения газов и нагреваемого воздуха. Часть холодного воздуха подается для охлаждения

нижней трубной решетки – наиболее теплонапряженного элемента воздухоподогревателя. Затем этот воздух по отдельной трубе выводится в верхнюю часть подогревателя, куда противотоком подается основное количество воздуха. Нижняя трубная доска в месте входа углеводородной смеси торкретируется огнеупорным бетоном. Диаметр труб подогревателя составляет ≈ 80 мм. Следует отметить, что во избежание заноса труб техуглеродом на зарубежных заводах в воздухоподогревателях не применяются трубы диаметром менее 50 мм [14; 15].

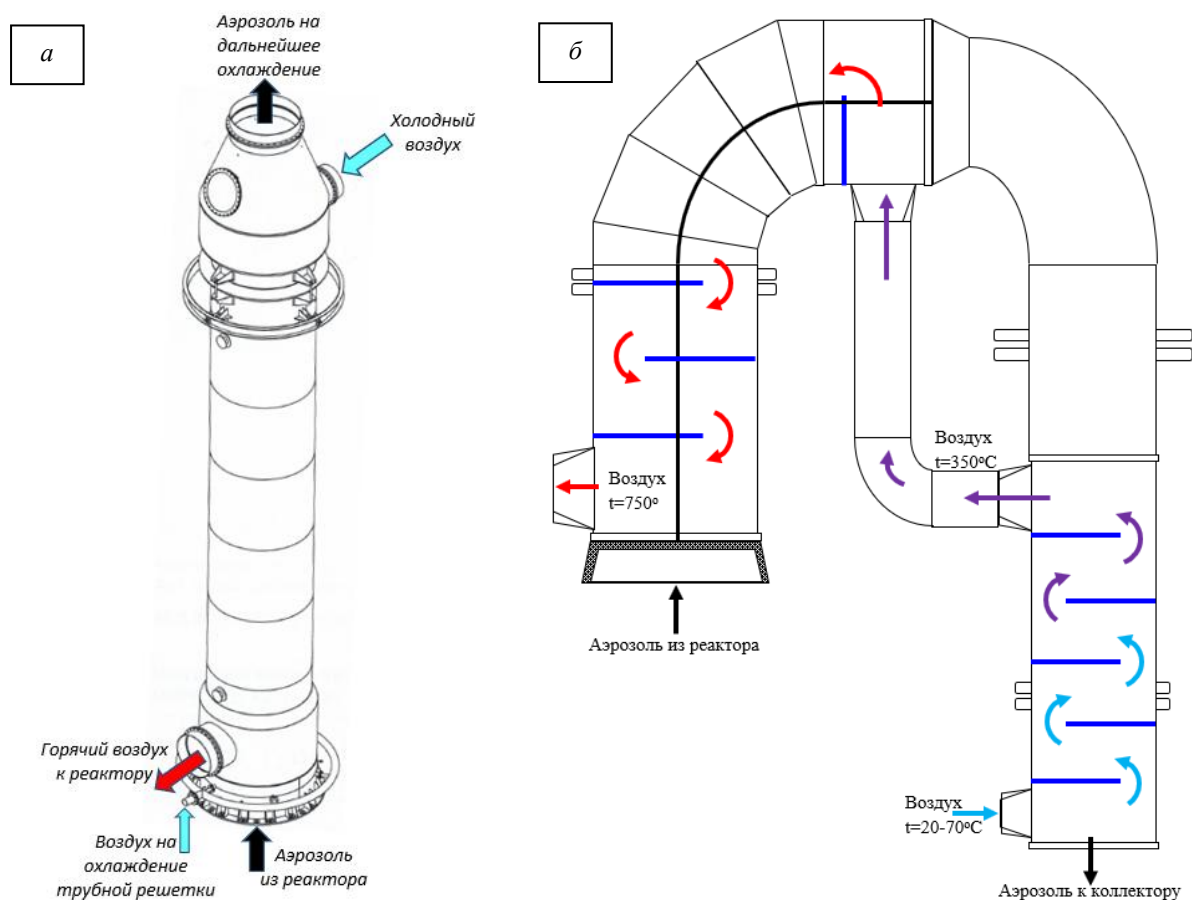


Рис. 2. Подогреватели с одноступенчатой (а) и двухступенчатой (б) системой нагрева воздуха

Однако целесообразность применения таких воздухоподогревателей вызывает определенные сомнения. На этих аппаратах используются дорогостоящие жаропрочные стали с содержанием хрома 25 % и никеля 20 %, окупаемость которых (с учетом цены на газ) превышает нормативный срок эксплуатации, а простота температуры подогрева воздуха до 100 °С не компенсирует понесенные затраты.

Экономически целесообразно использование подогревателей с двухступенчатой системой нагрева воздуха (рис. 2, б), как это реализовано на отечественных заводах, где на первой

ступени применяются общепринятые в отрасли стали с меньшим содержанием хрома и никеля, а на второй – жаропрочные стали, работающие при температурах до 1000 °С. По результатам опыта промышленной эксплуатации высокотемпературных подогревателей воздуха низкого давления (рис. 2, б) при производстве техуглерода марки П-324 доказано, что повышение температуры подогрева воздуха позволило не только уменьшить расход газа, воздуха и воды, подаваемых в реактор при сопоставимых нагрузках по сырью, но и повысить температуру в зонах горения реактора (см. таблицу).

**Параметры процесса производства техуглерода
при одноступенчатой и двухступенчатой системе подогрева воздуха**

Параметры процесса	Значение параметров		
	до модернизации	после модернизации	% к базовому исполнению
Расход:			
– сырья, кг/ч	4055	4000	98,65
– газа, нм ³ /ч	942	815	86,51
– воздуха, нм ³ /ч	13630	11400	83,64
– воды (зона предзакалки), кг/ч	1400	1690	120,7
– воды (зона закалки), кг/ч	4350	1990	45,75
Температура, °С:			
– в зоне горения	1638	1827	111,54
– в зоне реакции	1486	1500	100,94
– подогрева воздуха на горение	522	785	150,38
Соотношение:			
– воздух / газ, м ³ /м ³	14,5	13,99	96,48
– воздух / сырье, м ³ /кг	3,36	2,85	85,58

Двухступенчатая система подогрева (рис. 2, б) позволяет нагревать воздух до 750 °С при температуре аэрозоля на входе 900 °С. Холодный воздух поступает в кожухотрубный подогреватель первой ступени противотоком, где нагревается до 300–350 °С, далее, пройдя через воздухоподогреватель второй ступени, нагревается до температуры 700–750 °С и направляется в зону горения реактора. Аэрозоль техуглерода из реактора после зоны закалки с температурой 880–900 °С охлаждается и выходит с температурой 650–700 °С. Компоновка первой ступени выполнена из условия обеспечения температуры стенок не ниже 225 °С в целях предотвращения налипания на них техуглерода.

Контроль за работой двухступенчатых воздухоподогревателей позволяет своевременно выявить начало образования отложений техуглерода на стенках труб и принять меры по их очистке продувкой на режиме полного горения. Следует отметить, что закупорка труб подогревателей остается серьезной проблемой в производстве техуглерода. На зарубежных заводах для очистки труб воздухоподогревателей применяют специальные паровые обдувочные аппараты.

В настоящее время разработаны системы, позволяющие более чем на 90 % использовать тепловую энергию аэрозоля, образующегося при получении техуглерода, и энергию отходящих газов, содержащих горючие составляющие (СО и Н₂).

На отдельных заводах вода в зону закалки практически не подается. Предварительная закалка осуществляется за счет отбора тепла так называемым закалочным паровым котлом, установленным непосредственно в зоне предварительной закалки (рис. 3). Температура реакционной смеси в этой зоне понижается от 1600–1700 °С до 1300 °С.

При такой температуре углеродгазовая смесь подается в воздухоподогреватель, изготовленный из жаропрочной стали, обеспечивая нагрев воздуха в нем до 800–900 °С. Далее поток направляется в еще один котел-утилизатор, затем – в подогреватель сырья и в подогреватель топлива. Очищенные в рукавном фильтре отходящие газы частично осушаются в скруббере, орошаемом водой, и подаются для сжигания в паровые котлы и топку камеры обжига сушильного барабана. Пар от основных котлов и котлов-утилизаторов, установленных в потоке, используется для выработки электроэнергии и для теплофикационных целей. При этом часть электрической и тепловой энергии отпускается на внешнее потребление.

Существенное влияние на эффективность процесса получения техуглерода оказывает рекуперативный подогрев сырья и природного газа. При рекуперативном подогреве сырья до 400 °С в процесс возвращается до 6 % тепла, аккумулированного воздухом из аэрозоля, выходящего из реактора. Подогрев природного газа ведет к уменьшению его расхода в реактор и увеличению нагрузки реактора по сырью.

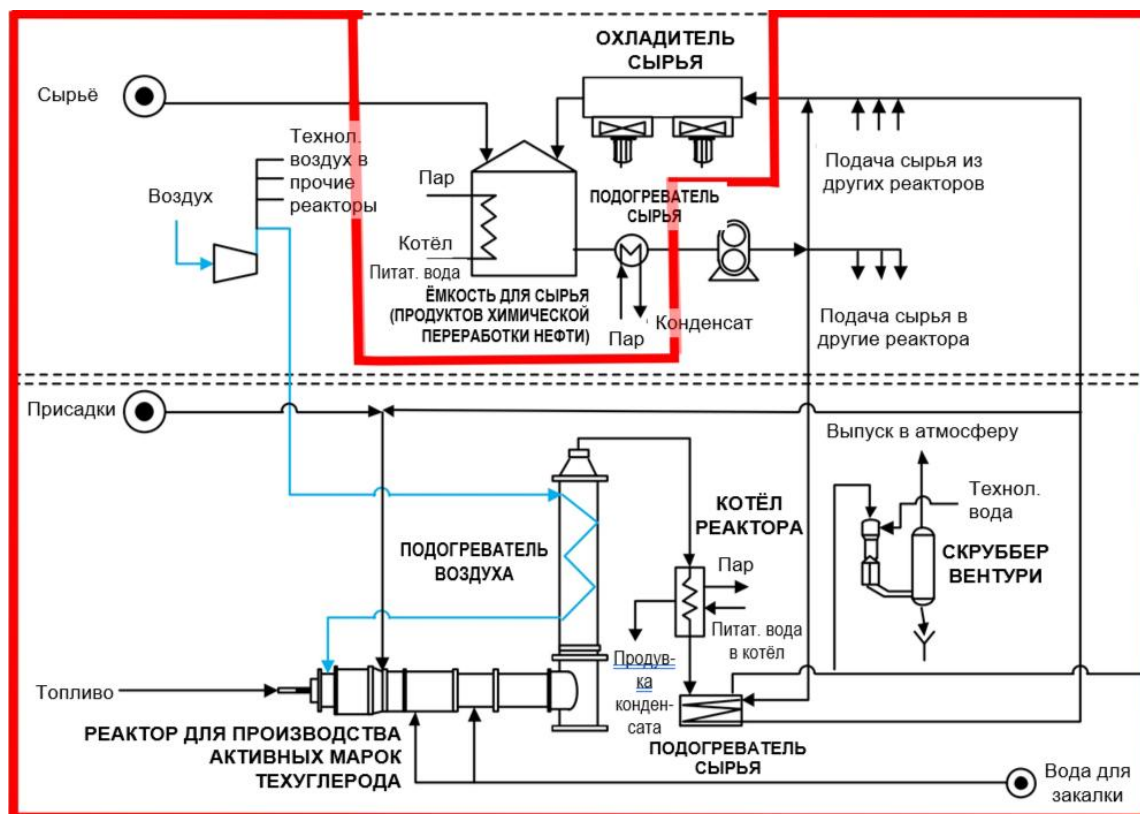


Рис. 3. Схема технологического потока с энергоэффективным оборудованием

Одним из перспективных направлений повышения технико-экономических показателей процесса получения техуглерода является обогащение воздуха кислородом. Увеличение содержания кислорода в воздухе, подаваемом в реактор, позволяет уменьшить расход топлива, повысить производительность реактора, существенно снизить объем образующихся продуктов реакции за счет уменьшения содержания в них балластного азота и повысить теплотворную способность отходящих газов. По мнению некоторых производителей техуглерода (исключительно с энергетической точки зрения), нужно рассмотреть возможность перехода на использование вместо воздуха 100 % кислорода.

Таким образом, научно-технические разработки и опыт промышленной эксплуатации оборудования в технологии технического углерода свидетельствуют о больших резервах повышения эффективности его производства при рациональном использовании физического и химического тепла продуктов реакции в основном процессе. При рекуперативном нагреве технологических агентов значительно снижается содержание влаги в отходящих газах, повышается их теплота сгорания и максимальная температура горения, что позволяет осуществ-

лять сжигание отходящих газов в топках котлов без применения вспомогательного топлива. Снижение влагосодержания углеродгазовой смеси также положительно сказывается и на работе оборудования основного улавливания техуглерода, так как при этом уменьшается объем очищаемых газов и значительно снижается вероятность конденсации влаги в рукавных фильтрах и газоходах, по которым транспортируются газы в котельные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инновационные направления расширения ассортимента технического углерода в России / Г. В. Моисеевская, Г. И. Раздьяконова, А. А. Петин, Н. П. Обвинцева, В. А. Лихолобов // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2017. – Т. 25, № 1. – С. 49–56.
2. Борозняк, И. Г. Производство технического углерода / И. Г. Борозняк. – Москва: Химия, 1981. – 192 с.
3. Гюльмисарян, Т. Г. Технический углерод в предстоящие годы // Т. Г. Гюльмисарян, И. П. Левенберг // *Технологии нефти и газа*. – 2018. – № 3 (116). – С. 3–8.
4. Новые направления использования технического углерода. Повышение плодородия почв / Г. И. Раздьяконова, В. А. Лихолобов, Л. В. Березин, О. А. Хамова // *Каучук и резина*. – 2013. – № 5. – С. 16–18.
5. Новые направления использования технического углерода. Рекультивация нефтезагрязненных почв / Г. И. Раздьяконова, Л. И. Сваровская, В. А. Лихолобов, Л. К. Алтунина // *Каучук и резина*. – 2013. – № 6. – С. 14–16.

6. Зуев, В. П. Производство сажи / В. П. Зуев, В. В. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Химия, 1965. – 328 с.
7. Гюльмисарян, Т. Г. Технический углерод: морфология, свойства, производство / Т. Г. Гюльмисарян, В. М. Капустин, И. П. Левенберг. – Москва: Каучук и резина, 2017. – 586 с.
8. Долотовский, И. В. Энерготехнологическое комбинирование в системах утилизации низконапорных углеводородных газов / И. В. Долотовский, А. И. Попов, К. Г. Ушаков // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12–1. – С. 58–62.
9. Гюльмисарян, Т. Г. Энерготехнологический аспект совершенствования производства технического углерода / Т. Г. Гюльмисарян // Технологии нефти и газа. – 2010. – № 6 (71). – С. 17–23.
10. Долотовский, И. В. Производство технического углерода и энергоносителей из низконапорных углеводородных газов / И. В. Долотовский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 22–24.
11. Перспективы использования водорода, образующегося при пиролизе метана, для производства аммиака / А. Б. Голованчиков, В. А. Козловцев, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 4 (41). – С. 13–16.
12. Васильев, П. С. Модернизация систем улавливания и аспирации производства пылящего технического углерода / П. С. Васильев, Е. Г. Баклаушева // Химическая безопасность. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 212–215. DOI: 10.25514/CHS.2020.2.18015.
13. Шагарова, А. А. Анализ работы инерционных пылеуловителей в производстве технического углерода / А. А. Шагарова, И. С. Иванова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 2 (39). – С. 16–22.
14. Ивановский, В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты: учеб. пособие / В. И. Ивановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Омск: Бланком, 2019. – 254 с.
15. Ивановский, В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Дополнительные материалы / В. И. Ивановский. – Омск: Самиздат, 2018. – 100 с.

УДК 66.048.3.069.833

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, Е. В. Левшина

ОПТИМАЛЬНАЯ УСТАНОВКА КОЛЕЦ РАШИГА В НАСАДОЧНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ

Волгоградский государственный технический университет

9275170082@mail.ru; natasha292009@yandex.ru; steeple@mail.ru; l.levshina@list.ru

Автор, ответственный за переписку: Наталья Андреевна Прохоренко (natasha292009@yandex.ru)

На основании проведенных расчетов насадочной ректификационной колонны для разделения бинарной смеси «гексан – гептан» с кольцами Рашига, выполненными из разных материалов с различными геометрическими размерами, выбраны элементы насадок, обеспечивающие наименьшую годовую стоимость эксплуатации колонны с учетом капитальных затрат, затрат на энергоносители (пар, электроэнергия) и оборотные средства (зарплата, накладные расходы и налоги). Проведены дополнительные расчеты для выбранных насадок с варьированием порозности и удельной поверхности в зависимости от максимальной плотности упорядоченной треугольной укладки колец Рашига до минимальной плотности укладки по вершинам квадратов. Показано, что для заданной бинарной смеси экономически целесообразно выбрать керамическую насадку из колец Рашига с размерным рядом $15 \times 15 \times 2$ мм или стальную с размерным рядом $10 \times 10 \times 0,5$ мм, причем годовая стоимость эксплуатации на стальных кольцах по сравнению с керамическими снижается на 7,5 %.

Ключевые слова: кольца Рашига, насадка, ректификационная колонна, порозность, удельная поверхность, годовая стоимость эксплуатации.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, N. A. Merentsov, E. V. Levshina

OPTIMAL INSTALLATION OF RASHIG RINGS IN A PACKED RECTIFYING COLUMN

Volgograd State Technical University

9275170082@mail.ru; natasha292009@yandex.ru; steeple@mail.ru; l.levshina@list.ru

Corresponding author: Natalia A. Prokhorenko (natasha292009@yandex.ru)

Based on the calculations of a packed distillation column for separating a binary mixture of «hexane – heptane» with Ranching rings made of different materials and with different geometric dimensions, packing elements were selected that provide the lowest annual cost of operating the column, taking into account capital costs and energy costs (steam, electricity) and working capital (salaries, overheads and taxes). Additional calculations were carried out for selected packing's with varying porosity and specific surface area depending on the maximum density of the ordered triangular arrangement of Ranching rings to the minimum density of arrangement in squares. It is shown that for a given binary mixture it is economically feasible to choose a ceramic nozzle from Ranching rings with a size range of $15 \times 15 \times 2$ mm or a steel one with a size range of $10 \times 10 \times 0.5$ mm, and the annual cost of operation on steel rings compared to ceramic ones is reduced by 7,5 %.

Keywords: Raschig rings, packing, distillation column, porosity, specific surface area, annual operating cost.

Насадочные колонны в массообменных процессах абсорбции, ректификации и экстракции широко используются из-за простоты конструкции и эксплуатации. Широкий спектр материалов, геометрических форм и размеров элементов насадок, применяемых в качестве контактных устройств в этих колоннах, но в основном базовыми насадками остаются кольца Рашига [1–5]. Они несложны в изготовлении, подготовке к работе и обслуживании в основном технологическом процессе.

Наиболее простой способ укладки колец Рашига – хаотичная укладка или укладка внавал. Но этот способ не обеспечивает одинаковую порозность и удельную поверхность для одинаковых по материалу и размерам колец Рашига. Поэтому экспериментальные табличные значения порозности и удельной поверхности задают в виде диапазона этих параметров.

Например, для керамических колец Рашига размером $25 \times 25 \times 3$ мм, загруженных внавал, удельная поверхность варьируется в пределах $\sigma = 190\text{--}220 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а порозность $\varepsilon = 0,68\text{--}0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [5, стр. 30]; для металлических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 0,5$ мм – соответственно $\sigma = 350\text{--}378 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $\varepsilon = 0,917\text{--}0,92 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [5, стр. 31].

То же касается и хаотичной укладки элементов насадки сложной формы. Так, для седел Берля № 13 удельная поверхность лежит в диапазоне $\sigma = 465\text{--}545 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а порозность $\varepsilon = 0,62\text{--}0,68 \text{ м}^3/\text{м}^3$; для седел Берля № 25 – соответственно $\sigma = 235\text{--}260 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $\varepsilon = 0,68\text{--}0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Для металлических колец Палля размером $35 \times 35 \times 0,8$ мм удельная поверхность изменяется в пределах $\sigma = 139\text{--}170 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а порозность $\varepsilon = 0,9\text{--}0,965 \text{ м}^3/\text{м}^3$; для колец Палля размером $50 \times 50 \times 1$ мм – соответственно $\sigma = 108\text{--}115 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $\varepsilon = 0,95\text{--}0,951 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [6, стр. 35–36].

Другой, более сложный и длительный способ – упорядоченная укладка колец Рашига в ряды. Для него табличные параметры σ и ε принимают фиксированные значения за исключением размера $50 \times 50 \times 5$ мм: $\sigma = 110\text{--}120 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $\varepsilon = 0,72\text{--}0,735 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [5, стр. 188].

Правильный выбор основных геометрических параметров насадок ректификационных колонн обеспечивает минимальную себестоимость разделения исходных смесей, определяемую как сумму капитальных затрат, себестоимости энергоносителей (пар и электроэнергия) и оборотных средств (зарплаты и накладные расходы), приходящуюся на единицу продукции. Основные геометрические характеристики насадки существенно влияют на высоту и диаметр колонны, а значит в целом на ее объем.

Рабочая скорость в насадочной колонне, соответствующая скорости эмульгирования, определяется в виде [1–4]:

$$\omega_p = 0,8 \cdot \omega_3,$$

а скорость захлебывания ω_3 является составной частью формулы:

$$\lg C = A - B \cdot \left(\frac{L}{G} \right) \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,125},$$

$$\text{где } C = \frac{\omega_3^2}{g \cdot d_s} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_{H_2O}} \right)^{0,16} \text{ и } d_s = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{\sigma} - \text{эк-}$$

вивалентный диаметр насадки, а коэффициенты A и B выбираются по таблице в зависимости от материала и геометрических размеров насадки.

То же касается и высоты насадки в насадочной ректификационной колонне, также существенно зависящей от значений параметров σ и ε . Общая высота насадки:

$$H = h \cdot \text{ЧЕП},$$

где h – высота насадки, соответствующая одной единице переноса, равная для режима эмульгирования

$$h = 200 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \right)^{1,2} \cdot \frac{1}{\omega_p^{0,4}}; \text{ ЧЕП} = \int \frac{dy}{y^* - y} -$$

число единиц переноса с пределами интегрирования для укрепляющей части от y_f до y_d и для исчерпывающей части от y_k до y_f (зависит от оптимального флегмового числа).

Таким образом, параметры σ и ε влияют на геометрические размеры колонны, а значит на капитальные затраты, затраты на пар и электроэнергию и на оборотные средства.

Однако до настоящего времени из существующего спектра размеров насадок, например колец Рашига, выбирали какую-то одну триаду «наружный диаметр – высота – толщина» кольца, не рассматривая при этом возможность установки колец разными способами, для которых основные геометрические характеристики упорядоченной насадки σ и порозностью ε принимают разные значения.

Известны различные способы упорядоченной укладки колец Рашига в ряды (рис. 1) [7].

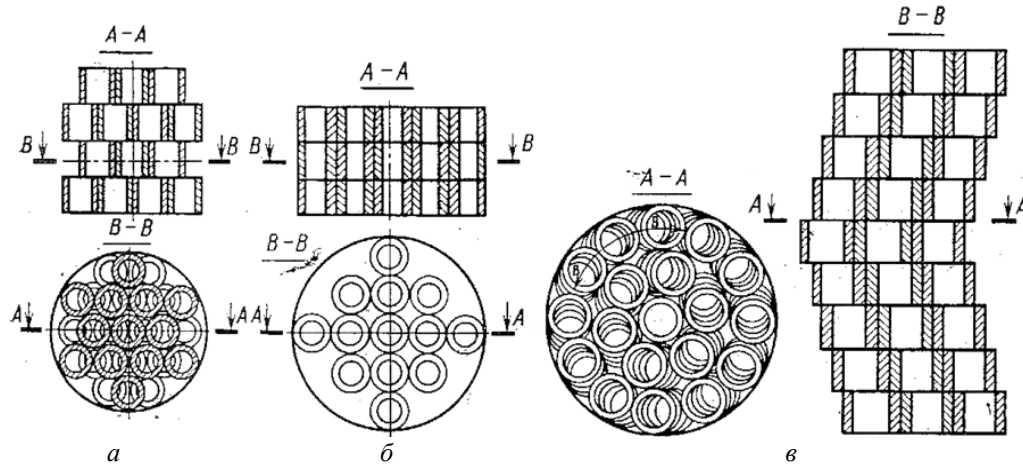


Рис. 1. Способы регулярной укладки колец в контактных аппаратах [7]:

a – шахматный порядок со сдвигом на полдиаметра кольца; *б* – шахматный порядок со сдвигом на диаметр кольца; *в* – шахматный порядок со сдвигом на толщину стенки кольца и изменением направления сдвига по зигзагообразной спирали

Авторами настоящей работы теоретически выведена формула связи порозности и удельной поверхности для насадочных тел любой формы:

$$\frac{\sigma}{1-\varepsilon} = \frac{f_1}{V_1}, \quad (1)$$

где f_1 и V_1 – соответственно поверхность и объем одного элемента насадки.

Кольца Рашига можно укладывать максимально плотно друг к другу – по вершинам треугольников (рис. 2, *a*) и минимально плотно друг к другу – по вершинам квадратов (рис. 2, *б*).

Уравнение (1) для колец Рашига с высотой H , равной наружному диаметру d , и толщиной стенки δ при максимально и минимально плотной укладке (рис. 2, *a*) приводится к виду:

$$\sigma = 2 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{\delta}{d}\right) / \delta. \quad (2)$$

При максимально плотной укладке (рис. 2, *a*) площадь треугольника при $H = d$:

$$S_{\Delta} = 0,5 \cdot d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot d = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot d^2,$$

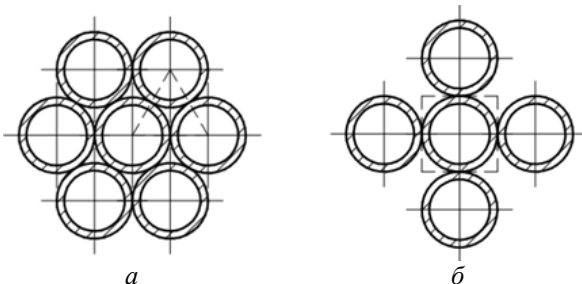


Рис. 2. Упорядоченная плотная укладка колец Рашига (пунктиром показаны фигуры, образующие период площади укладки):

a – по вершинам квадратов; *б* – по вершинам треугольников

а для площади элементов насадки в этом треугольнике:

$$S_k = 3 \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [d^2 - (d - 2 \cdot \delta)^2].$$

Порозность внутри треугольника, равная порозности самой насадки, может быть записана в виде:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{S_{\Delta} - S_k}{S_{\Delta}} = 1 - \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\delta}{d} \cdot \left[1 - \frac{\delta}{d}\right]. \quad (3)$$

При минимально плотной укладке (рис. 2, *б*) при $H = d$ площадь квадрата равна $S_{\text{кв}} = d^2$, а площадь твердой части (само кольцо) внутри

этого квадрата – $S_k = \frac{\pi \cdot d^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d - 2 \cdot \delta)^2}{4}$.

Тогда максимальная порозность:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{S_{\text{кв}} - S_k}{S_{\text{кв}}} = 1 - \pi \cdot \frac{\delta}{d} \cdot \left[1 - \frac{\delta}{d}\right]. \quad (4)$$

Для колец Рашига размером $25 \times 25 \times 3$ мм расчеты по формулам (3) и (4) приводят к следующим значениям: порозности $\varepsilon_{\min} = 0,617 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $\varepsilon_{\max} = 0,668 \text{ м}^3/\text{м}^3$, удельной поверхности $\sigma_{\max} = 286 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $\sigma_{\min} = 247,9 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Расчеты подтверждают, что в зависимости от плотности укладки колец Рашига в ряды их порозность и удельная поверхность могут изменяться в пределах 7–9 %.

В принципе возможно увеличивать порозность по сравнению с рассчитываемой по формуле (4), устанавливая кольца упорядоченно без контакта их боковых поверхностей друг с другом. Для этого в боковой поверхности каждого кольца выше центра тяжести необходимо просверлить отверстия и нанизать их на металлическую проволоку или полимерную нить

в виде гирлянд с зазорами по высоте насадок [8]. Это позволит еще больше увеличить порозность и уменьшить удельную поверхность с возможностью колебаний колец Рашига.

С целью определения оптимальных величин порозности и удельной поверхности колец Рашига были проведены расчеты ректификационной насадочной колонны для бинарной смеси «гексан – гептан» по алгоритму, описанному

в монографии [9] и статьях [10; 11] с помощью программы для ЭВМ [12].

В табл. 1 представлены результаты расчетов для стальных и керамических колец Рашига с изменением и возможным диапазоном изменения порозности по сравнению с табличными значениями [5; 6], получаемыми оптимальными значениями флегмового числа R и общей годовой стоимости эксплуатации колонны.

Таблица 1

Расчеты оптимальной порозности ε и удельной поверхности σ для типовых колец Рашига при расчетах ректификационной смеси «гексан – гептан»

Тип и размер колец Рашига		Порозность ε , м ³ /м ³	Удельная поверхность σ , м ² /м ³	Флегмовое число R	Общая стоимость затрат u , млн руб.
Стальные	10×10×0,5	0,9	420	1,21	4,60
		0,88	504	1,17	4,47
		0,85	630	1,14	4,35
	15×15×0,5	0,94	248	1,32	5,41
		0,92	330	1,25	4,92
		0,9	413	1,21	4,64
	50×50×1	0,97	61	1,78	11,68
		0,95	102	1,62	8,30
		0,92	163	1,44	6,39
Керамические	15×15×2	0,76	272	1,28	4,99
		0,74	295	1,25	4,85
		0,72	317	1,21	4,75
		0,71	329	1,21	4,70
	25×25×3	0,74	194	1,36	5,53
		0,72	209	1,32	5,35
		0,7	224	1,32	5,20
	35×35×4	0,78	123	1,49	6,89
		0,75	139	1,44	6,38
		0,72	156	1,4	6,00

В табл. 2 приведены основные геометрические размеры и технологические параметры ректификационной колонны для лучших значений порозности и удельной поверхности упорядоченных колец Рашига с точки зрения минимизации годовых затрат на эксплуатацию колонны (по данным табл. 1).

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) для каждой схемы упорядоченной укладки колец Рашига необходимо выбрать наименьшие по размерам кольца и устанавливать

их упорядоченно с минимальной порозностью и максимальной удельной поверхностью;

2) при разделении бинарной смеси «гексан – гептан» наименьшая годовая стоимость эксплуатации насадочной ректификационной колонны соответствует упорядоченной установке стальных колец Рашига размером 10×10×0,5 мм или керамических колец Рашига размером 15×15×2 мм, при этом колонна со стальными кольцами уменьшает годовую стоимость эксплуатации по сравнению с керамическими кольцами на 7,5 %;

Таблица 2

Геометрические параметры для ректификационной колонны

Тип колец	Стальные			Керамические		
	10×10×0,5 мм	15×15×0,5 мм	50×50×1,0 мм	15×15×2,0 мм	25×25×3,0 мм	35×35×4,0 мм
Порозность ε , м ³ /м ³	0,85	0,9	0,92	0,71	0,7	0,72
Удельная поверхность σ , м ² /м ³	630	413	163	329	224	156
Флегмовое число R	1,14	1,21	1,44	1,21	1,32	1,4
Общая стоимость затрат u , млн руб.	4,35	4,64	6,39	4,70	5,20	6,00
Диаметр укрепляющей части колонны D_{ky} , м	1,04	0,79	0,69	0,90	0,82	0,73
Высота укрепляющей части колонны H_{ky} , м	1,74	5,4	9,73	3,19	4,9	7,94
Объем укрепляющей части колонны V_{ky} , м ³	1,5	2,6	3,6	2	2,6	3,3
Диаметр исчерпывающей части колонны D_{ki} , м	1,3	0,96	0,83	1,12	1	0,89
Высота исчерпывающей части колонны H_{ki} , м	1,8	5,3	9,1	3,2	4,8	7,5
Объем исчерпывающей части колонны V_{ki} , м ³	2,4	3,8	4,9	3,1	3,7	4,6
Высота колонны H_k , м	7,1	13,4	21,1	9,4	12,4	17,9
Объем колонны V_k , м ³	3,9	6,4	8,5	5,2	6,3	7,9

3) для ректификационной колонны с насадкой из упорядоченных колец Рашига размером 10×10×0,5 мм, имеющей порозность $\varepsilon = 0,85$ м³/м³ и удельную поверхность $\sigma = 630$ м²/м³, оптимальное флегмовое число составляет 1,14, диаметры укрепляющей и исчерпывающей частей колонны – 1,04 м и 1,30 м соответственно, высота насадки в укрепляющей и исчерпывающей частях – 1,75 м и 1,82 м соответственно, объем загружаемой в колонну насадки 3,9 м³, а годовая стоимость эксплуатации аппарата – 4,35 млн рублей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины и аппараты химических и пищевых производств : учебник для вузов / А. С. Тимонин [и др.]; под ред. А. С. Тимониной – Калуга: Ноосфера, 2014. – 856 с.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва: Альянс, 2013. – 576 с.
3. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 10-е изд. стереотип., доработ. – Москва: Альянс, 2004. – 753 с.
4. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд. – Москва: Альянс, 2008. – 496 с.
5. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол. – Москва, 2009. – 298 с.
6. Лаптев, А. Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями: монография / А. Г. Лаптев, Т. М. Фарахов, О. Г. Дударовская. – Санкт-Петербург: Страта, 2016. – 214 с.
7. Процессы и аппараты нефте-газопереработки и нефтехимии: учебник для вузов / А. И. Скобло [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра – Бизнес центр, 2000. – 677 с.
8. Пат. 178079 Российская Федерация, МПК В01J19/00. Насадочная колонна / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, П. П. Залипаев, А. А. Коберник, В. А. Москаленко, Ш. М. Масука; ВолгГТУ. – 2018.
9. Голованчиков, А. Б. Моделирование ректификационных и экстракционных процессов с учетом структуры потоков: монография / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, К. В. Черикова. – Волгоград, 2018. – 147 с.
10. Голованчиков, А. Б. Моделирование процесса в насадочной ректификационной колонне с диффузионной структурой потока по жидкой фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 14 (178) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 8–12.
11. Повышение точности при аппроксимации табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей / А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева, А. С. Остроухова, А. А. Решетников // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(84) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 9–11.
12. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 20211661377 от 09.07.2021 г. Российская Федерация. Программа для расчета насадочной ректификационной колонны непрерывного действия / А. Б. Голованчиков, Н. В. Шибитова, Н. А. Прохоренко, К. В. Черикова; ВолгГТУ. – 2021.

УДК 66.021.3

*Н. В. Шибитова, А. Б. Голованчиков, Д. А. Доронин***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО БИКОНУСНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЖИДКОСТИ****Волгоградский государственный технический университет**

novnv27@mail.ru; 9275170082@mail.ru; Doronin.D.A@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Наталия Валентиновна Шибитова (novnv27@mail.ru)

В работе приведены результаты экспериментальных исследований центробежного биконусного распределительного устройства жидкости для массообменных насадочных колонн, эффективность работы которых зависит от распределения жидкой фазы по поверхности насадки. Разработанная конструкция распределителя жидкости учитывает основные достижения в технике распыления и капельного орошения, отраженные в обзоре работ по исследованию статических и динамических распределителей жидкости отечественных и зарубежных авторов. Важным фактором данной работы является двухступенчатое взаимодействие жидкой и газовой (паровой) фаз при вылете капель жидкости из отверстий биконусного распределителя в объем колонного аппарата и на поверхность насадки, причем вращение биконусного диспергатора осуществляется энергией входного потока. Результаты исследований могут быть применены при проектировании распределительных устройств для заданного количества фаз, диаметра массообменного аппарата, свойств жидкости, высоты расположения отверстий над поверхностью насадки и траектории полета капель.

Ключевые слова: исследование, центробежное распределительное устройство, орошение, распределение жидкости, массообмен, энергозатраты.

*N. V. Shibitova, A. B. Golovanchikov, D. A. Doronin***EXPERIMENTAL STUDIES OF CENTRIFUGAL BICONE DISTRIBUTION DEVICE FOR LIQUIDS****Volgograd State Technical University**

novnv27@mail.ru; 9275170082@mail.ru; Doronin.D.A@yandex.ru

Corresponding author: Natalia V. Shibitova (novnv27@mail.ru)

The paper presents the results of experimental studies of a centrifugal bicone liquid distribution device for mass transfer packed columns, the efficiency of which depends on the distribution of the liquid phase over the surface of the packing. The developed design of the liquid distributor takes into account the main achievements in the technology of spraying and drip irrigation, reflected in the review of works on the study of static and dynamic liquid distributors by domestic and foreign authors. An important factor in this work is the two-stage interaction of the liquid and gas (vapor) phases when liquid drops escape from the holes of the bicone distributor into the volume of the column apparatus and onto the surface of the nozzle, and the rotation of the bicone dispersant is carried out by the energy of the input flow. The research results can be used in the design of distribution devices for a given number of phases, the diameter of the mass transfer apparatus, the properties of the liquid, the height of the holes above the surface of the nozzle and the trajectory of the droplets.

Keywords: research, centrifugal distribution device, irrigation, fluid distribution, mass transfer, energy consumption.

Перспективным направлением в последние годы на предприятиях химической отрасли становится замена тарельчатых массообменных аппаратов насадочными. Одним из факторов, определяющих эффективность работы насадочных колонн, является создание равномерно орошения жидкостью насадки в аппарате с помощью распределительных устройств различной конструкции [1; 2].

Анализ научных работ по исследованию центробежных распылителей показал, что в настоящее время разработано большое количество конструкций центробежных оросителей, предназначенных для различных процессов.

Большое внимание уделяется подбору оптимальной формы и режима работы распределительного устройства, а также экспериментальному исследованию работы распределителя.

В работах [3; 4] были рассмотрены особенности движения вязких и неньютоновских жидкостей по вращающимся поверхностям.

В статье [5] представлены результаты исследований капельного истечения различных сред под действием столба жидкости и центробежной силы с круглого и зубчатого диска одинакового диаметра при разных скоростях вращения и также получено уравнение для определения теоретического диаметра образующихся капель.

Результаты проведенного эксперимента [5] легли в основу исследовательской работы [6], в которой приведена модель каплеобразования на зубцах, имеющих разную форму и расположенных по периферии вращающегося диска при условии медленного ввода жидкости на него. При обработке экспериментальных данных получены обобщенные уравнения для определения «отрывных объемов капель» с диска для зубцов конической и сферической формы.

В [7] при разбрызгивании вязких сред с помощью центробежного распылителя (ЦР) находится «коэффициент проскальзывания для вязкой жидкости» вдоль криволинейных лопастей при равномерном ее истечении с учетом конструктивных особенностей ЦР и особенностей изменения вязкости в зависимости от окружной скорости течения.

Авторами [8] представлен расчет потребляемой мощности ЦР с учетом технологических режимов, конструктивных особенностей ЦР и свойств вязкой и неньютоновской жидкости. Установлено незначительное влияние потребляемой мощности ЦР для вязкой жидкости при значительном влиянии угловой скорости вращения.

Описана математическая модель работы ЦР для аппаратов очистки газов [9]. При работе ЦР в зоне контакта создаются высокие относительные скорости движения взаимодействующих фаз, разбрызгивание жидкости и каплеулавливание.

Было исследовано распределение жидкости в высокоскоростном распределителе [10], при

вращении которого жидкость распадается на тонкую пленку по краю распределителя. Чтобы получить такое гидродинамическое поведение пленки жидкости, была применена чашеобразная конструкция распылителя. Формирование жидкостной пленки моделировалось при различных скоростях вращения, вязкости жидкости.

В работе [11] было изучено влияние различных конфигураций распылителей (в виде плоского диска и чаши) на объемы образуемых капель и скорости распределения жидкости.

Исследователи в [12] показали результаты экспериментов, проведенных на тарельчатом распределительном устройстве для жидкости центробежного типа [13], представляющего собой перфорированную коническую тарелку. Неравномерность распределения жидкости по сечению колонны составляла не более 10 %.

Цель данной работы – изучение гидродинамики конструкции центробежного биконусного распределительного устройства (ЦБРУ) [14], предназначенного для создания равномерного орошения насадки, и проведение сравнительного анализа работы распределителя жидкости при статическом и динамическом режимах в зависимости от высоты его расположения над поверхностью насадочных тел и расхода распределяемой жидкости. Кроме изучения траектории и определения координат распыливаемой струи жидкости, также определяется плотность орошения насадки U .

Эксперимент проводился на установке, показанной на рис. 1.

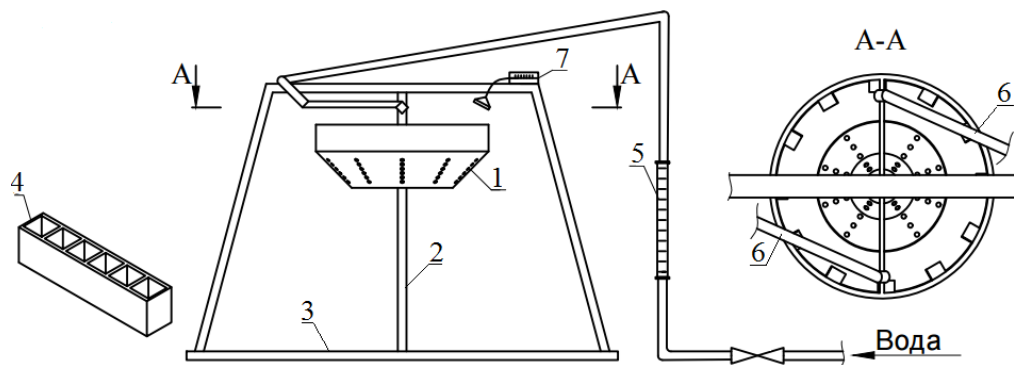


Рис. 1. Установка для проведения исследования

ЦБРУ 1 выполнено на 3D принтере, закреплено на оси 2, которая установлена на крепежной раме 3. Для определения равномерности разбрызгивания жидкости по сечению на крепежной раме 3 установлено сборное устройство 4, состоящее из отдельных ячеек. Расчет плотности орошения проводится по выражению (1) [15]:

$$U = \frac{L}{\rho_x \cdot S}, \quad (1)$$

где U – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; L – количество разбрызгиваемой жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$; S – площадь поперечного сечения, м^2 .

Для создания вращения ЦБРУ исходная жидкость через ротаметр 5 подается по трубкам

питания 6 на лопадки (установлены под углом 45°), расположенные по внутреннему периметру ЦБРУ. Для измерения числа оборотов используется строботаксометр 7.

Схема разработанной конструкции ЦБРУ для жидкости показана на рис. 2.

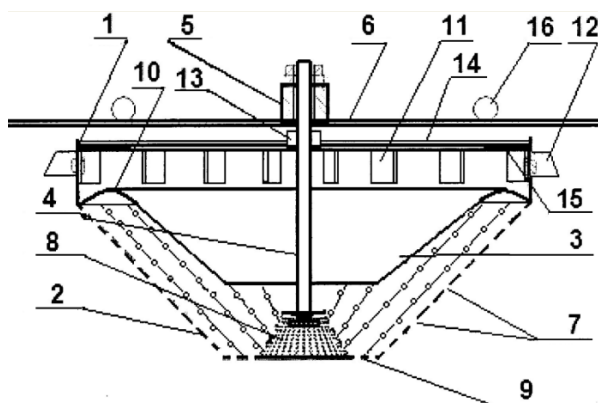


Рис. 2. ЦБРУ для жидкости [14]:

1 – распределитель; 2 – наружный конус; 3 – внутренний конус; 4 – ось; 5 – опора; 6 – крестовина; 7 – отверстия наружного конуса; 8 – центральный распределитель; 9 – дно; 10 – кольцо; 11 – радиальные лопадки; 12 – наклонные лопадки; 13 – втулка; 14 – центрирующая крестовина; 15 – ограничительное кольцо; 16 – патрубки

При проведении исследования расход подаваемой жидкости на ЦБРУ варьировался от 0,92 до 1,33 м³/ч, расстояние между распределителем жидкости и сборным устройством составляло 200, 250 и 280 мм. ЦБРУ разделено на несколько зон, в каждой из которых должно соблюдаться равенство распределения жидкости: первая зона – центральная зона под центральным распределителем 8; вторая зона – подача исходной жидкости на радиальные лопадки 11 (борт, на котором они находятся, имеет перфорированную поверхность); третья и четвертая зоны – организуются перетеканием жидкости из внутреннего конуса в зазор между ним и наружным конусом 2, имеющим отверстия на разной высоте, через которые разбрызгивается жидкость. Схема распределения жидкости по ЦБРУ показана на рис. 3.

Проведена оценка разбрызгивания капель жидкости по поверхности насадки при неподвижно установленном ЦБРУ и при центробежном вращении распределителя.

На рис. 4 изображены результаты распределения жидкости по сечению колонны при статическом и динамическом распределении. На графике видно, что при статическом положении распределителя орошаемый диаметр колонны значительно меньше, чем в случае вращения распределителя.

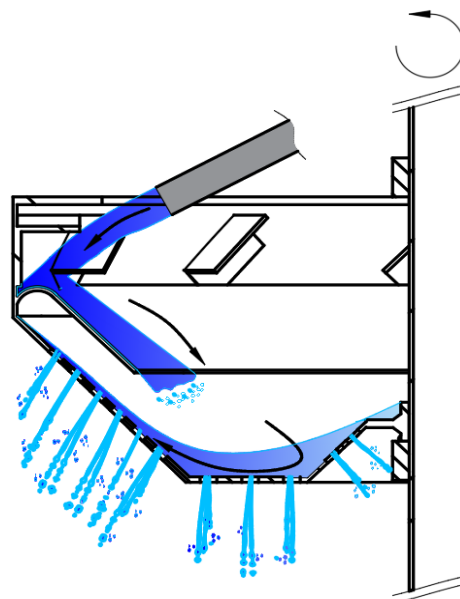


Рис. 3. Распределение жидкости по ЦБРУ

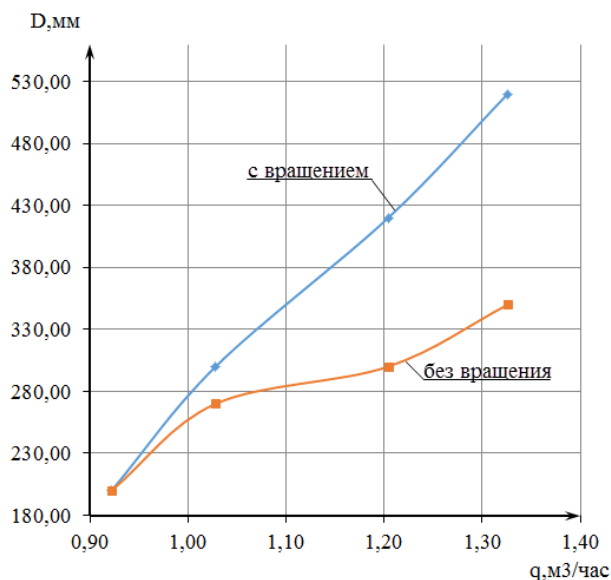


Рис. 4. Распределение орошаемой жидкости по сечению колонны (статический и динамический режим работы ЦБРУ)

Для нахождения оптимального режима работы распределительного устройства было проведено исследование его гидродинамики, при котором варьируемыми параметрами являлись: скорость вращения распределителя, высота его расположения над поверхностью насадки. На рис. 5 представлена зависимость числа оборотов ЦБРУ от расхода жидкости при различной высоте его расположения.

Зависимость количества оборотов от расхода жидкости (рис. 5) практически не зависит от высоты расположения распределителя над поверхностью насадки. Форма графика связана

с особенностью работы распределителя: во время вращения жидкость внутри распределителя

образует параболоид вращения, различный при каждом расходе жидкости.

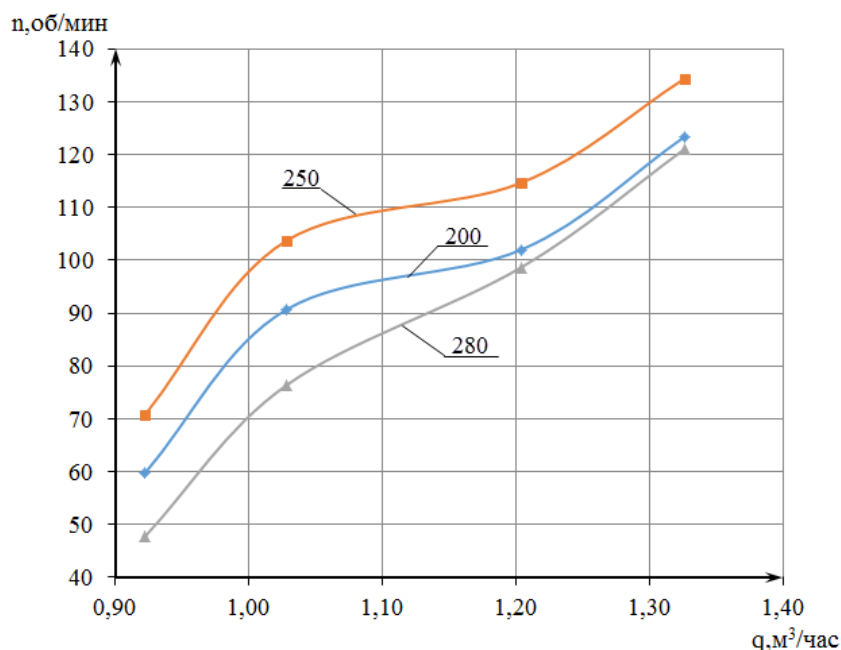


Рис. 5. Зависимость числа оборотов ЦБРУ от количества подаваемой жидкости (высота расположения распределителя: 200, 250 и 280 мм)

На рис. 6 приведена зависимость орошаемого диаметра от расхода жидкости при различной высоте расположения распределителя.

Данный график показывает, что зависимость орошаемого диаметра колонны от высоты расположения распределителя уменьшается при увеличении расхода.

Основным параметром, от которого зависит эффективность работы колонного аппарата, является плотность орошения. Установлено, что оптимальный режим работы устройства достигается при размещении ЦБРУ на 250 мм над поверхностью насадки и расходе 1,33 м³/ч, средняя плотность орошения составляет $2,25 \cdot 10^{-6}$ (м³/м² · с).

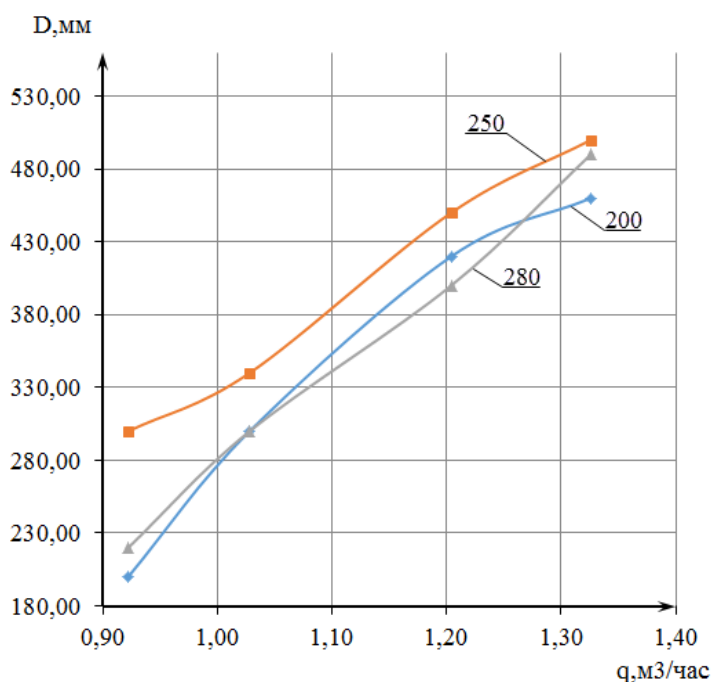


Рис. 6. Зависимость изменения диаметра при орошении от количества подаваемой жидкости (высота расположения распределителя: 200, 250 и 280 мм)

Корреляционный анализ результатов данного исследования проводился для оптимального распределения жидкости по насадке при размещении ЦБРУ над ней на расстоянии $H = 250$ мм: коэффициент корреляции $r = 0,994$, то есть зависимость $y = f(x)$ – прямая и высокая; критерий Кохрена, рассчитанный в линеаризованном виде $Gr_p = 0,758 < Gr_t = 0,768$, следовательно, дисперсия опытов однородна и воспроизводимость хорошая; критерий Фишера, рассчитанный по МНК $Fr_p = 3,21 < Fr_t = 4,07$, следовательно, математическая модель адекватна; критерий Стьюдента, рассчитанный по МНК $t_a = 931$; $t_b = 94$ больше значения табличного $St = 2,06$, следовательно, оба коэффициента значимы.

Таким образом, по результатам проведенного исследования были определены траектории распределяемых струй жидкости при нескольких варьируемых параметрах (количество подводимой жидкости, размещение ЦБРУ относительно поверхности насадочных тел) при статическом и динамическом режимах работы распределителя. Равномерная плотность орошения U по сечению колонны достигается при динамическом режиме работы ЦБРУ и расходе жидкости $1,33 \text{ м}^3/\text{ч}$. Так как для вращения ЦБРУ используется энергия подводимого потока, данная конструкция может быть применена, например, в процессе ректификации при подаче потока флегмы, при этом энергозатраты снижаются на 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пажжи, Д. Г. Распыливающие устройства в химической промышленности / Д. Г. Пажжи, А. А. Корягин, Э. Л. Ламм. – Москва: Химия, 1975. – 200 с.
2. Высокоэффективные решения для насадочных колонн. [Электронный ресурс]. URL: http://www.reefing.ru/assets/templates/reefing_template/reefing_NX/documents/GT_C_N.pdf / (дата обращения: 02.01.2024.)
3. Вачагин, К. Д. Движение потоков вязкой жидкости по поверхности быстровращающегося плоского диска / К. Д. Вачагин, В. С. Николаев // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 1960. – Т. VIII. – № 1. – С. 8–11.
4. Зиннатуллин, Н. Х. Пленочное течение неньютоновской жидкости по вращающимся поверхностям / Н. Х. Зиннатуллин, К. Д. Вачагин, Н. В. Тябин // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 9. – № 2. – С. 187–195.
5. Дунский, В. Ф. Капание жидкости с острия / В. Ф. Дунский, Н. В. Никитин // ПМТФ. – 1980. – № 1. – С. 49–55.
6. Сафиуллин, Р. Г. К расчету увлажнителей воздуха на основе дисковых распылителей с зубчатой периферией. Часть 1. Модель каплеобразования / Р. Г. Сафиуллин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 10. – С. 223–229.
7. Исследование движения пограничного слоя вязкой жидкости по лопасти центробежного распылителя / А. Б. Капранова [и др.] // Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55 (8). – С. 90–92.
8. Еникеева, Н. И. Расчет мощности центробежного распылителя / Н. И. Еникеева, Н. Б. Сосновская // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16 (5). – С. 196–198.
9. Латыпов, Д. Н. Гидродинамические параметры центробежного распылителя / Д. Н. Латыпов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 (16). – С. 86–87.
10. Liquid film flow on a high speed rotary bell-cup atomizer/ Tatsuya Soma [и др.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2014. – № 70. – P. 96–103.
11. Mahmoud, A. Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics / A. Mahmoud, M. S. Youssef // Chemical Engineering Science. – 2013. – № 107. – С. 149–157.
12. П. м. 158009 Российская Федерация, МПК В 01 D 53/18. Центробежное распределительное устройство для жидкости / Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, А. Б. Голованчиков; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2015118734/05; заявл. 19.05.2015; опубл. 20.12.2015.
13. Результаты экспериментальных исследований гидродинамики центробежных распределителей жидкости тарельчатого типа / П. В. Марченко, Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, В. В. Мелихов // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 11 (часть 2). – С. 153–156.
14. П. м. 180151 Российская Федерация, МПК В 01 D 53/18. Биконусное центробежное распределительное устройство для жидкости / Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, А. Б. Голованчиков, П. С. Васильев, К. В. Черикова, Н. А. Прохоренко; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2018110438; заявл. 23.03.2018; опубл. 05.06.2018.
15. Поникаров, И. И. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки: учебник / И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин. – изд. 3-е, стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2017. – 604 с.

УДК 550.4

*А. В. Ермоловский, С. А. Дубровская, Ю. С. Тарасова, М. В. Садманова***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕЗЕРВУАРНОЙ ГЕОХИМИИ
ПРИ ОЦЕНКЕ РЕСУРСОВ И ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ****ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» г. Волгоград**

Alexey.Ermolovsky@lukoil.com; Snezhana.Dubrovskaya@lukoil.com;

Yuliya.Tarasova@lukoil.com; Mariya.Sadmanova@lukoil.com

Автор, ответственный за переписку:

Алексей Владимирович Ермоловский (Alexey.Ermolovsky@lukoil.com)

На конкретных примерах показано использование геохимических технологий при разработке месторождений, уточнении геологического строения залежей, определении наличия нефтяной оторочки газоконденсатных месторождений и подсчете запасов углеводородов. Результаты проведенных геохимических исследований позволили поставить на Государственный баланс полезных ископаемых дополнительные запасы нефти и газоконденсата.

Ключевые слова: геохимический мониторинг, подсчет запасов, молекулярный состав нефти, флюидалый контакт, нефтяная оторочка газоконденсатных месторождений, газонефтяной контакт, геологическое строение месторождения.

*A. V. Ermolovskiy, S. A. Dubrovskaya, Yu. S. Tarasova, M. V. Sadmanova***THE USE OF RESERVOIR GEOCHEMISTRY METHODS
WHEN ASSESSING HYDROCARBON RESOURCES AND RESERVES****LLC «LUKOIL-Engineering», Volgograd**

Alexey.Ermolovsky@lukoil.com; Snezhana.Dubrovskaya@lukoil.com;

Yuliya.Tarasova@lukoil.com; Mariya.Sadmanova@lukoil.com

Corresponding author: Alexey V. Ermolovskiy (Alexey.Ermolovsky@lukoil.com)

Specific examples show the use of geochemical technologies in field development, clarifying the geological structure of deposits, determining the presence of oil fringes of gas condensate fields and calculating hydrocarbon reserves. The results of the conducted geochemical studies made it possible to put additional reserves of oil and gas condensate on the State balance of minerals.

Keywords: geochemical monitoring, reserves calculation, molecular composition of oil, fluid contact, oil fringe of gas condensate fields, gas-oil contact, geological structure of the deposit.

Введение

С каждым годом все активнее растет потребность в углеводородном сырье, которое используется во всех сферах жизни человека, поэтому деятельность нефтяных компаний направлена на увеличение добычи, поиск и разведку полезных ископаемых. Геохимические методы исследований могут быть использованы как на стадии геологоразведочных работ, так и в процессе эксплуатации месторождений. Их использование помогает в уточнении геологического строения месторождений, установлении латеральной сообщаемости или разобщенности залежей, позволяет осуществлять мониторинг разработки многопластовых залежей, контролировать загрязнение пластового флюида техногенными соединениями, а также играет важную роль при подсчете запасов углеводородов (УВ).

В основе геохимических исследований лежит изучение молекулярного состава нефтей

и органического вещества пород, сбор и сравнение информации по составу углеводородов разных месторождений, так называемый метод «отпечатков пальцев нефти» – «oil fingerprinting», и накопление обширной базы данных, позволяющей интерпретировать информацию, полученную по результатам исследований пород и флюидов.

Проведение комплексных геохимических исследований имеет высокую практическую значимость. На примере нескольких месторождений предлагается разобрать возможность использования геохимических методов.

**Определение наличия нефтяной оторочки
и уточнение уровней флюидалых контактов**

Рассмотрены скважины, пробуренные на Первом месторождении в период с 2002 по 2019 г. (2002, 2013, 2014, 2015 и 2019 гг.).

Скважина 2002 г. по результатам испытаний дала приток УВ – газоконденсат, в связи с чем

был сделан вывод о газоконденсатном характере залежи (рис. 1). После проведения геохимического анализа сделано предположение о существовании в залежи нефтяной оторочки, связанное с тем, что в хроматограмме полученной пробы флюида зафиксировано присутствие углеводородных компонентов нефтяного ряда. Скважина, пробуренная в 2013 г., по результатам испытаний показала наличие водонасыщенного коллектора, однако в отобранных пробах пластовой воды зафиксировано присутствие следовых количеств нефтяных УВ. В скважине 2014 г. была получена пластовая вода уже с пленками нефти, что позволило предположить уровень водонефтяного контакта (ВНК). Скважина, пробуренная в 2015 г., вскрыла нефтяную оторочку и подтвердила прогноз о нефтегазоконденсатном характере залежи, сделанный на основе геохимических исследований

в скважине 2002 г. Определенный в результате совместного анализа данных бурения и испытаний уровень ВНК был использован в дальнейшем при подсчете запасов УВ.

Таким образом, до применения методов геохимического исследования по указанному месторождению на Государственном балансе запасов полезных ископаемых числились только запасы газоконденсата. После применения описанных выше методов, по результатам которых выявлена нефтяная оторочка и определены уровни флюидальных контактов, на Госбаланс по залежи келловейского яруса были поставлены начальные геологические запасы нефти и уточненные запасы конденсата. Дальнейшая эксплуатация месторождения (скважина, пробуренная в 2019 г. на добычу нефти из нефтяной оторочки) подтвердила прогноз, сделанный по результатам геохимических исследований.

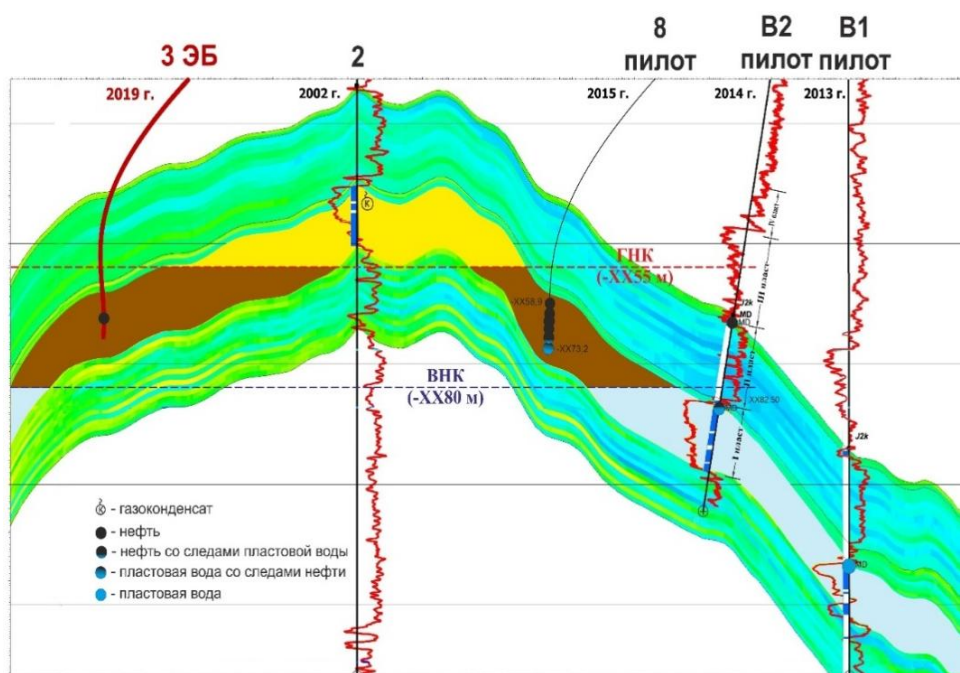


Рис. 1. Геохимический прогноз наличия нефтяной оторочки газоконденсатного месторождения

Еще один пример использования геохимических методов исследования при определении нефтяной оторочки в газоконденсатном месторождении рассмотрен на месторождении, расположенном в акватории Каспийского моря.

В пределах этого месторождения в неоконских отложениях скважина вскрыла три пласта-коллектора. Данные геохимических исследований показали, что пласт I и пласт II являются газоконденсатными, кроме того, они имеют флюидальное сообщение, что доказывает идентичный состав образцов. Флюид, полученный

при опробовании пласта III на кабеле в необсаженном стволе (ОПК), по молекулярным характеристикам отличается от образцов, взятых из вышерасположенных пластов, что указывает на существование отдельной залежи в пласте III, которая не имеет латеральной связи с верхними пластами. Визуальная оценка образца газоконденсата из пласта III позволила предположить наличие нефтяной оторочки, так как образец имел нехарактерный для газоконденсатов темно-коричневый цвет. В связи с этим специалистами геохимической лаборатории

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» были проведены расчеты молекулярных параметров, выявившие наличие в исследуемом образце бензиновых и среднекипящих фракций, характерных для нефтяных залежей. Доказательство наличия нефтяной оторочки привело к необходимости определения уровня ГНК для подсчета запасов нефти. С этой целью проведены капельно-люминесцентный и молекулярный анализы шлама с разных глубин. По интенсивно-

сти свечения в ультрафиолетовом свете и увеличению пиков на хроматограммах определен уровень ГНК (рис. 2).

Результаты, полученные по данным геохимических исследований, согласуются с результатами гидродинамических исследований, проведенных в скважине. Таким образом, на основании геохимических исследований образцов флюидов и шлама было уточнено строение залежи и спрогнозирован уровень ГВК [1].

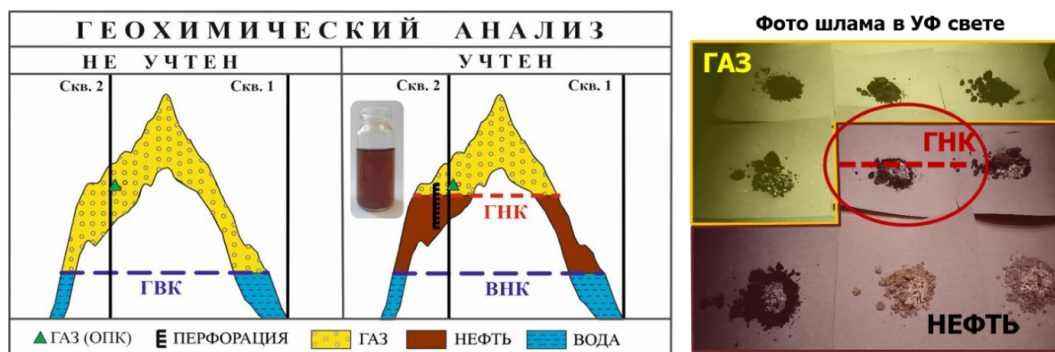


Рис. 2. Определение уровня ГНК по свечению в УФ свете

Уточнение геологического строения месторождений с использованием геохимических методов

При отборе проб в одной из скважин (скважина 1) газоконденсатного морского месторождения в отложениях титонского яруса были по-

лучены пробы нефти. А в расположенной рядом скважине 2 при перфорации – пробы конденсата. В связи с этим возник вопрос: скважины 1 и 2 дали притоки из разных залежей – газоконденсатной и нефтяной, или титонский пласт имеет единую нефтегазоконденсатную залежь?

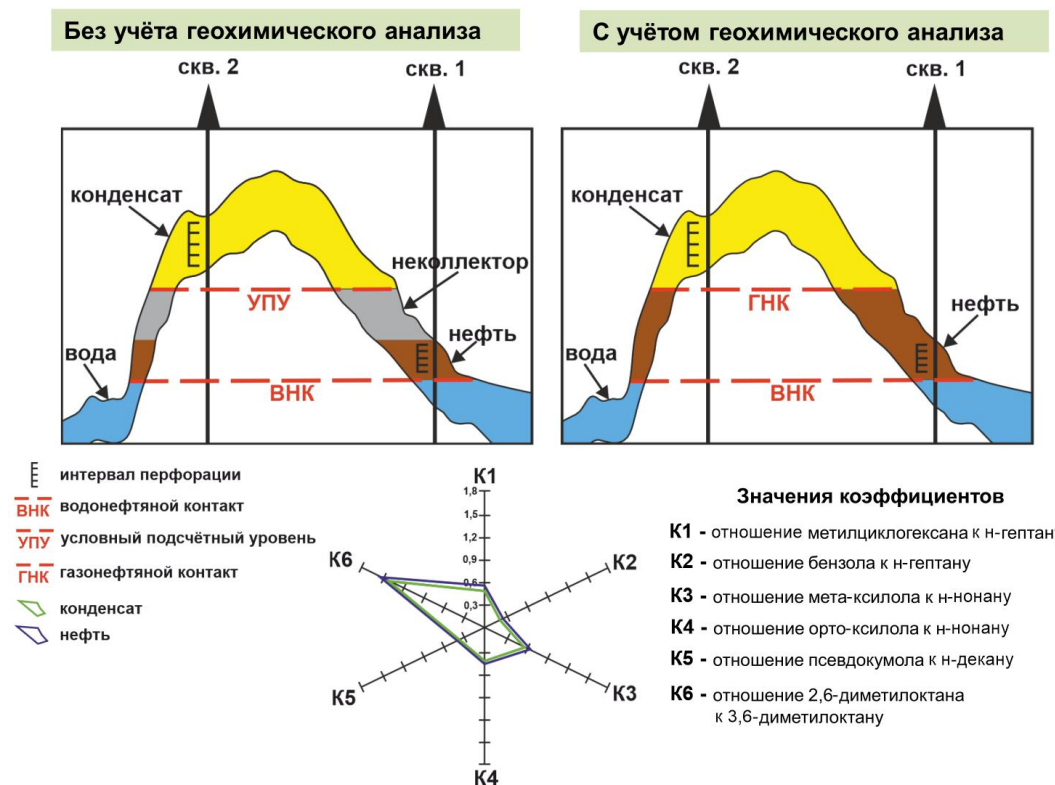


Рис. 3. Уточнение геологического строения залежи

Для ответа на этот вопрос было проведено сравнение молекулярного состава полученных флюидов. Согласно результатам хроматографических и хромато-масс-спектрометрических исследований индивидуальный углеводородный состав бензиновых фракций нефти из скважины 1 и конденсата из скважины 2 идентичен (рис. 3). В средне- и высококипящих фракциях нефти имеются отличия, которые закономерно объясняются различным типом флюидов ввиду того, что в конденсатах не содержится углеводородов от nC_{30} и выше. Кроме того, конденсаты из скважины 2 имеют светло-коричневый окрас, что предполагает наличие нефтяной оторочки в залежи, которая выделяется и по молекулярным показателям. Все это дает основание предполагать наличие латеральной сообщаемости между разведочными скважинами и сделать вывод о единстве залежи в отложениях титонского пласта.

Геохимический мониторинг многопластовых залежей

Применение геохимического мониторинга рассмотрено на примере двух месторождений, одно из которых расположено в акватории Каспийского моря, второе – на суше.

На морском месторождении геохимический мониторинг нефтей осуществляется с 2016 г. В период с 2016 по 2023 г. были проведены ис-

следования молекулярного состава более 260 проб нефтей из 37 скважин, таким образом, накоплена обширная база данных, позволяющая оценивать изменения, происходящие в процессе разработки. При изучении разведочных скважин месторождения в неокотских отложениях были обнаружены нефтенасыщенные пачки: (1+2) и 4, и пласт неколлектор – пачка 3 (рис. 4). Нефти из разных пачек имели одинаковые физико-химические свойства, но различный молекулярный состав. При сравнении соотношений индивидуальных углеводородов, входящих в состав образцов нефти, выделено девять коэффициентов. Наиболее выраженные отличия прослеживались в соотношении n -гептан / метилциклогексан (nC_7 /МЦГ). Значения данного показателя, полученного при исследованиях отдельно отобранных проб из пачек (1+2) и 4, составили 1,18 и 0,84 соответственно. Исходя из полученных значений, был сделан вывод об отсутствии сообщаемости между пачками (1+2) и 4.

Полученные значения коэффициентов (1,18 и 0,84) стали граничными, и в течение нескольких лет проводился мониторинг состава неокотских нефтей с расчетом доли вклада (1+2) и 4 пачек в совместную добычу. Это позволило наблюдать за работой разобренных пачек в процессе разработки месторождения.

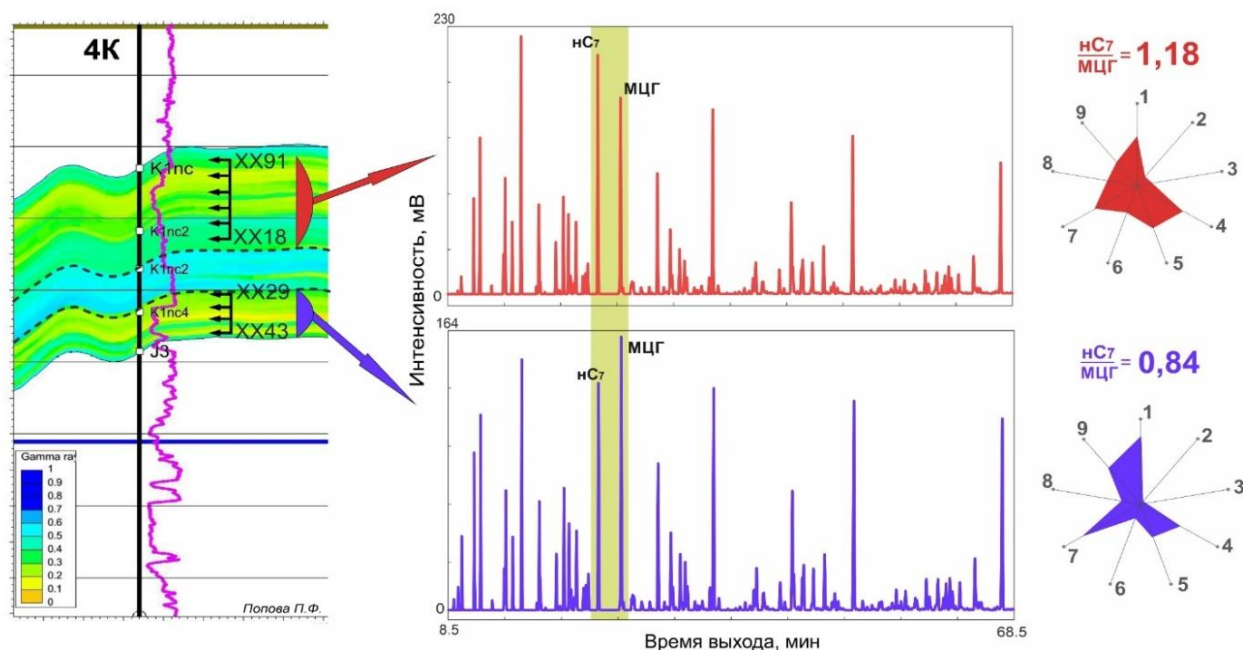


Рис. 4. Геохимический мониторинг добычи нефти из разных пластов морского месторождения

Таким образом, по процентному содержанию доли каждого компонента в конечный

продукт при совместной добыче нефти можно отслеживать работу разных пластов без допол-

нительной установки в скважинах дорогостоящего оборудования и не останавливая работу скважин [2–4].

Опыт применения геохимического мониторинга при разработке многопластовых залежей, описанный выше, может быть использован и на месторождениях, расположенных на суше. Впервые его применили на одном из месторождений Республики Татарстан. На первом этапе были проведены геохимические исследования образцов флюидов и выделены наиболее показательные маркеры, указывающие на различия в составе нефти среднего и нижнего карбона.

На описываемом месторождении во многих скважинах ведется совместная добыча из нескольких залежей, при этом не все скважины оснащены оборудованием для раздельной эксплуатации (ОРЭ). Соответственно, не везде можно контролировать работу каждого из пластов, что усложняет ведение статистической отчетности запасов, так как данные по добыче вносятся на Государственный баланс по каждому пласту отдельно. Используя результаты геохимических исследований ранее отобранных образцов нефти, можно определять долю добытой нефти из каждого пласта.

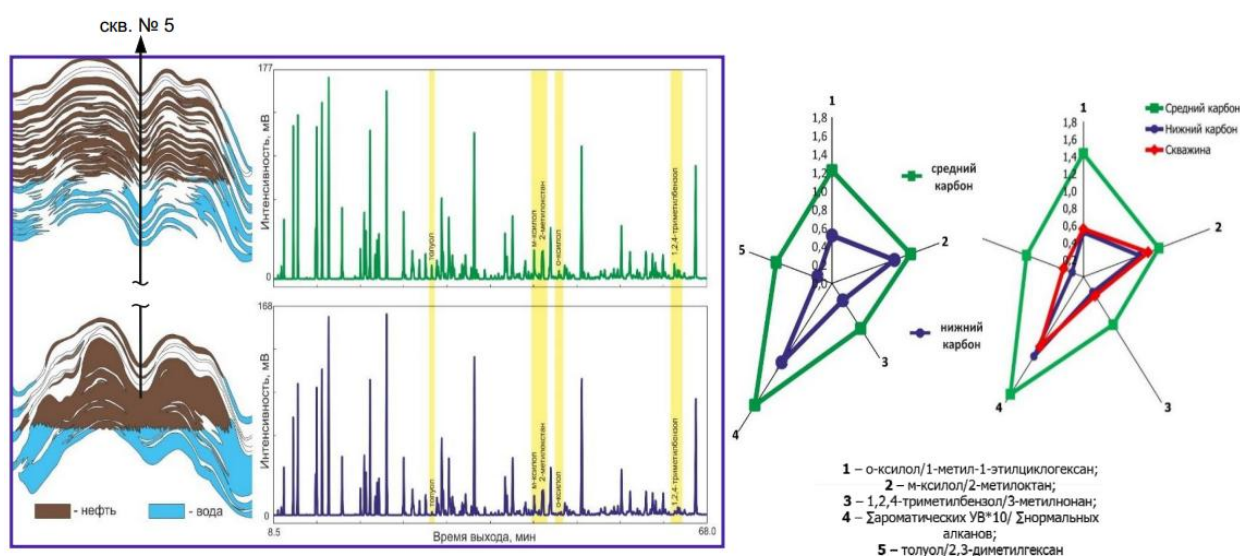


Рис. 5. Геохимический мониторинг добычи нефти из разных пластов месторождения Республики Татарстан

Так, на примере скважины 5 при отборе образца было определено, что флюид представлен в основном нефтями нижнего карбона, средний карбон практически не участвует в добыче (рис. 5). Полученная информация позволила не только правильно распределить добычу при постановке на Госбаланс, но и сделать вывод о необходимости реперфорации скважины в интервале башкирского яруса среднего карбона. После повторной перфорации в интервале отложений среднего карбона дебит нефти вырос в этой скважине на 3,2 т/сут.

Выводы

Геохимические методы в комплексе с другими методами исследований вносят значительный вклад в правильное определение геологического строения месторождений; в прогноз границы флюидального контакта и фазового состояния флюидов; в контроль разработки многопластовых месторождений.

Использование методов геохимии позволило поставить на Государственный баланс запасов нефти в месторождении, ранее считавшемся газоконденсатным, и уточнить границу водо-нефтяного контакта, что послужило основой для верного расчета запасов углеводородов в залежи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение резервуарной геохимии для уточнения моделей газоконденсатных залежей с нефтяными оторочками / М. А. Невестенко, А. В. Ермоловский, Ю. С. Тарасова, М. В. Садманова // Нефтяная столица. Сборник материалов Шестого международного молодежного научно-практического форума – Москва, 2023. – С. 138–141.
2. Методы резервуарной геохимии в комплексе с гидродинамическими и промыслово-геофизическими исследованиями при сопровождении мероприятий по оптимизации работы эксплуатационных скважин месторождения в акватории Каспийского моря / А. В. Ермоловский, А. Ю. Самойленко, К. Г. Каган, М. Ю. Поликарпов,

Н. Н. Польская, М. А. Невестенко, Ю. С. Тарасова, М. В. Садманова, Е. В. Зубарева, Д. Ш. Сатубалиев // Сборник научных трудов специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» – Сыктывкар, 2022. – С. 107–115.

3. Роль резервуарной геохимии нефти в повышении рациональности системы разработки многопластовых залежей нефтяных и газонефтяных месторождений / Н. Д. Сарсенбеков, Э. Н. Якупова, С. Б. Каирбеков,

Е. Ш. Сейтхазиев // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР – 2018. – № 3. – С. 65–74

4. Использование методов резервуарной геохимии для оценки приточных интервалов в многопластовых месторождениях / М. А. Невестенко, Ю. С. Тарасова, А. В. Ермоловский, М. В. Садманова // Нефтяная столица. Пятый Международный научно-практический форум – Сургут, 2022. – С. 132–136.

УДК 531.714.75

А. И. Нефедьев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО КОМПАРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

nefediev@rambler.ru

Рассмотрены особенности конструкции электростатического компаратора постоянного и переменного напряжения, позволяющие получить высокую чувствительность и устойчивость к механическим помехам, что позволило уменьшить погрешность компарирования постоянного и переменного напряжения до минимальных значений. Для регистрации отклонения подвижной системы применены два фотоэлектрических преобразователя, что увеличило чувствительность ЭКН и значительно уменьшило влияние механических вибраций. Предложен алгоритм компарирования переменного напряжения, обеспечивающий исключение погрешности от асимметрии электростатических преобразователей методическим путем. Обработка результатов измерений показала, что они соответствуют закону нормального распределения. Полученные результаты показывают возможность применения электростатического компаратора в составе измерительной установки в электроизмерительных лабораториях для точных измерений переменного напряжения в диапазоне 100–1000 В и частотном диапазоне 20–100000 Гц.

Ключевые слова: электростатический компаратор, электростатический преобразователь, фотоэлектрический преобразователь, дифференциальный фоторезистор, балка, растяжки, электрод, емкость.

A. I. Nefed'ev

RESEARCH OF ELECTROSTATIC VOLTAGE COMPARATOR

Volgograd State Technical University

nefediev@rambler.ru

The design features of an electrostatic comparator of direct and alternating voltage are considered, which make it possible to obtain high sensitivity and resistance to mechanical interference, which makes it possible to reduce the error of comparing direct and alternating voltage to minimal values. To determine the deviation of the moving system, two photoelectric converters were used, which made it possible to increase the sensitivity of the EKN and significantly reduce the influence of mechanical vibrations. An algorithm for comparing alternating voltage is proposed, which ensures the elimination of errors from asymmetry of electrostatic converters in a methodical way. Processing of the measurement results showed that they correspond to the normal distribution law. The results obtained show the possibility of using an electrostatic comparator as part of a measuring setup in electrical measuring laboratories for accurate measurements of alternating voltage in the range of 100–1000 V and frequency range of 20–100,000 Hz.

Keywords: electrostatic comparator, electrostatic converter, photo-electric converter, differential photoresistor, beam, braces, electrode, capacitance.

Введение

Все точные (эталонные) измерения переменного напряжения выполняются при помощи термоэлектрических компараторов напряжения. Причин тому несколько: высокая точность термоэлектрических компараторов напряжения

и высокая технологичность изготовления. Но говорить об истинном значении измеряемой величины возможно, только если получены одинаковые результаты измерений одной и той же физической величины двумя или более принципиально независимыми методами измерений [1].

Целесообразность использования электромеханических компарирующих преобразователей (электростатических, а также электродинамических на низких частотах) заключается в высокой стабильности их характеристик в широком диапазоне температур [2]. Поскольку комплект эталонных термоэлектрических преобразователей переменного напряжения, состоящий из термопреобразователей и добавочных резисторов, рассчитан на диапазон напряжений до 1000 В и частот $10\text{--}10^6$ Гц [3], то в этом диапазоне для измерения переменного напряжения будет также целесообразно использовать электростатические компараторы напряжения (ЭКН). Применение ЭКН позволит обойтись без добавочных резисторов, что положительно скажется на результирующей погрешности измерений.

Сложность применения ЭКН традиционной конструкции на основе квадрантного электрометра заключается в его относительно низкой

чувствительности [2]. Увеличение чувствительности ЭКН обычными способами наталкивается на трудности, обусловленные низким вращающим моментом электростатических преобразователей (ЭСП) и повышенной чувствительностью к воздействию механических помех [2]. Для повышения чувствительности и помехоустойчивости компаратора была разработана конструкция ЭКН одновременного сравнения по принципу вольт-весов [4–6].

Конструкция ЭКН

В результате проведенных исследований и экспериментов был разработан ЭКН постоянного и переменного напряжения, позволяющий получить погрешность компарирования 0,005–0,001 % в диапазоне напряжений 100–1000 В и частот 20–100000 Гц [7].

Конструктивная схема ЭКН представлена на рис. 1.

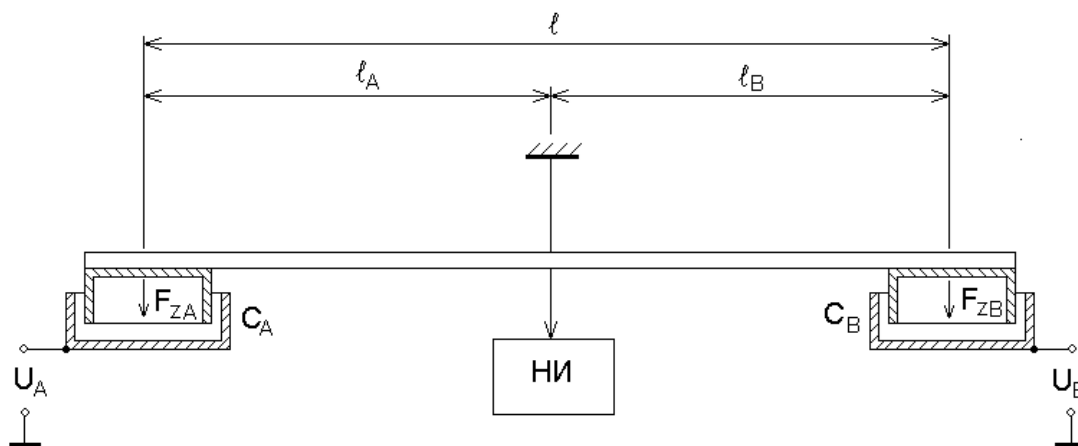


Рис. 1. Конструктивная схема ЭКН

ЭКН построен по типу вольт-весов и состоит из горизонтальной балки, на концах которой установлены подвижные электроды. Неподвижные электроды установлены на изоляторе, и имеют в своем составе подвижные электроды, расположенные в центре неподвижных электродов и предназначенные для плавного регулирования емкости. Неподвижные электроды, находящиеся под высоким потенциалом, и экраны установлены на изоляторах, которые закреплены на основании компаратора. При калибровке ЭКН добиваются идентичности параметров электродов путем измерения положения подвижного электрода относительно подвижного электрода. Идентичность емкостей ЭСП определяется при помощи нулевого индикатора, который регистрирует горизонтальное

положение подвижной части компаратора при подаче одного и того же напряжения на оба электрода.

Для регистрации отклонения подвижной системы применены два фотоэлектрических преобразователя. Каждый фотоэлектрический преобразователь состоит из источника освещения, флажка с прорезями, укрепленного на концах балки ЭКН и дифференциального фоторезистора типа ФСК-7б. Два фотоэлектрических преобразователя соединены таким образом, что при вертикальных перемещениях подвижной части их сигналы вычитаются, а при отклонении подвижной части от горизонтального положения их сигналы складываются, что позволило увеличить чувствительность ЭКН и значительно уменьшить влияние вибраций.

Противодействующий момент в значительной мере препятствует получению высокой чувствительности и, соответственно, высокой точности компарирования напряжений. Получение высокой чувствительности и одновременно высокой помехоустойчивости ЭКН стало возможным благодаря использованию системы растяжек [4] для крепления балки с электродами.

Равенство постоянного и переменного напряжений в процессе компарирования определяется по горизонтальному положению балки

$$U_A^2 L_A \left(\frac{D_{ACP} (N_A - 1)}{\ln(D_{1CP} / D_{2CP})} + \frac{D_{АП}^2}{4b_A^2} \right) = U_B^2 L_B \left(\frac{D_{BCP} (N_B - 1)}{\ln(D_{1CP} / D_{2CP})} + \frac{D_{БП}^2}{4b_B^2} \right).$$

где U_A – напряжение плеча A ЭКН, U_B – напряжение плеча B ЭКН, $L_{A(B)}$ – длина плеча A (B) ЭКН, $D_{ACP(BCP)}$ – средний диаметр ЭСП плеча A (B), $D_{АП(БП)}$ – диаметр подстроечного электрода плеча A (B), $N_{A(B)}$ – количество пластин в ЭСП A (B), $b_{A(B)}$ – перекрытие пластин ЭСП A (B).

Методика измерения переменного напряжения

Повышение точности компарирования ЭКН основано на использовании двух методов. Первый метод определения погрешностей компарирования ЭКН сводится к поэлементному расчетно-экспериментальному определению составляющих погрешности компарирования

компаратора, при этом вращающий и противодействующий моменты, воздействующие на балку, являются равными и направлены навстречу друг другу. Горизонтальное положение балки компаратора определяется по нулевому положению указателя нулевого индикатора. Измеренное в этот момент постоянное напряжение эквивалентно измеряемому действующему значению переменного напряжения.

Уравнение измерения ЭКН при равновесии балки имеет вид:

и суммированию указанных составляющих погрешности.

Схема соединений средств измерений при компарировании (измерении) переменного напряжения приведена на рис. 2.

В качестве источника постоянного напряжения G_- был использован калибратор П320, а в качестве источника переменного напряжения $G_~$ – калибратор 745А с усилителем 746А (Hewlett-Packard). Переключатель S предназначен для изменения полярности постоянного напряжения. Постоянное напряжение измерялось при помощи делителя постоянного напряжения ДН типа Р3027-2 и компаратора напряжений КН типа Р3003.

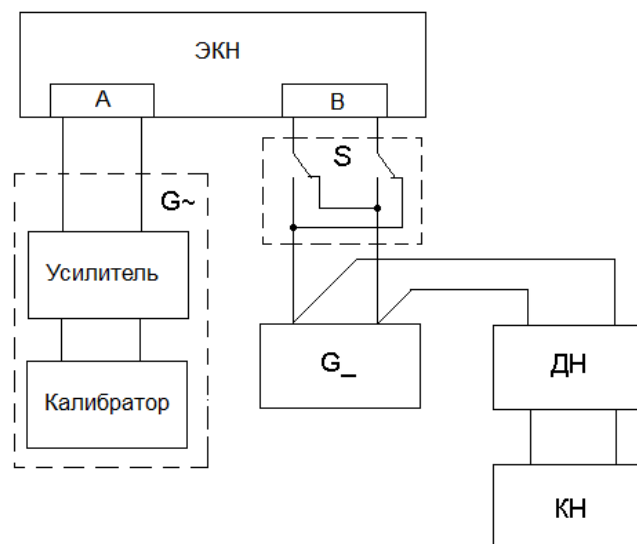


Рис. 2. Схема соединений средств измерений для измерения переменного напряжения

Методика измерения переменного напряжения при помощи ЭКН заключалась в следующем. При помощи механического корректора нуля и электрического корректора прово-

дилась установка нуля компаратора. Для этого регуляторы автокомпенсатора в плечах A и B установлены в среднее положение. Сначала при помощи механического корректора была про-

изведена установка балки ЭКН в начальное (нулевое) положение. При этом индикатор автокомпенсатора показывал нулевое значение.

На следующем этапе производилась регулировка идентичности ЭСП на переменном напряжении. От источника переменного напряжения $G_{\sim}$ на оба параллельно соединенных ЭСП было подано одно и то же переменное напряжение от калибратора напряжений 745А, равное измеряемому переменному напряжению, например, 500 В при частоте 1000 Гц.

Если ЭСП не идентичны, то подвижная система отклонится от начального (нулевого) положения, что также приведет к отклонению индикатора автокомпенсатора от нулевого положения. Регулируя положение подстроечных электродов ЭСП, добивались их идентичности путем изменения их емкости, что определялось по нулевому показанию индикатора автокомпенсатора.

На следующем этапе последовательно устанавливали на источнике переменного напряжения $G_{\sim}$ частоту 100 Гц, 10^4 Гц, 10^5 Гц при напряжении 500 В и проверяли идентичность ЭСП на установленных частотах.

При соединительных проводниках равной длины (300 мм) с двойным экранированием нарушения идентичности ЭСП в диапазоне частот 100 Гц – 10^5 Гц обнаружено не было. При соединительных проводниках с двойным экранированием разной длины (200 мм и 400 мм) нарушения идентичности ЭСП в диапазоне частот 10^2 – 10^5 Гц также обнаружено не было.

Регулировка идентичности ЭСП производилась при напряжениях 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 В. Нарушения идентичности не было обнаружено как при изменении частоты от 10^2 Гц до 10^5 Гц, так и при изменении напряжения от 500 В до 100 В и от 500 В до 1000 В.

Далее измеряемое переменное напряжение от источника $G_{\sim}$ было подано на один из входов ЭСП ЭКН. На второй вход ЭСП подавалось постоянное напряжение от источника $G_{\sim}$ в соответствии со схемой рис. 2. Плавно регулируя постоянное напряжение от источника $G_{\sim}$, добивались нулевого показания индикатора автокомпенсатора.

С целью исключения погрешности от асимметрии ЭСП уравнивание индикатора автокомпенсатора производили при двух полярностях постоянного напряжения с вычислением среднего арифметического из двух измерений. При измерении переменного напряжения при помощи ЭКН с применением метода противопоставления погрешность равна:

$$\delta_K = \frac{U_{\sim \text{ср}} - U_{0 \text{ср}}}{U_{0 \text{ср}}},$$

или

$$\delta_K = \left(\frac{U_{\sim A} + U_{\sim B}}{2} - \frac{U_{0A} + U_{0B}}{2} \right) \cdot \frac{100}{U_{0 \text{ср}}} (\%),$$

где $U_{\sim A}$ – переменное напряжение, приложенное к левому (А) ЭСП, $U_{\sim B}$ – переменное напряжение, приложенное к правому (В) ЭСП, $U_{\sim \text{ср}}$ – среднее значение переменного напряжения в группе измерений, $U_{0 \text{ср}}$ – среднее значение постоянного напряжения в группе измерений, U_{0A} – постоянное напряжение, приложенное к левому (А) ЭСП, U_{0B} – постоянное напряжение, приложенное к правому (В) ЭСП (рис. 2).

Компарирование производилось путем многократных измерений с чередованием электродов, к которым прикладывалось постоянное и переменное напряжение. Такой алгоритм компарирования переменного напряжения обеспечивает возможность исключения погрешности от асимметрии ЭСП методическим путем и снижает погрешности, обусловленные нестабильностью источников (калибраторов) постоянного и переменного напряжения, а также элементов ЭКН за время измерения. Постоянное напряжение измерялось при помощи делителя постоянного напряжения и компаратора напряжений Р3003. При этом разность напряжений $U_{A \text{ср}}$ и $U_{B \text{ср}}$ не должна превышать погрешность компарирования ЭКН.

Погрешность результата измерений методом компарирования при доверительной вероятности 0,99:

$$\gamma = 1,4 \sqrt{\gamma_A^2 + \gamma_F^2 + \psi_{TS}^2 + \psi_{ZD}^2 + \gamma_{PV}^2},$$

где $\gamma_A = 2 \cdot 10^{-6}$ – погрешность асимметрии, $\gamma_F = 0,7 \cdot 10^{-6}$ – частотная погрешность, $\psi_{TS} = 0,2 \cdot 10^{-6}$ (1000 В) до $15 \cdot 10^{-6}$ (100 В) – порог чувствительности, $\psi_{ZD} = 5 \cdot 10^{-6}$ – нестабильность нуля, $\psi_{PV} = 2 \cdot 10^{-6}$ – вариация показаний.

Погрешность компарирования γ составила $30 \cdot 10^{-6}$ при напряжении 100 В, и $9 \cdot 10^{-6}$ при напряжении 1000 В.

Обработка результатов измерений

По полученным экспериментальным данным был произведен расчет среднего арифметического из серий измерений, СКО и СКО среднего арифметического. Рассчитывали среднее арифметическое значение ($\bar{x}$), СКО среднего арифметического значения экспериментальных данных ($S_{\bar{x}}$). Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета $\bar{x}$, S и S_x по экспериментальным данным

U, В	f , Гц	$\bar{x}$	S	S_x
500	100	500,2156	0,001061	0,007500
	1000	500,2170	0,00046	0,000325
	10000	500,2183	0,001684	0,001191
	50000	500,2182	0,001131	0,000800
	100000	500,2223	0,002864	0,002025
1000	100	1000,216	0,001625	0,001150
	1000	1000,218	0,001980	0,001400
	10000	1000,218	0,001803	0,001275
	50000	1000,221	0,002121	0,001500
	100000	1000,226	0,004243	0,003000

Для выявления грубых ошибок (промахов) в рядах выявляли значения, отклоняющиеся от среднего арифметического на $\pm 3S_x$.

Таких значений во всех рядах обнаружено не было, что свидетельствует об отсутствии грубых ошибок. Проведена проверка полученных результатов на соответствие нормальному распределению. Выборка n составляла 20 измерений.

Количество классов (k) определяли по правилу Старджеса [8]:

$$i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}$$

где $k = 1 + 3,3 \lg n$, n – объем выборки.

Величина классического интервала рассчитывалась как отношение размаха варьирования к определенному числу классов:

$$i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}$$

Для построения кривых нормального распределения теоретические частоты рассчитывались в соответствии с уравнением:

$$f' = \frac{n \cdot i}{S_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x - \bar{x})^2}{2S_x^2}}$$

где f' – искомая ордината кривой (теоретическая частота), i – классический интервал, n – объем выборки, x – значение признака в классическом интервале, для которого определена теоретическая частота; $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение; S_x – среднее квадратическое отклонение.

Также было показано соответствие эмпирического и нормального распределения по критерию χ^2 [8]. Построены эмпирические и теоретические гистограммы распределения, в которых частота определялась как количество измерений, входящих в границы данного класса.

Количество классических интервалов было принято равным пяти. На рис. 3 приведены гистограммы теоретически рассчитанных нормальных распределений и эмпирических распределений для напряжений 500 В и 1000 В и частот 100 Гц и 100000 Гц.

Был рассчитан критерий χ^2 , критическое значение которого на уровне существенности различий 0,05 составляет 11,1. Полученные значения χ^2 для различных частот представлены в табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют считать, что результаты измерений соответствуют закону нормального распределения.

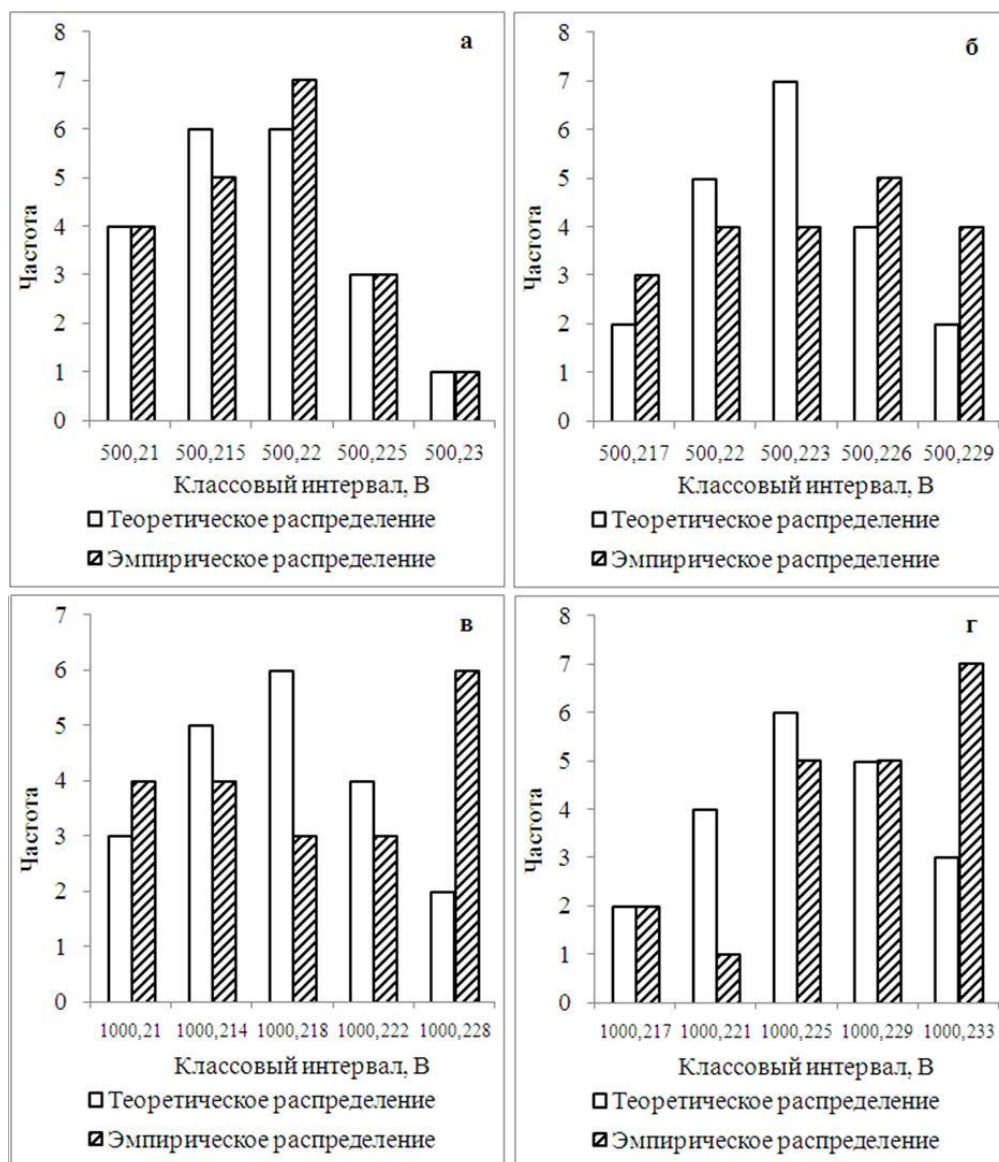


Рис. 3. Теоретические гистограммы распределения результатов измерений:
 а – 500 В/100 Гц; б – 500 В/100000 Гц; в – 1000 В/100 Гц; г – 1000 В/100000 Гц

Таблица 2

Значение критерия χ^2 , полученного при сопоставлении теоретического нормального и эмпирического распределения результатов измерений

Напряжение, В	500				
Частота, Гц	100	1000	10000	50000	100000
Значение χ^2	0,3	3,3	2,2	6,3	3,2
Напряжение, В	1000				
Частота, Гц	100	1000	10000	50000	100000
Значение χ^2	3,1	4,7	4,3	2,1	4,7

График зависимости СКО от частоты переменного напряжения для напряжений 500 В и 1000 В приведен на рис. 4.

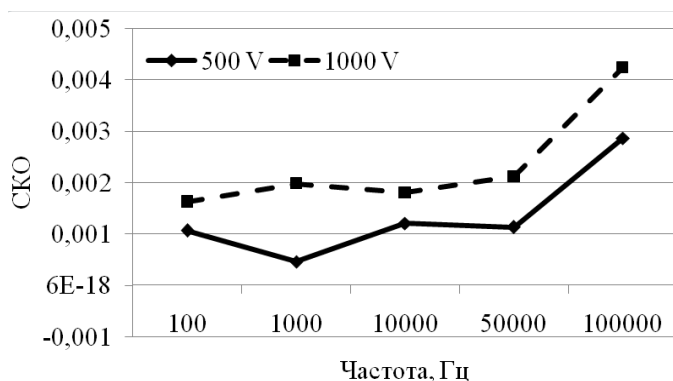


Рис. 4. График зависимости СКО от частоты

Выводы

Анализ экспериментальных данных показал, что правый и левый ЭСП сохраняют идентичность при переходе с переменного напряжения (на частотах 100 Гц, 1000 Гц, 10^4 Гц, $5 \cdot 10^4$ Гц, 10^5 Гц) на постоянное напряжение в пределах погрешности от порога чувствительности ЭКН, составляющей 0,0025 % при напряжении 100 В, 0,001 % при напряжении 200 В, 0,0005 % при напряжении 300 В и 0,0002 % при напряжении 400–1000 В.

Разброс результатов наблюдений объясняется нестабильностью источников (калибраторов) постоянного и переменного напряжения.

Разработанный ЭКН в составе измерительной установки может быть использован в электроизмерительных лабораториях для точных измерений переменного напряжения в диапазоне 100–1000 В и частотном диапазоне 20–100000 Гц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кнорринг, В. Г. Метрология и физико-технические измерения : учеб. пособие / В. Г. Кнорринг. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 120 с.
2. Векслер, М. С. Измерительные приборы с электростатическими механизмами / М. С. Векслер. – Л.: Энергия, 1974. – 176 с.
3. Комплект модулей термоэлектрических преобразователей высшей точности для сравнения переменного и постоянного напряжений / М. Л. Гуревич, А. В. Горшков, О. А. Кудрявцев, А. В. Куракин, П. Н. Русейкин, А. В. Черемохин // Измерительная техника, 2015. – № 8. – С. 53–57.
4. Патент РФ на полезную модель № 105511, МПК G12B 13/00. Устройство для крепления подвижной части электроизмерительных приборов / А. И. Нефедьев. Оpubл. 10.06.2011. Бюл. № 16.
5. Нефедьев, А. И. Принципы построения электромеханических компараторов одновременного и разновременного сравнения / А. И. Нефедьев // Новые промышленные технологии, 2011. – № 4. – 35–36.
6. Nefed'ev, A. I. Accurate AC/DC voltage measurements using electrostatic comparator / A. I. Nefed'ev, E. E. Nefed'eva // Journal of Electrostatics. – 2016. – Vol. 82. – P. 17–21.
7. Nefed'ev, A. I. An electrostatic voltage comparator // Measurement Techniques. – 2009. – Vol. 52. – № 6. – P. 650–655.
8. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введ. 01.01.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

УДК 621.311

*Н. С. Кузнецова, Д. Т. Нго, Ч. З. Нгуен***ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ****Волгоградский государственный технический университет**

artex23@yandex.ru; ndtvstu@gmail.com; zuzuvolga@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Надежда Сергеевна Кузнецова (artex23@yandex.ru)

В электроэнергетике в процессе эксплуатации энергетического оборудования возможны явления (короткое замыкание, обрыв, скачкообразное изменение какого-либо параметра цепи и т. п.), в которых возникают переходные процессы. При переходных процессах могут возникать большие перенапряжения, сверхтоки, электромагнитные колебания, которые нарушают работу систем автоматики и других устройств, вплоть до выхода их из строя. Необходимость исследования, анализа и расчета переходных процессов весьма актуальны для энергетических оборудования. В статье приведена методика цифрового моделирования линейного блока электроэнергетической системы с помощью метода z-форм.

Ключевые слова: цифровое моделирование, передаточная функция, переходные характеристики, короткое замыкание, цифровая обработка сигналов, переходные процессы.

*N. S. Kuznetsova, D. T. Ngo, C. Z. Nguyen***DIGITAL MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN RELAY PROTECTION SYSTEMS****Volgograd State Technical University**

artex23@yandex.ru; ndtvstu@gmail.com; zuzuvolga@gmail.com

Corresponding author: Nadezhda S. Kuznetsova (artex23@yandex.ru)

In the electric power industry, during the operation of power equipment, processes are possible (short circuit, break, abrupt change in any circuit parameter, etc.) in which transient processes occur. During transient processes, large overvoltages, overcurrents, and electromagnetic oscillations can occur, which disrupt the operation of automation systems and other devices, up to their failure. The need for research, analysis and calculation of transient processes is very relevant for energy equipment. The article presents a technique for digital modeling of a linear block of an electric power system using the z-form method.

Keywords: digital modeling, transfer function, transient characteristics, short circuit, digital signal processing, transient processes.

Основной способ анализа и расчета переходных процессов в любых линейных электрических цепях может проводиться различными методами [1, 2, 3]: классическим, операторным, частотным, цифрового моделирования, переменного состояния. Использование методов цифрового моделирования со схемой замещения позволяет привести математические модели всех элементов сложных систем к единой форме, обеспечить моделирование преобразования сигналов на едином языке, создать единую модель системы в реальном времени. А также широко использовать в качестве средства моделирования такие пакеты математических программ, как *MathLab*, *MathCad*, *Maple* и другие. При моделировании с помощью метода z-форм выбор метода (прямая разность, обратная разность, метод трапеций) и периода дискретизации численной модели влияет на погрешность моделирования и на чувствительность к устойчивости численной модели. Так,

например, при уменьшении периода дискретизации погрешность моделирования уменьшается, но в тоже время увеличивается чувствительность к неустойчивости решения и объем обрабатываемой информации [4, 5, 6].

Из проведенных результатов исследований [4] следует, что для выбора метода целесообразно использовать форму метода обратной разности. В качестве объекта исследования рассмотрено цифровое моделирование энергетических оборудования (синхронный генератор, трансформатор, линия электропередачи и синхронный двигатель) (рис. 1), которые в электроэнергетической системе представляются электрическими схемами замещения [9, 10].

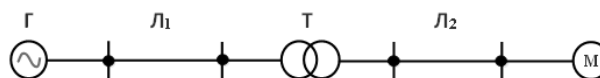


Рис. 1. Принципиальная схема электрической системы:
Г – синхронный генератор, Л1, Л2 – линия электропередачи,
Т – трансформатор, М – асинхронный двигатель

Синхронный генератор (рис. 2).



Рис. 2:

a – схема замещения синхронного генератора, *б* – операторная схема замещения

С помощью метода узловых потенциалов для схемы составлены уравнения в операторной форме:

$$\begin{cases} \varphi_2 \left(\frac{1}{pL} + \frac{1}{Z_{H_1}} \right) - \varphi_1 \frac{1}{pL} = 0 \\ \varphi_1 = U_E = U_{\text{вх}}(p) \\ \varphi_2 = U_{\text{вых}}(p) \end{cases}$$

Из системы уравнений получено выражение передаточной функции по p -переменной:

$$W_1(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{Z_{H_1}}{pL + Z_{H_1}}$$

Используя формулу перехода метода обратной разности $p = \frac{z-1}{zT}$, получена передаточная функция по z -переменной в дискретной форме:

$$W_1(z) = \frac{TZ_{H_1}}{(L + TZ_{H_1}) - Lz^{-1}} = \frac{a_{10}}{b_{10} + b_{11}z^{-1}}$$

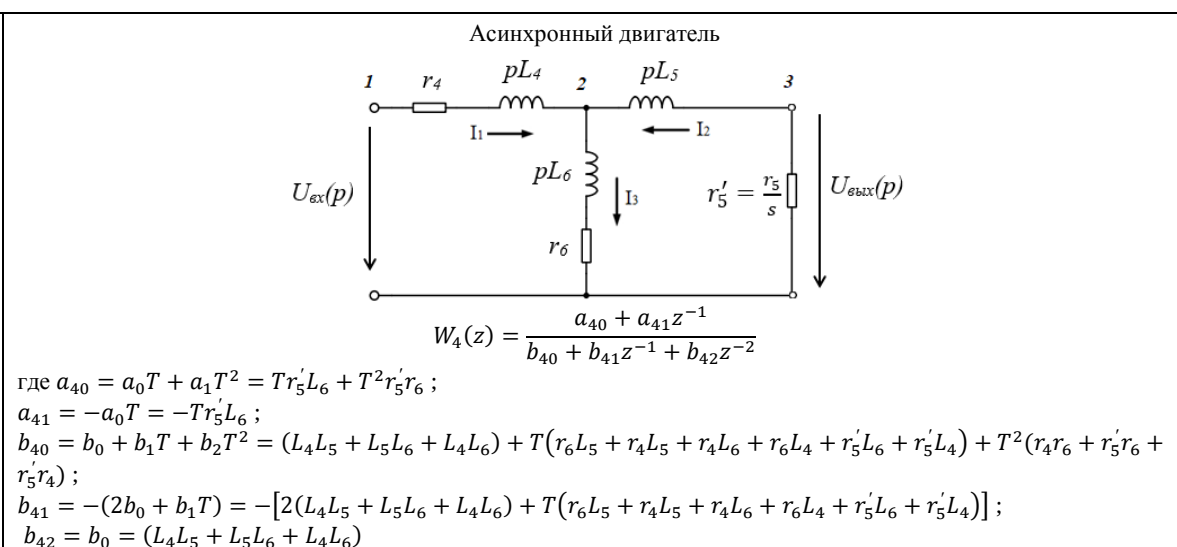
где $a_{10} = TZ_{H_1}$; $b_{10} = L + TZ_{H_1}$; $b_{11} = -L$.

Аналогично проведены такие же преобразования для остального оборудования (табл. 1).

Таблица 1

№	Операторная схема замещения Передаточная функция в z -форме
1	Линия электропередачи $W_2(z) = \frac{a_0 T^2}{(b_0 + b_1 T + b_2 T^2) - (2b_0 + b_1 T)z^{-1} + b_0 z^{-2}} = \frac{a_{20}}{b_{20} + b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}$ где $a_{20} = a_0 T^2 = 2T^2 Z_{H_2}$ $b_{20} = (b_0 + b_1 T + b_2 T^2) = CZ_{H_2}L_л + T(2L_л + R_л CZ_{H_2}) + T^2(2R_л + 2Z_{H_2})$ $b_{21} = -(2b_0 + b_1 T) = -[2CZ_{H_2}L_л + T(2L_л + R_л CZ_{H_2})]$ $b_{22} = b_0 = CZ_{H_2}L_л$
2	Трансформатор $W_3(z) = \frac{a_{30} + a_{31}z^{-1}}{b_{30} + b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}}$ где $a_{30} = a_0 T + a_1 T^2 = TL_3 Z_{H_3} + T^2 r_3 Z_{H_3}$ $a_{31} = -a_0 T = -TL_3 Z_{H_3}$ $b_{30} = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 = (L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_1 L_3) + T(r_3 L_2 + r_1 L_2 + r_2 L_1 + Z_{H_3} L_3 + r_1 L_3 + r_2 L_3 + Z_{H_3} L_1 + r_3 L_1) + T^2(r_3 Z_{H_3} + r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3 + r_1 Z_{H_3})$

Окончание табл. 1

3	Асинхронный двигатель  где $a_{40} = a_0T + a_1T^2 = Tr_5'L_6 + T^2r_5'r_6$; $a_{41} = -a_0T = -Tr_5'L_6$; $b_{40} = b_0 + b_1T + b_2T^2 = (L_4L_5 + L_5L_6 + L_4L_6) + T(r_6L_5 + r_4L_5 + r_4L_6 + r_6L_4 + r_5'L_6 + r_5'L_4) + T^2(r_4r_6 + r_5'r_6 + r_5'r_4)$; $b_{41} = -(2b_0 + b_1T) = -[2(L_4L_5 + L_5L_6 + L_4L_6) + T(r_6L_5 + r_4L_5 + r_4L_6 + r_6L_4 + r_5'L_6 + r_5'L_4)]$; $b_{42} = b_0 = (L_4L_5 + L_5L_6 + L_4L_6)$
---	--

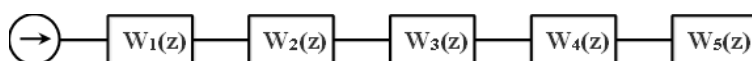


Рис. 3. Структурная схема реализации передаточной функции электрической системы

Для получения результирующей передаточной функции (рис. 3) необходимо представить ее в виде (1):

$$W(z) = \frac{F_{\text{вых}}(z)}{F_{\text{вх}}(z)} = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_mz^{-m}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_hz^{-h}} \quad (1)$$

Для получения выходного сигнала $f_{\text{вых}}[n]$ на входное воздействие $f_{\text{вх}}[n - k]$ в тактовые моменты времени использовано разностное уравнение (2):

$$f_{\text{вых}}[n] = \frac{1}{b_0} \left(\sum_{k=0}^m a_k f_{\text{вх}}[n - k] - \sum_{k=1}^h b_k f_{\text{вх}}[n - k] \right) \quad (2)$$

где m, h – максимальные степени полиномов числителя и знаменателя передаточной функции соответственно.

Вычисление передаточной функции энергетической системы численным методом затруднительно ввиду получившейся высокой степени ($m = 9$). Поэтому для расчета значений функций оригиналов по предложенным z -изображениям (обратная разность) с помощью рекурсивных выражений (1) и (2) написана программа, блок-схема алгоритма которой представлена на рис. 4.

Для моделирования задан период дискретизации $T = 0,01$ с, а также параметры элементов схем замещения. За входное воздействие принята функция Дирака (δ -импульс), которая определяется следующим образом:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \neq 0 \\ 1, & \text{при } t = 0 \end{cases}$$

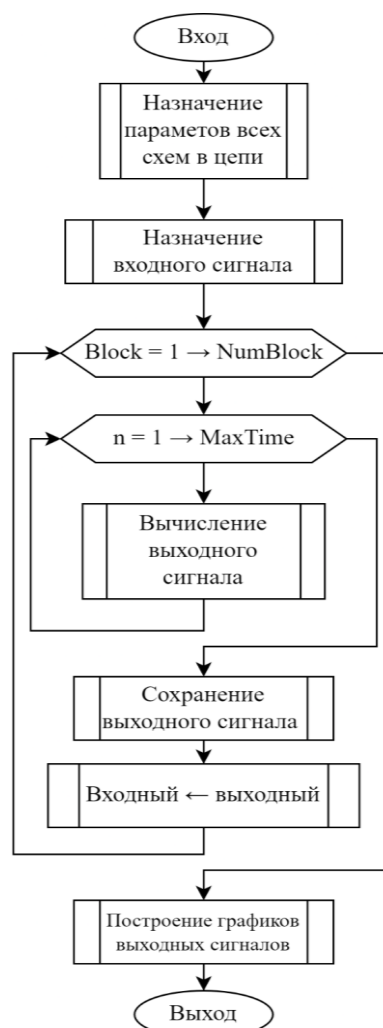


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета значений функций оригиналов

Проведено вычисление значений импульсных функций $k[n]$ в тактовые моменты времени с входным воздействием единичного импульса. График импульсной характеристики $k[n]$ приведен на рис. 5.

Вычисление выходного сигнала $k[n]$ линейных блоков при воздействии единичного импульса на входе электрической системы показано на рис. 6.

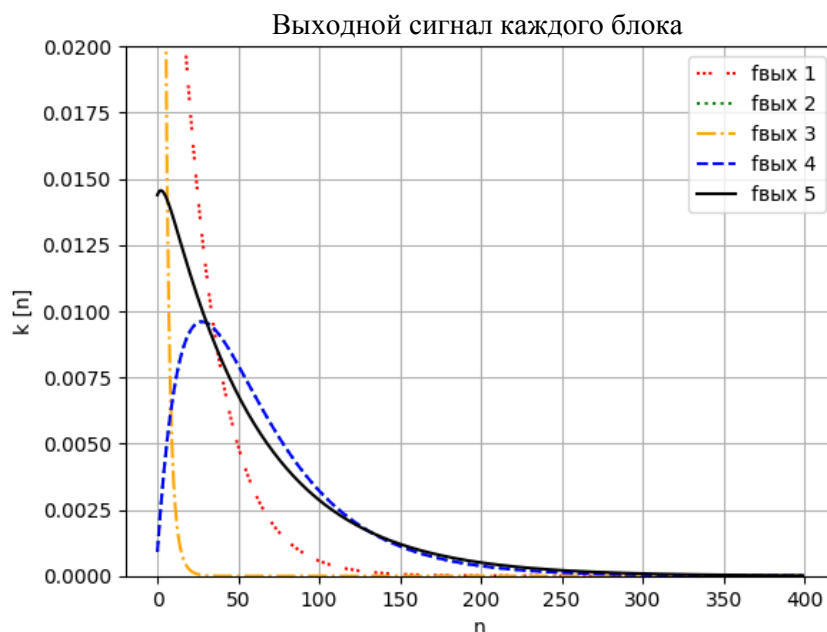


Рис. 5. Импульсная характеристика каждого энергетического блока

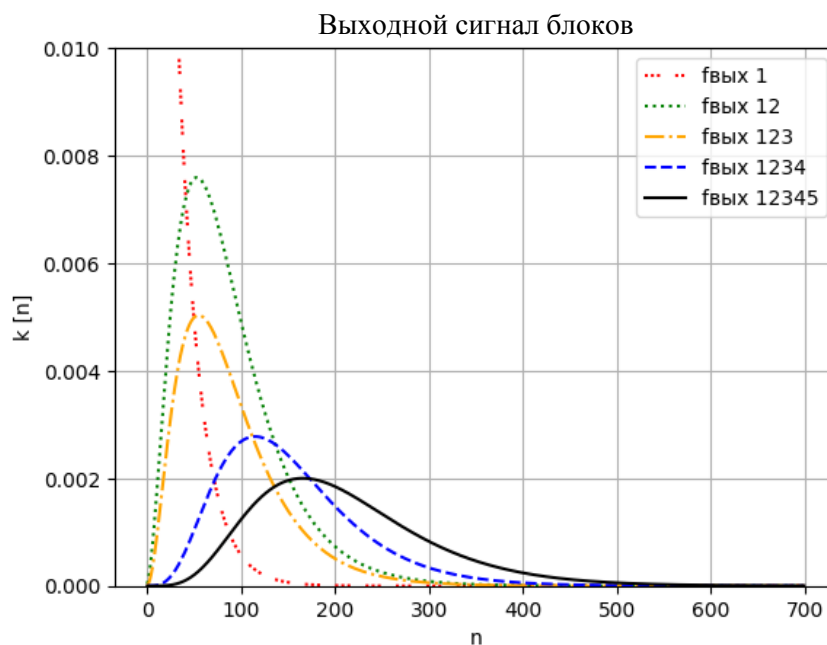


Рис. 6. Импульсная характеристика последовательного соединения блоков электрической системы

Из графика импульсной характеристики (рис. 6) с помощью алгоритма вычисления компьютерного программы получены тактовые моменты времени, при которых выходной сигнал функции достигает максимального значе-

ния (табл. 2). На основании этого можно сделать вывод о том, что в энергетической системе переходный процесс происходит с длительным временем или задержкой по времени.

Таблица 2

Последовательные соединения блоков	Тактовые моменты времени [n] при $k = \max$	Максимальное значение $k[n]$
$f_{\text{вых } 1}$	0	0.0421455938697318
$f_{\text{вых } 12}$	53	0.007592902640850198
$f_{\text{вых } 123}$	55	0.005030934404084304
$f_{\text{вых } 1234}$	115	0.002776866139550172
$f_{\text{вых } 12345}$	166	0.002001582253972229

Из проведенного анализа следует, что с помощью метода z-форм возможно получить выражение дискретной передаточной функции без дополнительных вычислений. При расчетах переходных процессов цифровое моделирование методом z-форм позволяет определить импульсные характеристики с помощью рекуррентной формулы с учетом реального воздействия. Эти операции легко реализуются с помощью существующих пакетов математических программ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
2. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – М.; СПб.: Питер, 2006.
3. Атабеков, Г. И. Основы теории цепей: учебник / Г. И. Атабеков. – М.; СПб.: Лань, 2008.
4. Шилин, А. Н. Цифровое моделирование электротехнических и электронных устройств: монография / А. Н. Шилин, О. А. Крутякова. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2014. – 132 с.
5. Шилин, А. Н. Анализ точности моделирования аналоговых САУ / А. Н. Шилин, К. Е. Кострюков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 7. – С. 18–21.
6. Шилин, А. Н. Исследование методов цифрового моделирования аналоговых САУ / А. Н. Шилин, Е. Г. Зенина, С. А. Бедкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 7. – С. 46–50.
7. Шилин, А. Н. Анализ устойчивости численного моделирования аналоговых САУ / А. Н. Шилин, О. А. Крутякова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 4. – С. 7–10.
8. Шилин, А. Н. Определение параметров численных моделей динамических звеньев аналоговых САУ / А. Н. Шилин, О. А. Крутякова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 9. – С. 17–19.
9. Веников, В. А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах: Учеб. для электро-энергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с., пл.
10. Ульянов, С. А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. Учебное пособие для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С. А. Ульянов. – М., «Энергия», 1968.

УДК 621.839.36

В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, А. И. Искалиев

**ПЛАНЕТАРНАЯ ПЕРЕДАЧА С УПРУГИМИ ШАРНИРНЫМИ СВЯЗЯМИ
МЕЖДУ СЕКТОРОМ САТЕЛЛИТНОГО БЛОКА И ВОДИЛОМ**

Волгоградский государственный технический университет

shehovtsov@vstu.ru; tslmvvsturu@mail.ru; paulflinx@gmail.com; asamat-iskaliev@mail.ru
Автор, ответственный за переписку: Виктор Викторович Шеховцов (shehovtsov@vstu.ru)

В статье рассмотрена эволюция технических решений узла планетарной передачи в конструкциях колесных и гусеничных машин, направленная на снижение динамической нагруженности их деталей во время эксплуатационных динамических режимов нагружения. Проанализированы конструкции передач с упругим креплением зубчатых колес на осях, с компенсационным узлом в виде сферического подшипника и с секторной конструкцией водила.

Ключевые слова: планетарная передача, техническое решение, упругие элементы, компенсационный узел, секторная конструкция водила.

V. V. Shekhovtsov, M. V. Ljashenko, P. V. Potapov, A. I. Iskaliev

**PLANETARY GEAR WITH ELASTIC JOINTS BETWEEN
SATELLITE SECTOR BLOCK AND CARRIER**

Volgograd State Technical University

shehovtsov@vstu.ru; tslmvvsturu@mail.ru; paulflinx@gmail.com; asamat-iskaliev@mail.ru
Corresponding author: Victor V. Shekhovtsov (shehovtsov@vstu.ru)

This article describes evolution of schemes of planetary gears in wheeled and tracked vehicles transmissions aimed to reducing of dynamic loading of transmission details during operational load regimes. Designs of transmissions with an elastic mount of gears on axles with the compensative unit made as spherical bearing and with sectorial design of planetary carrier.

Keywords: planetary gear, technical solutions, elastic elements, compensational unit, sectorial design of planetary carrier.

Введение

Одним из самых нагруженных в конструкциях колесных и гусеничных машин является комплекс узлов силовой передачи, детали которой в процессе эксплуатации постоянно работают в режиме динамического нагружения [1–9]. Переменные нагрузки на этих деталях формируются в результате действия как внешних, так и внутренних возмущений. Основными среди внешних считаются флуктуации тягового сопротивления машины и крутящего момента ее двигателя, возмущения от колебаний остова (кузова) на подвеске, для гусеничных машин – от неравномерности

перемотки звенчатой гусеницы, а также воздействия со стороны системы управления. Основными среди внутренних считаются кинематические и силовые возмущения от перезацепления шестерен, несоосности валов, неравномерности вращения кардана, деформаций и смещений корпусных деталей [10–18]. Неравномерность действия нагрузок вызывает крутильные и изгибные колебания в валопроводе силовой передачи. Их роль в процессе накопления усталостных повреждений значительна. По современным данным, до 80 % отказов в силовых передачах обязано своим происхождением именно колебаниям.

В этом комплексе узлов многих современных колесных и гусеничных машин часто используются планетарные передачи. Они обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными редукторами с неподвижными осями зубчатых колес, так как при меньших габаритах и меньшей металлоемкости обеспечивают возможность получения больших передаточных чисел. Однако для изготовления ряда их деталей необходимы более дорогостоящие материалы и более совершенные технологии. Так, в частности, для уменьшения габаритов передач в их конструкциях часто используют игольчатые подшипники качения, в качестве наружного и внутреннего кольца которых используют соответственно обработанные поверхности соединяемых деталей. В режимах переменного нагружения изменяется пространственное местоположение контактирующих деталей, имеют место несовпадения осей вращения, перекосы и смещения [4–7]. Вследствие этого нарушается контактное взаимодействие сопрягаемых пар – зубьев шестерен и подшипников. Зона контакта зубьев искажается по сравнению с расчетной, уменьшается ее площадь. Из-за перекосов деталей конических, роликовых или игольчатых подшипников контакт по линии вырождается в контакт в точке, вследствие чего многократно увеличиваются контактные напряжения, что ведет к повышенному износу и преждевременному выходу деталей из строя. В настоящей статье рассмотрены предложения авторов, предметом которых является совершенствование конструкции планетарной передачи за счет уменьшения влияния выше оговоренных явлений.

1. Планетарная передача с упругим креплением зубчатых колес на осях

Эволюция технических решений планетарных передач связана с усложнением их конструкций, что вполне оправданно, так как каждое усложнение направлено на устранение одного или нескольких недостатков. Одним из решений на пути совершенствования передач является предложенная в 1988 году изобретателями Минского тракторного завода планетарная передача (рис. 1) [19], в конструкции которой предусмотрено закрепление зубчатых колес на осях через упругие элементы.

При создании технического решения авторы руководствовались стремлением повышения надежности и долговечности передачи путем равномерного распределения нагрузки между

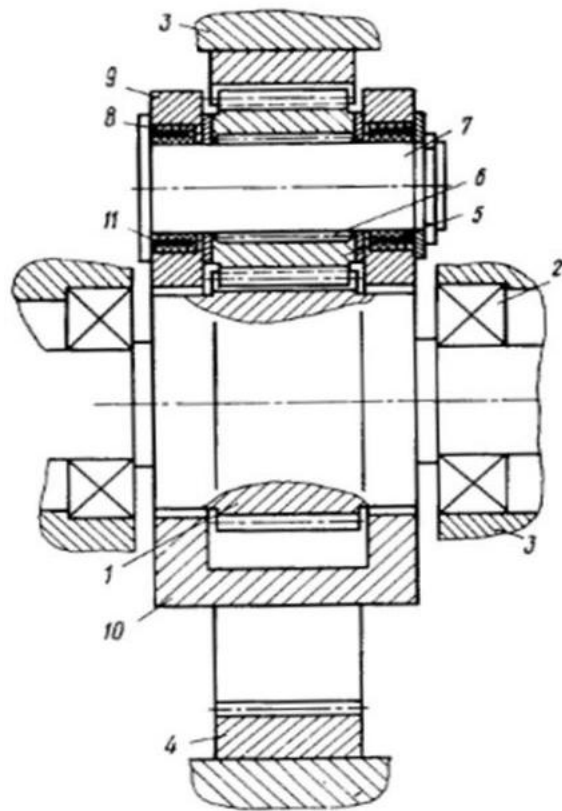


Рис. 1. Планетарная передача с упругим креплением зубчатых колес

сателлитами при одновременном снижении чувствительности к погрешностям изготовления и монтажа и устранения неустойчивости движения сателлита.

Передача содержит центральное колесо 1, размещенное на подшипниках 2 в корпусе 3, центральное колесо 4, закрепленное неподвижно в корпусе 3, и расположенные между колесами 1 и 4 три сателлита 5, которые установлены на игольчатых подшипниках 6 на осях 7.

Оси 7 сателлитов размещены на упругих элементах 8, запрессованных в щеки 9 водила 10. Элементы 8 из резины имеют армирующие втулки 11. Один из торцов втулки 1 постоянно контактирует с торцом водила 10.

Во время работы передачи крутящий момент, подведенный к центральному колесу 1, передается через зубчатые зацепления сателлитов 5 и центрального колеса 4 на игольчатые подшипники 6, которые, опираясь на оси 7, через упругие элементы 8 передают вращение водилу 10 через щеки 9. Перемещение сателлитов 5 влечет за собой такое же перемещение и их осей 7, которые, опираясь на упругие элементы 8, деформируясь, позволяют занять сателлитам 5 между центральными колесами 1 и 4 равновесное состояние, равномерно распределяя нагрузку

ку не только по длине и ширине зубчатых зацеплений, но и между каждым сателлитом 5 и колесами 1 и 4.

Контакт торца втулки с торцом водила способствует отводу тепла от упругих материалов на массивные детали планетарной передачи, уменьшая тем самым температуру в упругих материалах, что увеличивает их долговечность при сохранении упругими материалами своих физико-химических свойств.

2. Планетарная передача с компенсационным узлом – сферическим подшипником

Надежность узла планетарной передачи, в которой крепление зубчатых колес на осях осуществляется через упругие элементы, при

передаче существенных крутящих моментов представляется недостаточной. При участии одного из соавторов статьи в 2003 году было предложено более сложное техническое решение планетарной передачи с компенсационным узлом в виде сферического подшипника [20]. Авторами ставилась задача создания планетарной передачи с малыми осевыми габаритами сателлитного узла со сниженной виброактивностью и выровненной нагрузкой по длине контактных линий зубчатых зацеплений сателлитов с центральными колесами и между сателлитами. На рис. 2, а показан общий вид передачи, на рис. 2, б – ее сателлитный узел.

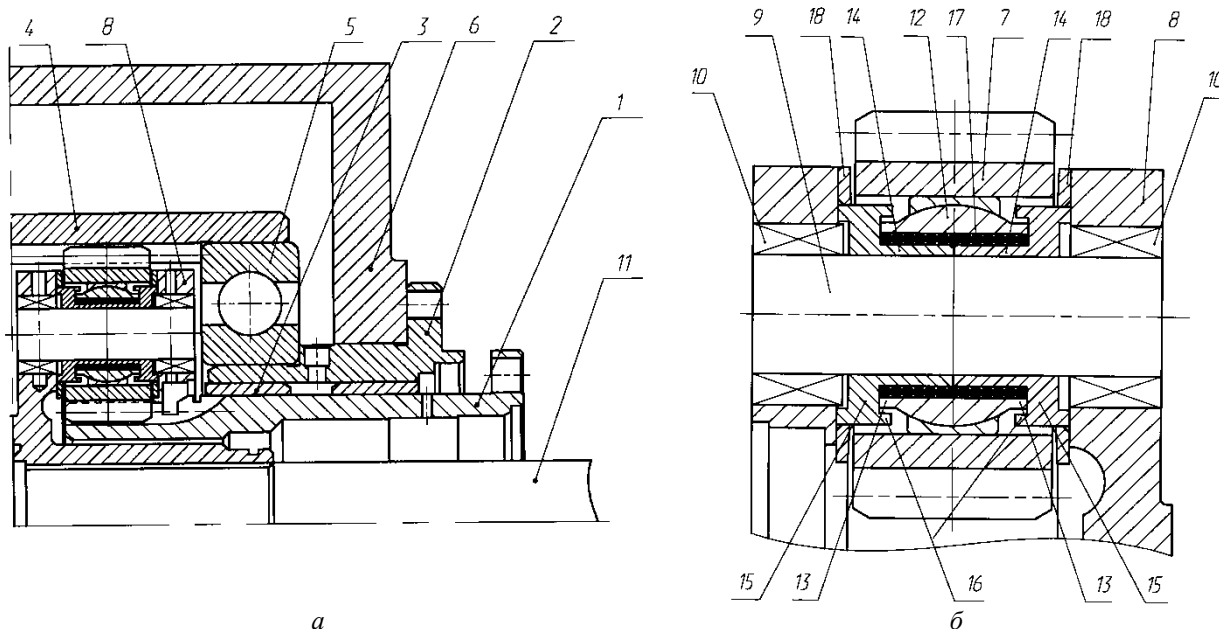


Рис. 2. Планетарная передача с компенсационным узлом в виде сферического подшипника

Передача содержит центральное колесо внешнего зацепления 1, размещенное в стакане 2 на подшипниках скольжения 3, центральное колесо внутреннего зацепления 4, установленное на подшипниках качения 5, опирающихся на стакан 2, установленный в расточке корпуса 6, трех сателлитов 7, расположенных в водиле 8 на осях 9. Оси 9 опираются на игольчатые подшипники качения 10, запрессованные в отверстия щек водила 8, соединенного с валом 11.

Планетарный ряд образуют центральные колеса 1, которое является заторможенным, и 4, к которому подводится крутящий момент, сателлиты 7 и водило 8, предназначенное для передачи крутящего момента валу 11, с которого он снимается.

Стакан 2 выполняет роль опоры колеса 1 посредством подшипников скольжения 3 в виде бронзовых втулок, и колеса 4, установленного на нем через подшипник качения 5.

Сателлиты 7 установлены на осях 9 посредством компенсационного узла, который состоит из шарнирного подшипника 12 с двумя выступами 13 на внутреннем кольце, двух втулок 14 с направляющими буртами 15 и заплечиками 16 на них, набора колец 17 круглого сечения, расположенных между отверстием внутреннего кольца шарнирного подшипника 12 и наружной поверхностью втулок 14.

Шарнирный подшипник 12 служит для компенсации перекоса и непараллельности образующих зубьев сателлита 7 в зацеплениях с центральными колесами 1 и 4.

Внутреннее кольцо подшипника 12 с выступами 13 на нем располагается между двух направляющих буртов 15 втулок 14. Выступы 13 совместно с направляющими буртами 15 образуют поступательную пару и предназначены для обеспечения радиального перемещения подшипника 12 с сателлитом 7.

Заплечики 16 на направляющих буртах 15 предназначены для ограничения радиального перемещения подшипника 12 с сателлитом 7 при возникновении перегрузок, при этом заплечики 16 не позволяют выступам 13, а значит и подшипнику 12 с сателлитом 7, перемещаться в радиальном направлении.

На наружной поверхности направляющих буртов 15 установлены дистанционные кольца 18 из антифрикционного материала, предназначенные для ограничения углового положения сателлита 7 и предотвращения его контакта со щеками водила 8.

Кольца 17 предназначены для снижения виброактивности, выравнивания нагрузки между сателлитами 7 и выполняются из упругоэластичного материала. Радиальную статическую жесткость каждого кольца можно определить по следующей формуле:

$$C = \frac{4T_{\max} \cos \alpha_{tw}}{d_{tw} (j_{\max} - j_{\min}) z},$$

где $T_{\max}$ – максимальный крутящий момент на центральном колесе 4; tw – угол зацепления; d_{tw} – диаметр начальной окружности центрального колеса внутреннего зацепления; z – количество колец; $j_{\max}$, $j_{\min}$ – максимальный и минимальный боковой зазор в зацеплении соответственно при наихудшем и наилучшем сочетании полей допусков на детали передачи.

Диаметр сечения колец меньшего диаметра 17 должен быть меньше диаметра сечения колец большего диаметра на величину максимально возможной разницы боковых зазоров $V = (j_{\max} - j_{\min})$ сателлитов 7 с центральными колесами 1 и 4, образованных за счет погрешностей изготовления деталей. Кольца 17 меньшего диаметра служат для предотвращения перегрузок за счет повышения суммарной жесткости набора колец 17 при деформации колец большего диаметра на величину Δ .

Во время работы передачи крутящий момент, подводимый к колесу 4, передается водилу 8 и валу 11 через зацепления сателлитов 7 с колесами 1 и 4, компенсационный узел, оси 9 и игольчатые подшипники 10. Погрешности изготовления деталей вызывают перекося обра-

зующих зубьев сателлитов 7 и центральных колес, приводящий к неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий и появлению момента упругих сил относительно центра подшипника 12. Появление момента упругих сил вызвано тем, что перекося и непараллельность образующих зубьев сателлита 7 с колесом 1 не равен перекося и непараллельности образующих зубьев сателлита 7 с колесом 4. Этот момент уравнивается моментом трения в подшипнике 12. Самоустановка каждого сателлита 7, обеспечивающая выравнивание нагрузки по длине контактных линий зубчатых зацеплений сателлита с центральными колесами, происходит за счет дополнительных угловых подвижностей относительно центров сфер шарнирных подшипников 12.

Разница боковых зазоров сателлита 7 с центральными колесами 1 и 4 вызывает неравномерность распределения нагрузки между сателлитами 7, выравнивание которой достигается за счет упругой деформации колец 17 большего диаметра. Нагружение колец 17 производится через внутреннее кольцо подшипника 12 строго в радиальном направлении благодаря выступам 13 на нем и направляющим буртам 15 втулок 14. Кольца 17 меньшего диаметра служат для предотвращения перегрузок, а заплечики 16 на направляющих буртах 15 – для ограничения осевого перемещения сателлитов 7.

Таким образом, включение шарнирного подшипника в компенсационный узел позволяет выровнять нагрузку по длине контактных линий зубчатых зацеплений сателлита с центральными колесами за счет дополнительной угловой подвижности или степени свободы, которая дает возможность сателлиту самоустанавливаться под действием момента упругих сил, возникающего из-за неравномерности распределения нагрузки по длине контактных линий зубчатых зацеплений сателлита с центральными колесами, вызванной погрешностями изготовления деталей.

Снижение неравномерности распределения нагрузки между сателлитами происходит за счет упругой деформации колец с большим диаметром, которая в несколько раз превышает величину упругой деформации металла, что позволяет компенсировать максимально возможную разницу боковых зазоров в зацеплениях сателлитов с центральными колесами, возникающую из-за погрешностей изготовления деталей и являющуюся причиной неравномерного распределения нагрузки между сателлитами.

Кольца меньшего диаметра позволяют предотвратить перегрузки за счет повышения суммарной жесткости набора колец при деформации колец большего диаметра на величину максимально возможной разницы боковых зазоров в зацеплениях сателлитов с центральными колесами.

Выполнение колец из упругоэластичного материала позволяет снизить виброактивность передачи за счет потерь на передеформацию данного материала.

В целом применение в передаче компенсационного узла, через который сателлиты устанавливаются на осях, позволяет одновременно выровнять нагрузку между сателлитами и по длине контактных линий зубчатых зацеплений сателлита с центральными колесами и снизить виброактивность при малых осевых габаритах сателлитного узла.

3. Планетарная передача с секторной конструкцией водила

Анализ предыдущего технического решения показал, что материал колец из упругоэластичного материала не обеспечивает достаточную надежность и долговечность передачи при высоких температурах смазочной и охлаждающей жидкости. Профессором Шевчуком Вл. П., ряд научных работ которого посвящен повышению долговечности планетарных передач, высказана идея использования в конструкции секторного сателлитного блока. В развитие его идеи для устранения отмеченных выше недостатков авторами предложено и запатентовано новое техническое решение [21], в котором водило выполнено состоящим из секторов сателлитного блока и ступицы (рис. 3).

На рис. 3, а показан общий вид планетарной передачи в разрезе; на рис. 3, б – сателлитный блок; на рис. 3, в – разрез по А-А на рис. 3, б; на рис. 3, г – общий вид планетарной передачи; на рис. 3, д – разрез по Б-Б на рис. 3, г; на рис. 3, е – ступица водила; на рис. 3, ж – разрез по В-В на рис. 3, е; на рис. 3, з – компенсационный узел в виде шлицевого соединения.

В данной конструкции снижение неравномерности распределения нагрузки между сателлитами и по длине их зубьев происходит за счет радиального смещения и поворота секторов сателлитного блока под воздействием сил, возникающих в зацеплениях всех сателлитов с центральными колесами, в пределах осевых зазоров в зацеплениях короткого шлицевого соединения сателлитного блока с секторами перемычек ступицы составного водила.

Шлицевое соединение сателлитного блока и ступицы имеет осевой и радиальный зазоры, которые в совокупности с возможностями относительных поворотов секторов за счет сферических подшипников позволяют сателлитному блоку самоустанавливаться между центральными колесами, выравнивая нагрузку между сателлитами и по длине зубьев сателлитов с учетом погрешностей изготовления всех элементов планетарной передачи и погрешностей монтажа.

Планетарная передача содержит центральное колесо внешнего зацепления 1 (рис. 3, а), размещенное в стакане 2 на подшипниках скольжения 3, центральное колесо внутреннего зацепления 4, установленное на подшипниках качения 5, опирающихся на стакан 2, установленный в расточке корпуса 6, водила 7, состоящего из составленного из секторов сателлитного блока 8 и ступицы 9.

Сателлитный блок 8 состоит из секторов 10 (рис. 3, б), представляющих часть дуги окружности, которые жестко связаны последовательно между собою с помощью шаровой опоры 11, установленными на осях 12 (рис. 3, д), расположенными перпендикулярно плоскости дуги сектора по окружности между сателлитами 13 (рис. 3, г). Для передачи крутящего момента ступице 9 на однозубой части вилки сектора выполнены участки внутренней поверхности шлицевого соединения 14. На внешних поверхностях секторов 15 (рис. 3, е) сектора венца ступицы 9 выполнены внешние участки узкого шлицевого соединения 16 (рис. 3, ж), зацепляющейся с внутренней шлицевой поверхностью 14, расположенными на однозубых частях вилок 17 между щеками (рис. 3, в) Внутренние шлицы 16 расположены в зоне однозубых вилок секторов 10, а внешние шлицы 14 расположены на внешних поверхностях секторов 10 венца ступицы 9.

В секторе 10 расположен сателлитный блок, состоящий из сателлита 13, оси 18, опирающихся на игольчатые подшипники качения 19.

Планетарный ряд образуют центральное колесо внешнего зацепления 1, которое является заторможенным, центральное колесо внутреннего зацепления 4, к которому подводится крутящий момент, сателлиты 13 и водило 7, предназначенное для передачи крутящего момента валу 20, с которого он снимается.

Стакан 2 выполняет роль опоры колеса 1 посредством подшипников скольжения 3 в виде бронзовых втулок, которые запрессовываются в отверстие стакана 2, и для колеса 4, установленного на нем через подшипник качения 5.

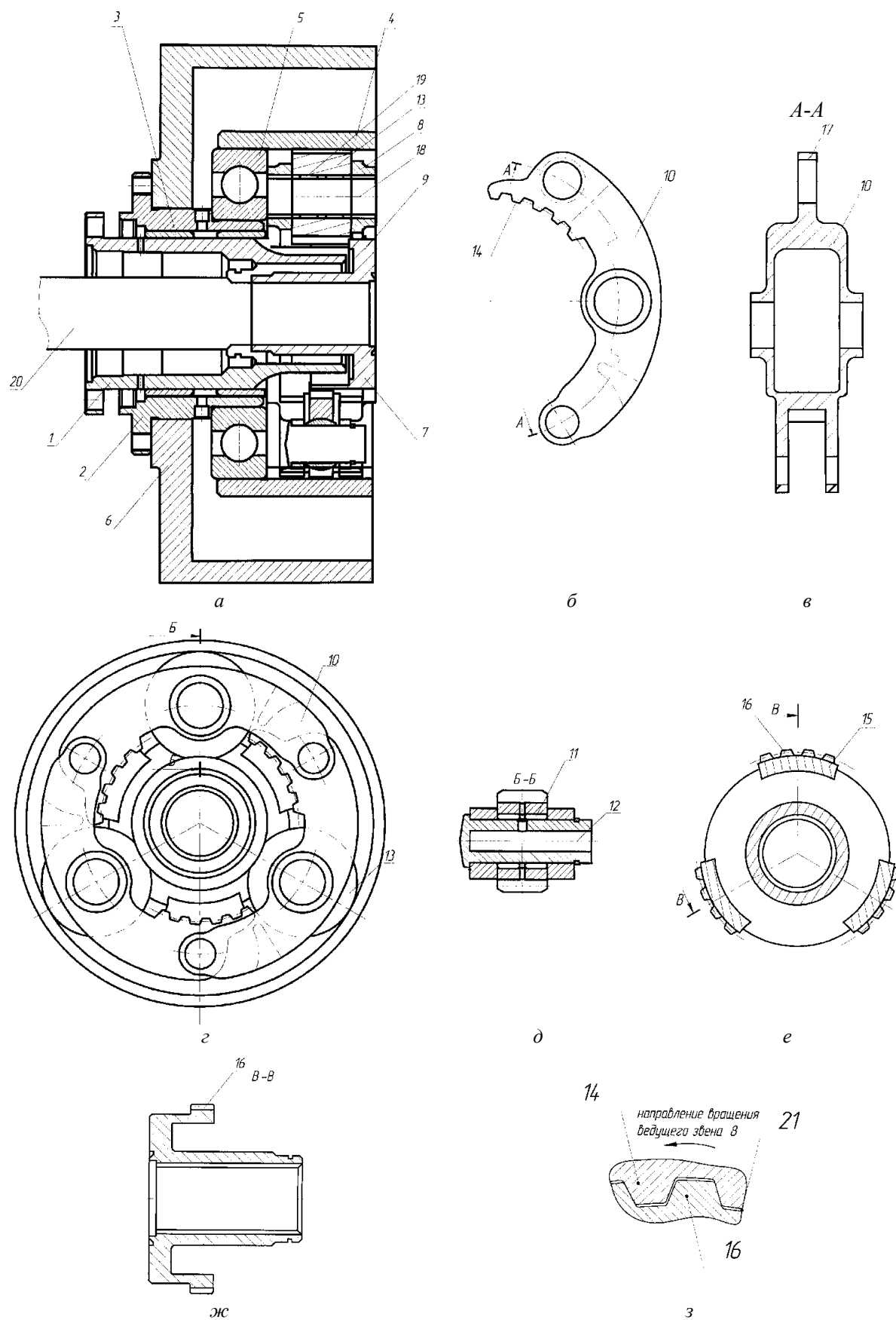


Рис. 3. Планетарная передача с секторной конструкцией водила

Сателлитный блок 8 соединен шлицевым соединением 21 (рис. 3, з) со ступицей 9 (рис. 3, а), поверхности которого располагается в кольцевом объеме 21, ограниченном центральными колесами 1 ($D_{\text{внутр}}$) и 4 ($D_{\text{наруж}}$) и секторами 10 сателлитного блока 8. Это шлицевое соединение 21, представляющее собой компенсационный узел и имеющее достаточные боковые и радиальные зазоры, в совокупности с угловой подвижностью секторов сателлитного блока, обусловленную наличием сферических подшипников, обеспечивает передачу крутящего момента от водила 7 к валу 20 планетарной передачи с самоустановкой сателлитного блока в радиальном и угловых направлениях относительно центральных колес под воздействием сил, возникающих в зацеплениях сателлитов с центральными колесами передачи и выравнивание нагрузки между сателлитами.

Во время работы передачи крутящий момент, подводимый к колесу 4, передается сателлитному блоку 8 водила 7 и валу 20 через зацепления сателлитов 13 с центральными колесами 1 и 4, оси 18 и подшипники 19. От сателлитного блока 8 момент передается ступице водила 9 посредством участков подвижного шлицевого соединения 21, расположенного участками в промежутках между сателлитами 13, представляющего собой компенсационный узел и имеющего осевые и радиальные зазоры. Участки внутренней шлицевой поверхности 14 расположены в зоне однозубых вилок секторов сателлитного блока, внешние участки шлицевой поверхности – на внешних поверхностях секторов 15 венца ступицы 9, где образована внешняя шлицевая поверхность 16.

Описанная конструкция позволяет повысить надежность и долговечность планетарной передачи за счет применения водила, состоящего из составного сателлитного блока и ступицы, где сателлитный блок состоит из секторов, соединенных посредством сферических подшипников, а ступица и сателлитный блок соединены подвижным шлицевым соединением, которое в совокупности со сферическими подшипниками позволяет одновременно выравнивать нагрузку между сателлитами и по длине контактных линий зубчатых зацеплений сателлитов с центральными колесами при малых осевых габаритах сателлитного узла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование динамической нагруженности участков силовой передачи трактора Четра 6С-315 / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, И. А. Иванов, А. В. Калмыков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Наземные транспортные системы»; вып. 5). – С. 47–50.
2. Research of dynamic characteristics of Chetra-6C315 tractor's power transmission / А. В. Калмыков, П. В. Потапов, В. В. Шеховцов, Е. В. Клементьев, Н. С. Соколов-Добрев // 31st Seminar of the Students' Association for Mechanical Engineering, Warsaw, Poland, May 22nd – 25th, 2012: book of Abstracts / Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. – Warsaw, 2012. – P. 21–22.
3. Снижение динамической нагруженности трансмиссии трактора за счет ввода упругого реактивного звена / А. В. Калмыков, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, М. В. Ляшенко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 21 (124) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Наземные транспортные системы»; вып. 7). – С. 24–28.
4. Крутильные колебания от основных эксплуатационных нагрузок в валопроводе силовой передачи трактора ВТ-100 / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Вл. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, К. В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7 (ч. 2). – С. 125–128.
5. Исследование динамических характеристик трансмиссии сельскохозяйственного трактора 6-ого тягового класса / Вл. П. Шевчук, В. В. Шеховцов, Е. В. Клементьев, Н. С. Соколов-Добрев, А. В. Калмыков // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 2. – С. 44–49.
6. Исследование динамических процессов в силовой передаче гусеничного трактора тягового класса 6 при повороте / А. В. Калмыков, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, К. О. Долгов // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24–26 сент. 2013 г. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2013. – С. 161–162.
7. Динамическая нагруженность силовых элементов трансмиссии гусеничного трактора при эксплуатации в режиме «разгон – остановка» / Е. И. Тескер, В. В. Шеховцов, В. Ю. Тараненко, К. П. Подшивалин // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 8. – С. 21–23.
8. Влияние динамической связанности звеньев силовой цепи на характер распространения крутильных колебаний в валопроводе / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Вл. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, К. В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7 (ч. 2). – С. 128–131.
9. The Computational Research of the Dynamic Load of the Power Train Sites of the Caterpillar Tractor = Расчетные исследования динамической нагруженности участков силовой передачи гусеничного трактора / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко, А. В. Калмыков // The Archives of Automotive Engineering / Archiwum Motoryzacji. – 2013. – Vol. 60, No. 2. – С. парал.: 79–91 (англ.); 195–208 (рус.).
10. Строкатов, М. А. Экспериментальное исследование нагруженности трансмиссии гусеничного трактора при синфазной и несинфазной установке ведущих колес / М. А. Строкатов, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев // Молодой ученый. – 2014. – № 8 (67, июнь-1), часть 3. – С. 262–267.
11. Строкатов, М. А. Экспериментальное исследование крутящего момента трактора ДТ-120 при трогании / М. А. Строкатов, В. В. Шеховцов // Тезисы докладов смотря-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, май 2014 г. / редкол.: А. В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, СНТО. – Волгоград, 2014. – С. 110.

12. Перспективы использования упругого реактивного звена в силовой передаче трактора / А. В. Калмыков, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Н. С. Соколов-Добрев, З. А. Годжаев // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 12. – С. 20–24.

13. Динамическая нагруженность силовой передачи трактора при изменении крутильной жесткости реактивного звена / А. В. Калмыков, Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко // Технология колесных и гусеничных машин. – 2014. – № 5. – С. 17–23.

14. Метод снижения динамической нагруженности силовой передачи гусеничного трактора / Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, А. В. Калмыков // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 6–10.

15. Использование в трансмиссии трактора реактивного звена с переменной податливостью / А. В. Калмыков, М. В. Ляшенко, Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (166) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Наземные транспортные системы»; вып. 12). – С. 24–32.

16. Шеховцов, В. В. Анализ и синтез динамических параметров элементов силовых передач тягово-транспортных средств: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов / В. В. Шеховцов,

Н. С. Соколов-Добрев, М. В. Ляшенко; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 140 с.

17. Шеховцов, В. В. Decreasing of the Dynamic Loading of Tractor Transmission by Means of Change of the Reactive Element Torsional Stiffness / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, П. В. Потапов // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1239–1244.

18. Снижение динамической нагруженности трансмиссии тягово-транспортного средства за счет элемента с управляемыми упруго-диссипативными свойствами / З. А. Годжаев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, А. И. Искалиев, Шиян Я. Э. Энрикес // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 5 (349). – С. 157–164. – DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-157-164.

19. Пат. 1427117 Российская Федерация, МПК F16H 1/48. Планетарная передача / П. Н. Стефанюк, И. В. Милан, В. В. Романюк, В. С. Лешков; ПО МТЗ. – 1988.

20. Пат. 2217634 Российская Федерация, МПК F16H 1/48. Планетарная передача / А. В. Морозов, В. П. Шевчук, Г. М. Мишарев, И. А. Долгов; ВолгГТУ. – 2003.

21. П.м. 83307 РФ, МПК F 16 H 1/48. Планетарная передача / Вл. П. Шевчук, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, И. В. Лавров, Ал. В. Фетисов, А. С. Горобцов, А. Н. Иконников; ВолгГТУ. – 2009.

УДК 621.825.7

В. В. Шеховцов, Ш. Я. Э. Энрикес, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, А. И. Искалиев

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УПРУГИХ МУФТ ДЛЯ ТРАНСМИССИЙ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Волгоградский государственный технический университет

shehovtsov@vstu.ru; ts@vstu.ru; tslmvsturu@mail.ru; paulflinx@gmail.com; asamat-iskaliev@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Виктор Викторович Шеховцов (shehovtsov@vstu.ru)

В статье прослежена эволюция технических решений упругих муфт для трансмиссий колесных и гусеничных машин. Проанализированы конструкции муфт с резиновыми, металлическими и комбинированными упругими элементами. Приведено также описание запатентованного авторами нового технического решения упругой муфты, позволяющего адаптивно в соответствии с диапазоном амплитуд и спектром частот действующих нагрузок изменять свои упругие и демпфирующие свойства.

Ключевые слова: упругая муфта, резиновый упругий элемент, металлический упругий элемент, упругие свойства, демпфирующие свойства.

V. V. Shekhovtsov, Sh. Ya. E. Enrikes, M. V. Ljashenko, P. V. Potapov, A. I. Iskaliev

TECHNICAL SOLUTIONS OF ELASTIC COUPLINGS FOR WHEELED AND TRACKED VEHICLES TRANSMISSIONS

Volgograd State Technical University

shehovtsov@vstu.ru; ts@vstu.ru; tslmvsturu@mail.ru; paulflinx@gmail.com; asamat-iskaliev@mail.ru

Corresponding author: Victor V. Shekhovtsov (shehovtsov@vstu.ru)

This article presents evolution of technical solutions of elastic couplings for wheeled and tracked vehicles transmissions. Analysis of couplings designs with rubber, metal and combine elastic elements is presented. Also, this paper describes the patented scheme of the elastic coupling providing adaptive changing its elastic and damping characteristics in accordance with an amplitudes range and a frequencies specter of acting loads.

Keywords: elastic coupling, rubber elastic element, metal elastic element, elastic characteristics, damping characteristics.

Введение

Детали трансмиссий тяговых и транспортных средств в эксплуатации подвержены нагрузкам динамического характера. Динамический характер нагрузок объясняется, с одной стороны, неравномерностью действия крутящего момента двигателя, обусловленной характером его рабочего процесса с периодическим чередованием тактов и импульсным воздействием при этом на шейку коленчатого вала, с другой стороны – целым комплексом переменных нагрузок со стороны ходовой системы, обусловленных изменениями тягового сопротивления, колебаниями остова на подвеске, для гусеничных машин также и перемоткой звенчатой гусеницы. К этому добавляются воздействия со стороны системы управления машиной во время изменений направления и скорости движения, разгонов и торможений. Вследствие этих воздействий в валопроводе трансмиссии формируется сложная картина крутильных колебаний и возникают дополнительные напряжения в деталях, что при длительности их действия часто приводит к отказам и поломкам [1–17].

Одним из самых распространенных способов снижения динамической нагруженности деталей силового валопровода является использование в его составе элементов с повышенной крутильной податливостью [18–23]. Самыми распространенными такими элементами являются упругие муфты. При их помощи смягчается также дополнительная нагруженность валопровода от технологических погрешностей изготовления и монтажа его деталей, а также от изменения их пространственного расположения во время эксплуатации при переменном действии нагрузок от изгибных и крутильных колебаний, то есть несовпадения осей вращения, перекосов и смещений.

Конструкции упругих муфт со временем существенно эволюционировали – от самых простых до современных, обеспечивающих более совершенную защиту деталей валопровода от динамического действия увеличивающегося количества переменных нагрузок в сложных и разветвленных силовых передачах современных машин.

Конструкции упругих муфт определяются в первую очередь тем, в какую силовую передачу какой машины предполагается их устанавливать и какую функцию они должны выполнять – например, защищать от ударных нагрузок, от пиковых динамических нагрузок

и перегрузок, предотвращать резонансные явления в трансмиссии либо в качестве компенсационных смягчать динамические нагрузки от перекосов и смещений деталей.

В настоящей статье рассматриваются отдельные технические решения упругих муфт, созданные на разных этапах их эволюции, а также предложенное авторами статьи новое техническое решение муфты для использования преимущественно в конструкции ведущего моста гусеничного трактора.

1. Технические решения муфт с резиновыми упругими элементами

Такой податливый материал, как резина, применялся в упругих муфтах с самого начала их производства. Вначале использовалась натуральная резина, потом синтетические резины и макромолекулярные материалы – эластомеры. Широкое использование резин в конструкциях упругих муфт обусловлено высокой эластичностью (способностью подвергаться обратимым деформациям до 1000 % и более), способностью поглощать энергию высокочастотных нагрузок; способностью к большим обратимым деформациям при статических и динамических нагружениях; стойкостью к действию агрессивных сред; малой водо- и газопроницаемостью; хорошими диэлектрическими свойствами [24].

Упругие муфты в начале процесса их эволюционирования отличались конструктивной простотой – между соединяемыми полумуфтами просто закреплялся одним из способов некоторый объем резины. Такое устройство можно рассмотреть на примере следующего технического решения [25] (рис. 1).

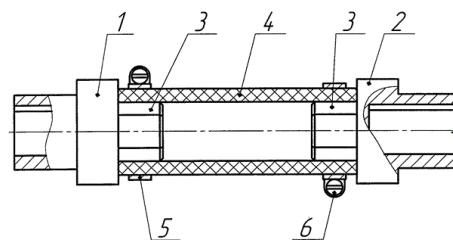


Рис. 1. Упругая муфта:

1, 2 – полумуфта; 3 – наконечник;
4 – упругий элемент; 5, 6 – хомут

В дальнейшем совершенствовалась конструкция и полумуфт, и упругого элемента. Например, в следующем техническом решении [26] (рис. 2) упругие элементы для увеличения эластичности выполнены в виде резиновых втулок с винтовыми канавками на наружной

поверхности. Имеется также большое количество технических решений втулочно-пальцевых муфт, в которых полумуфты соединяются жестко установленными в одной полумуфте пальцами, на части которых, входящих в отверстия второй полумуфты, закреплены упругие резиновые элементы, которые могут иметь разную, в том числе профилированную конфигурацию. Пример такой конструкции показан на рис. 3.

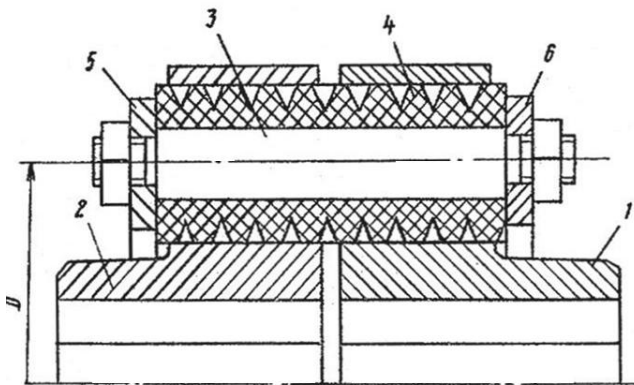


Рис. 2. Муфта с профилированным упругим элементом: 1, 2 – полумуфты; 3 – палец; 4 – резиновый элемент; 5, 6 – шайбы

В ряде технических решений упругий элемент из резины выполнен комбинированным, как, например, в представленном на рис. 4 техническом решении упругой муфты, в которой эластичный элемент представляет собой пакет из дисков, состоящих из чередующихся слоев резины и кордной ткани. Во множестве технических решений использован упругий элемент оболочечного типа [27] (рис. 5).

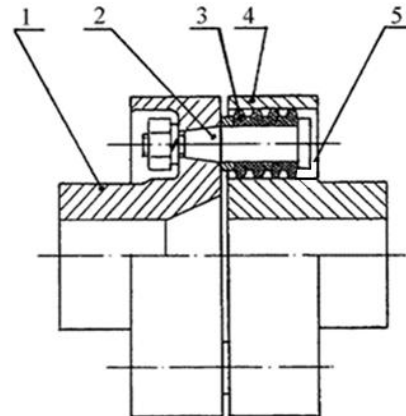


Рис. 3. Втулочно-пальцевая муфта: 1, 4 – полумуфты; 2 – палец; 3 – резиновый элемент; 5 – отверстия под пальцы

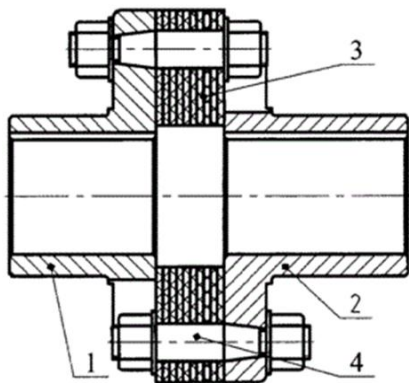


Рис. 4. Муфта с чередующимися слоями резины и кордной ткани: 1, 2 – полумуфты; 3 – упругий элемент; 4 – пальцы

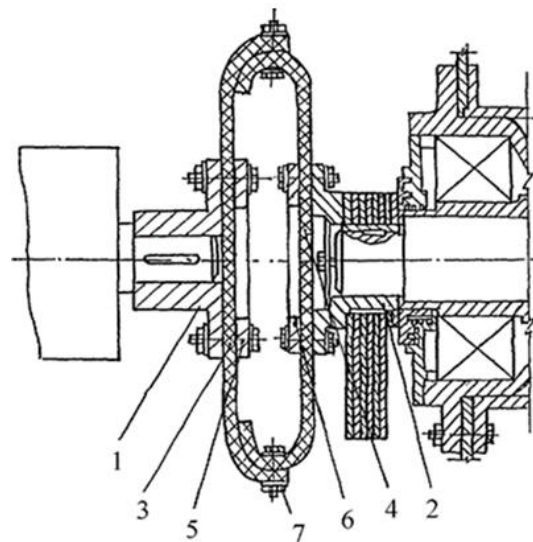


Рис. 5. Муфта с упругим элементом оболочечного типа: 1, 2 – полумуфты; 3, 4 – упругие резинокордные элементы; 5, 6 – нажимные кольца; 7 – болтовые соединения

В настоящее время создано множество технических решений сложных комбинированных муфт, таких, например, как упруго-пневматическая муфта [28] (рис. 6). В конструкциях этих муфт могут использоваться и резиновые, и металлические, и пневматические, и электромагнитные, и фрикционные элементы. Такие муфты

в силовой цепи могут играть роль и компенсационных, и упругих, и демпфирующих устройств.

2. Технические решения муфт с металлическими упругими элементами

В начале эволюции технических решений упругих муфт одним из вариантов их конструкций был вариант с металлическими упруги-

ми элементами – пружинами, упругими пластинами и стержнями, а также элементами из проволоочной сетки. В настоящее время конструктивно более сложные муфты с металлическими упругими элементами также широко

используются в разных силовых передачах.

Для примера рассмотрим техническое решение муфты (рис. 7), в которой эластичный элемент состоит из нескольких концентричных трубчатых сеток [29].

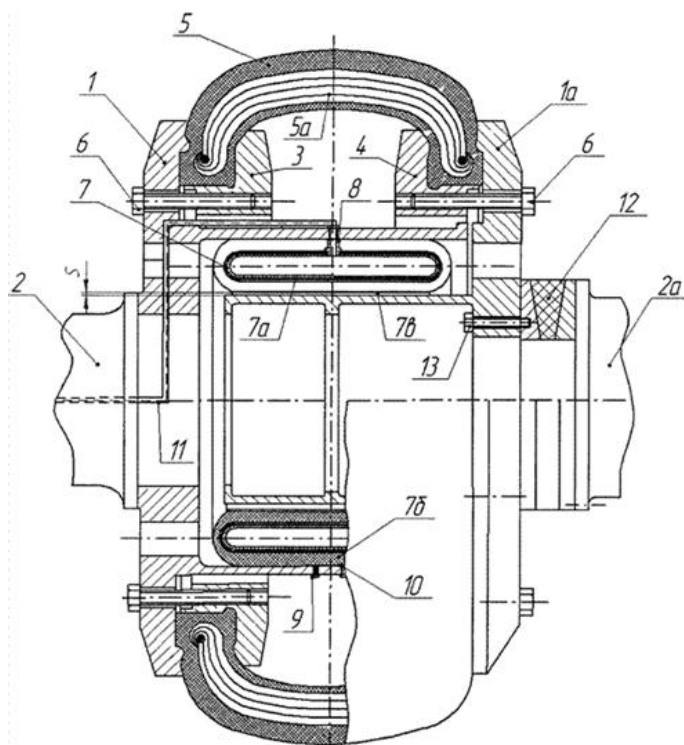


Рис. 6. Упруго-пневматическая муфта:

1, 1а – наружные фланцы; 2, 2а – ступицы; 3, 4 – прижимные кольца; 5а – резинокордная оболочка; 6 – болты; 7а, 7б, 7с – резинокордный шинно-пневматический баллон; 8 – ниппель; 9 – винт; 10 – планка; 11 – воздухопровод; 12 – резинометаллическое кольцо

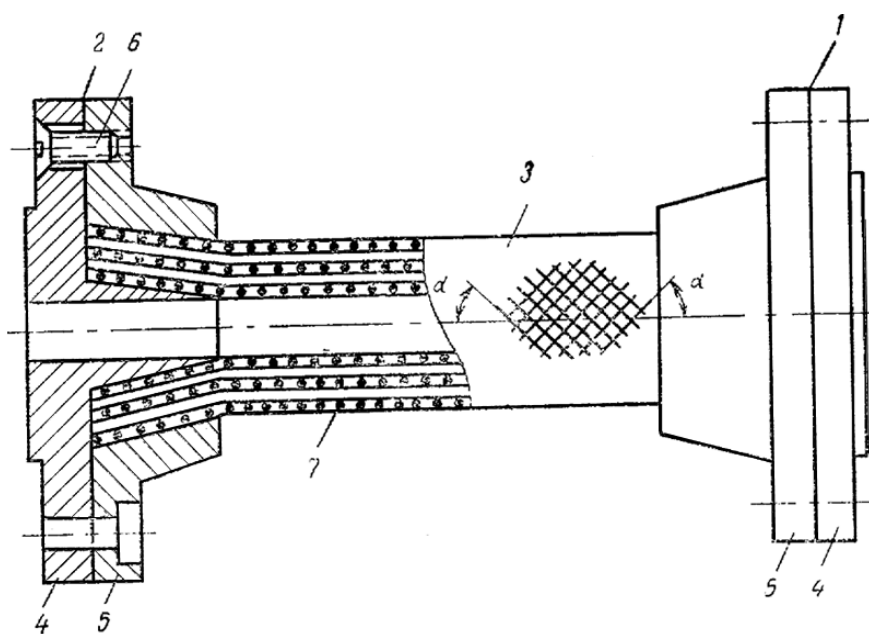


Рис. 7. Эластичная муфта с концентричными трубчатыми сетками

Муфта состоит из двух полумуфт 1 и 2 и эластичного элемента 3. Каждая полумуфта содержит две втулки 4 и 5. Между коническими поверхностями втулок, стягиваемых винтами 6, зажимается конец эластичного элемента 3.

Эластичный элемент состоит из одной или нескольких проволочных трубчатых сеток, между которыми расположены прочно скрепленные с сетками слои какого-либо эластичного материала.

Волокна сеток расположены к образующей под углом α , при котором их направление совпадает с направлением действия наибольших

напряжений при кручении, что повышает нагрузочную способность муфты.

В следующем техническом решении [30] упругие элементы выполнены из металлической проволоки (рис. 8).

Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, имеющих радиальные ребра 3 и 4, между которыми располагаются упругие элементы из объемно-плетеной и прессованной металлической проволочной сетки 5.

Они крепятся в полумуфте 1 с помощью втулки 6, имеющей осевые пазы для помещения ребер другой полумуфты.

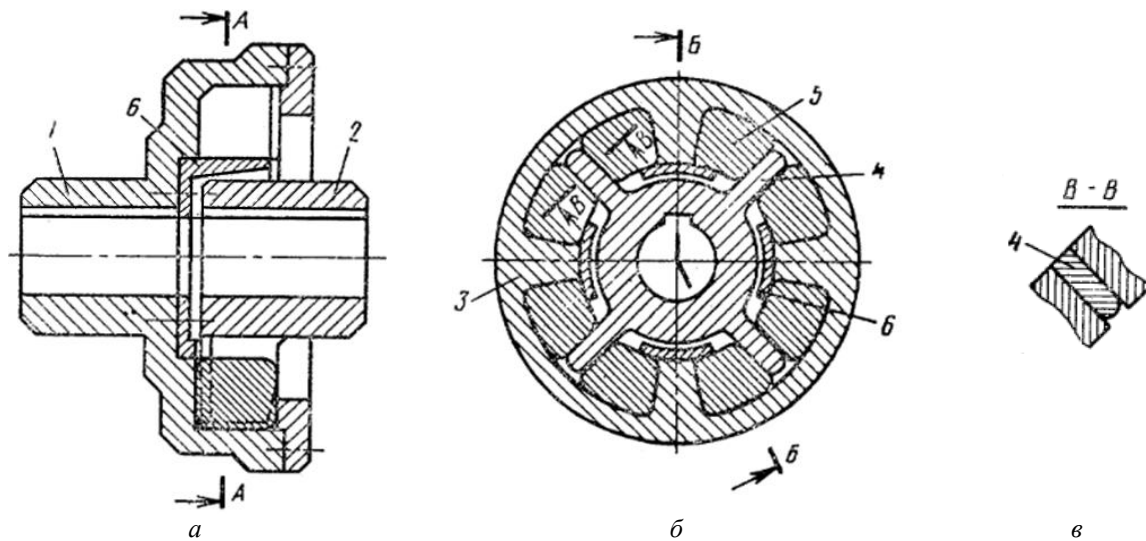


Рис. 8. Муфта с упругими элементами из объемно-плетеной прессованной металлической проволоки

При постоянных динамических, в том числе знакопеременных, нагрузках в трансмиссиях колесных и гусеничных машин муфты с проволочными упругими элементами не находят применения, так как в этих условиях эксплуатации их долговечность явно недостаточна, к

тому же и их упругие свойства изменяются в небольших пределах.

Известен также целый класс муфт с пластинчатыми упругими элементами. Примером может служить следующее техническое решение [31] (рис. 9).

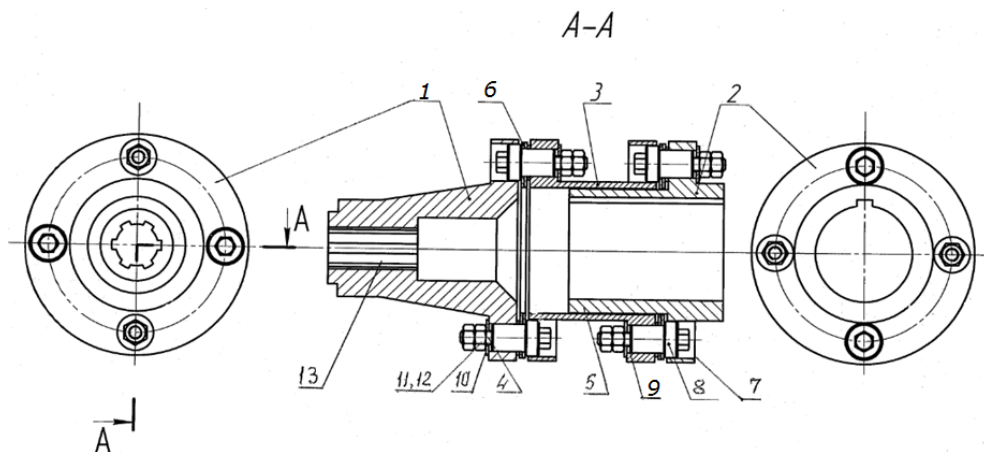


Рис. 9. Пластинчатая муфта с пакетом листовых прокладок

Муфта содержит полумуфты 1 и 2 и промежуточную втулку 3 между ними. Торцевые фланцы втулки 3 соединены крестообразно четырьмя болтами 4 с фланцами смежных полумуфт. Полумуфта 2 выполнена с хвостовиком 5, расположенным в полости втулки 3. Между смежными торцами фланцев втулки и полумуфт размещен пакет 6 круглых листовых прокладок из нержавеющей стали. На одной из диагоналей с двух сторон на всех фланцах выполнено отверстие 7, в котором установлены болты 4 с головками 8. Болты 4 пропущены резьбовой частью

через отверстие 9 смежного фланца и снабжены шайбами 10 и гайками 11, 12. На каждой полумуфте выполнены шлицы 13 для соединения с ведомым и ведущим валами.

Повышенной способностью компенсировать смещение соединяемых валов обладает следующая пластинчатая муфта [32] (рис. 10). Упругий элемент, соединяющий полумуфты, выполнен в виде пакета пластин, профилированных так, что концентрические гофры имеют различные в радиальном направлении высоту и шаг.

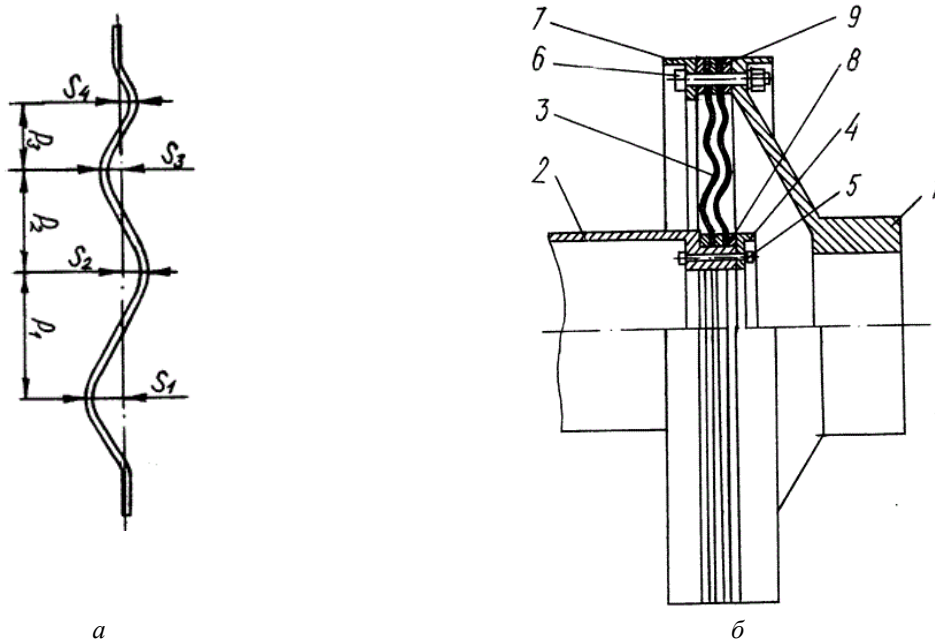


Рис. 10. Пластинчатая муфта с переменными высотой и шагом гофрировки пластин

На рис. 10, а показана образующая профиля упругой пластины, имеющая переменные высоты S_i и шаг P_i концентрических гофров; на рис. 10, б – общий вид муфты.

Она состоит из ведущей 1 и ведомой 2 полумуфт разного диаметра, соединенных между собой упругим элементом 3, который крепится к полумуфте малого диаметра с помощью шлицев, поджатых через кольцо 4 болтами 5, а к полумуфте большого диаметра – болтами 6 и кольцом 7. Для предотвращения фреттинг-коррозии профилированные пластины разделены кольцами 8, 9.

В случае несоосного расположения валов упругий элемент изгибается, компенсируя тем самым смещение осей соединяемых валов.

Так как высота и шаг гофров в радиальном направлении различны, то меняется и изгибная жесткость вдоль образующей упругого элемен-

та. Это обеспечивает более равномерное распределение напряжений вдоль профиля и, как следствие, позволяет увеличить значения допустимых смещений соединяемых валов.

В конструкциях упругих муфт широко используются разные пружины. Примером может служить техническое решение [33] упругой муфты (рис. 11), у которой полумуфты соединяются при помощи пружины с квадратным сечением витков. Муфта содержит две соосно расположенные полумуфты 1, смонтированные на концах валов 2, и соединяющую их цилиндрическую пружину 3, закрепленную на полумуфтах с помощью выступов 4 и болтов 5. Пружина 3 расположена в зазоре между концентрично расположенными внутренней 6 и наружной 7 втулками, закрепленными концами на полумуфтах 1 с помощью фиксирующих штифтов 8 и 9 и упругого кольца 10.

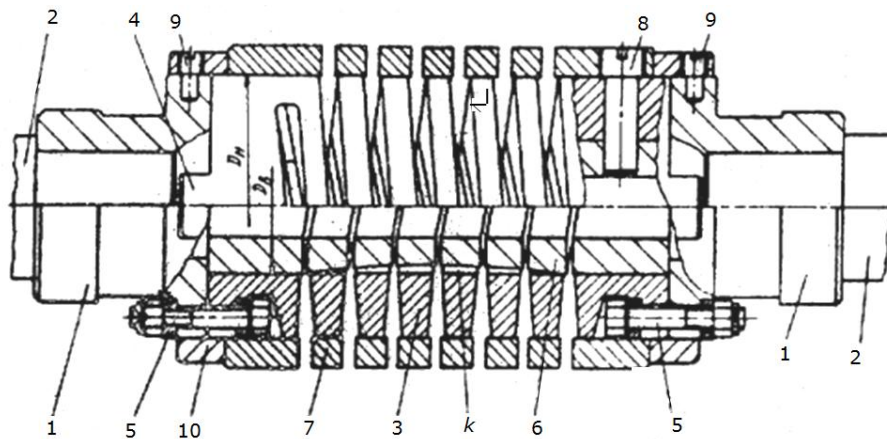


Рис. 11. Упругая муфта с пружиной с квадратным сечением витков

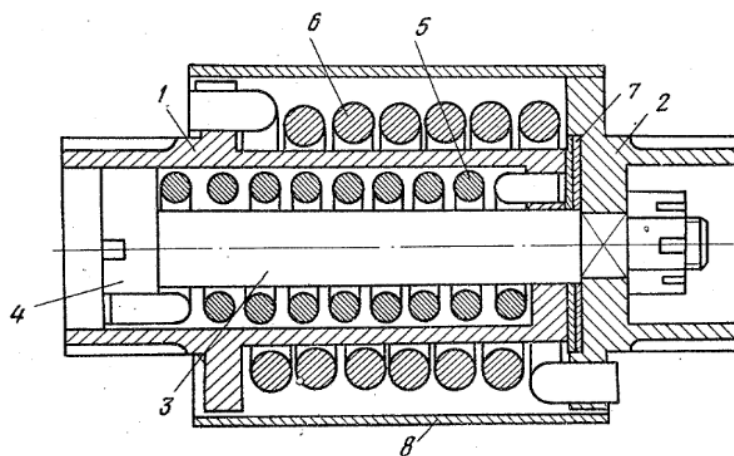


Рис. 12. Упругая муфта с двумя винтовыми пружинами

В конструкции упругой муфты [34], техническое решение которой представлено на рис. 12, использованы две винтовые пружины.

Муфта содержит две соосные фланцевые полумуфты 1 и 2, стержень 3 с головкой 4 и две концентрично расположенные цилиндрические пружины 5 и 6 кручения с разнонаправленной навивкой. Пружина 5 расположена на стержне 3 в сжатом состоянии и соединена одним концом с его головкой 4, а другим – с дном стакана 1. Пружина 6 установлена на наружной поверхности стакана 1 и соединена одним концом с его фланцем, а другим – с фланцем полумуфты 2. Между донной частью стакана 1 и фланцем полумуфты 2 установлены фрикционные элементы 7, которые воспринимают осевые усилия и являются демпфером сухого трения. Муфта снабжена кожухом 8 цилиндрической формы, закрепленным на фланце полумуфты 2.

Одной из сложных и современных представляется упругая муфта [35], техническое решение которой представлено на рис. 13. Она

обладает нелинейной упругой характеристикой; в ее конструкции использованы пакеты пластинчатых пружин и винтовые цилиндрические пружины.

Муфта содержит ведущую 1 и ведомую 2 полумуфты. В пазах последней закреплены пакеты 3 пластинчатых пружин при помощи колодок 4 и болтов 5. На полумуфте 1 смонтированы пальцы 6, на которых подвижно закреплены двуплечие рычаги 7 посредством кольца 8, шайбы 9 и гайки 10. Направление перемещения рычагов 7 показано стрелкой *k*. Одни концы рычагов 7 снабжены упорами 11, которые взаимодействуют с пакетами пластинчатых пружин 3, а другие концы выполнены в виде вилок 12, на которых шарнирно закреплены верхние опоры 13 винтовых пружин 15 при помощи осей 14. На опорах 13 размещены одними концами упругие элементы 15, опирающиеся другими концами на нижние опоры 16, шарнирно закрепленные на полумуфте 1 при помощи пальцев 17. Опоры 13 и 16 выполнены заодно с ограничителями 18 сжатия пружин 15,

которые одновременно являются и направляющими. Фиксация рабочего положения двупле-

чих рычагов 7 осуществляется при помощи упоров 19, закрепленных на полумуфте 1.

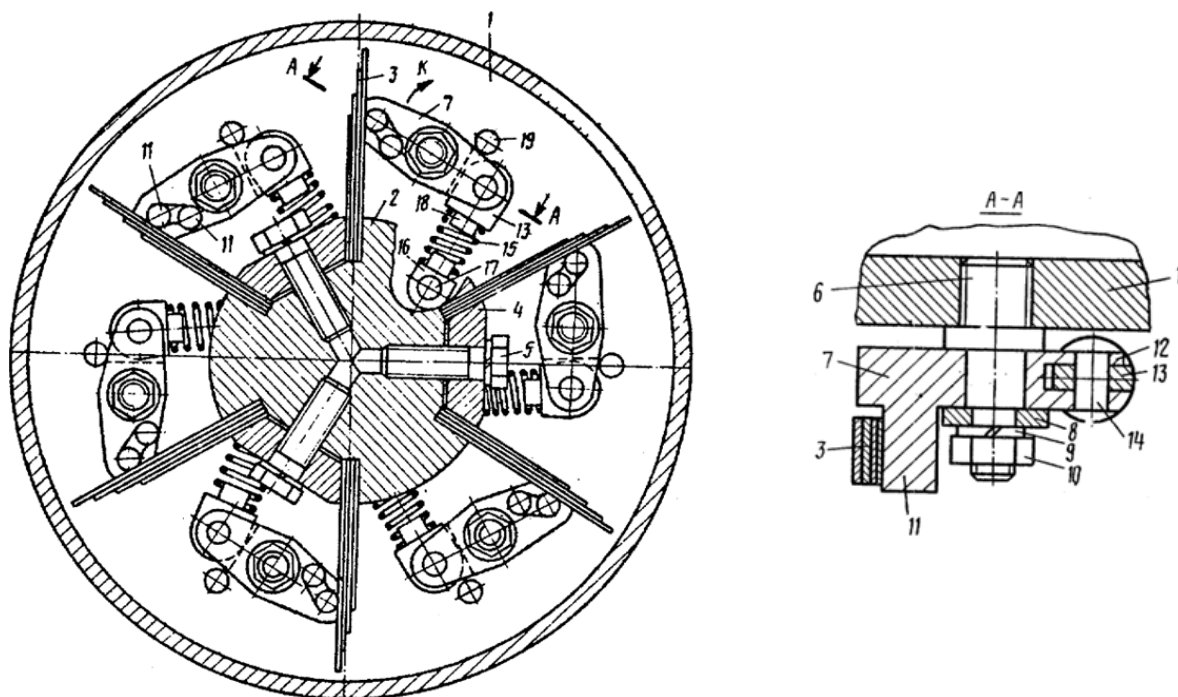


Рис. 13. Упругая муфта с пластинчатыми и винтовыми пружинами

При вращении полумуфты 1 крутящий момент M передается через пальцы 6, двуплечие рычаги 7, кулачки 11 и пакеты 3 пластинчатых пружин на ведомую полумуфту 2, нагружая при этом реактивным моментом в направлении стрелки k двуплечие рычаги 7. На первом этапе работы муфты момент упругих сил, созданный за счет предварительного поджатия пружин 15, уравнивает действующий реактивный момент, поэтому жесткость муфты будет постоянной.

При увеличении передаваемого момента увеличивается и реактивный момент на рычагах 7 и превышает момент от сил предварительного сжатия пружин 15. В результате этого рычаг 7 поворачивается в направлении стрелки k до тех пор, пока усилие сжатой пружины 15 на изменяющемся плече не уравнивает реактивный момент. Поворот рычага 7 вокруг оси вызывает смещение точки приложения окружного усилия на пакеты 3 плоских пружин от оси муфты. Следовательно, плечо приложения окружного усилия увеличивается, что приводит к снижению жесткости муфты, которая обратно пропорциональна плечу (гиперболическая зависимость), то есть линейное изменение (увеличение) плеча приложения окружного усилия влечет за собой нелинейное изменение (умень-

шение) жесткости муфты. Таким образом, конструкция муфты позволяет осуществлять саморегулировку ее жесткости в зависимости от передаваемого крутящего момента.

3. Техническое решение предложенной авторами муфты

Пиковую динамическую нагруженность деталей силовой передачи возможно уменьшать за счет установки в нее элементов с высокой крутильной податливостью, а также за счет демпфирующих элементов. В предложенном авторами техническом решении упругой муфты [36] для установки в трансмиссию решаются обе эти задачи. За счет выбора правильного места установки муфты в силовую цепь и подбора ее упругодиссипативных параметров возможно существенно снизить нагруженность участков передачи на пиковых нагрузочных режимах и от постоянного воздействия крутильных колебаний.

Муфта содержит полумуфты 1 и 2 (рис. 14 и 15), пальцы 3, жестко закрепленные на полумуфте 1, пальцы 4 полумуфты 2, змеевидную пружину 5, корпус 6, кожух 7. Пружина 5 связывает полумуфты 1 и 2 при помощи пальцев 3 и 4. Она расположена в плоскости, перпендикулярной оси муфты по окружности в один или не-

сколько рядов, и охватывает внутренней стороной витков пальцы 4, а наружной стороной витков – пальцы 3. Внутренний профиль 8 корпуса 6, к которому прилегает наружной стороной вит-

ков змеевидная пружина, выполнен криволинейным. Пальцы 4 закреплены с возможностью поворота относительно своей оси с помощью установленных в их пазах 9 шпонок 10.

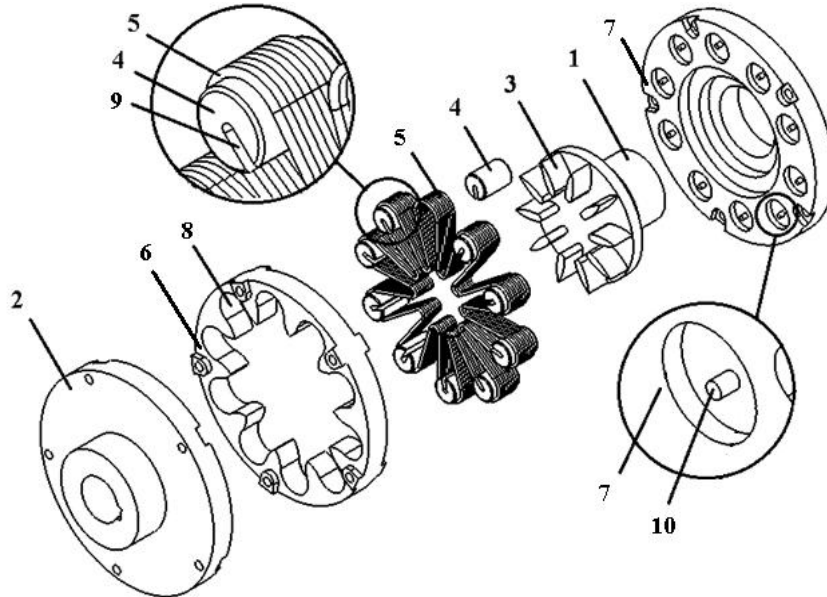


Рис. 14. Устройство упругой муфты

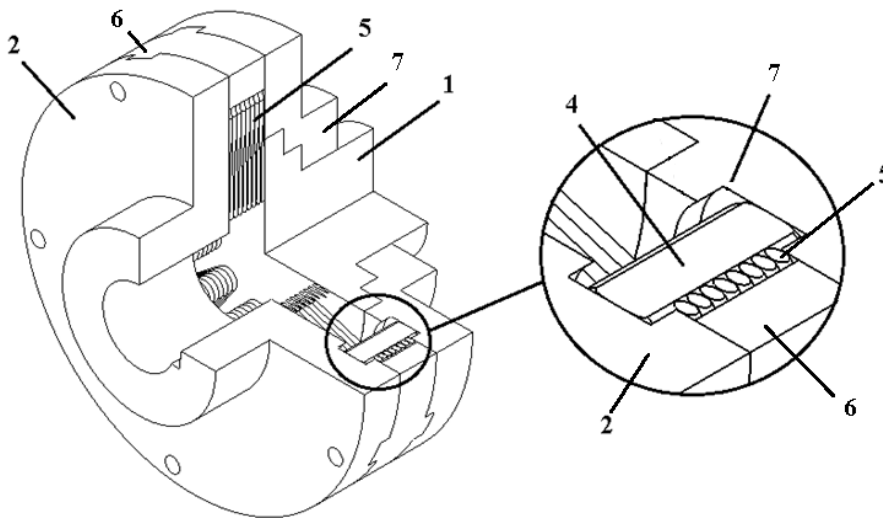


Рис. 15. Упругая муфта в разрезе

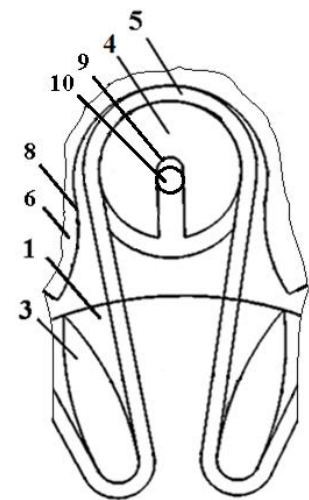


Рис. 16. Вид витка змеевидной пружины

Муфта работает следующим образом. Крутящий момент передается с полумуфты 1 через пальцы 3 на змеевидную пружину 5, далее контактно передается с внешней поверхности наружных витков этой пружины на внутренний профиль 8 корпуса 6. Змеевидная пружина 5 перемещает пальцы 4 (рис. 16), которые вследствие трения своих выступающих из ряда этой пружины частей о внутренние поверхности полумуфты 2 и кожуха 7, передают момент на по-

лумуфту 2. В этом случае полумуфта 1 является ведущей.

Полумуфты 1 и 2 по направлению передачи крутящего момента взаимозаменяемы. Когда в качестве ведущей выступает полумуфта 2, момент контактно передается с внутреннего криволинейного профиля 8 корпуса 6 на внешнюю поверхность наружных витков пружины 5, далее с ее внутренних витков через пальцы 3 на полумуфту 1. Полумуфта 2 и кожух 7 переме-

щают пальцы 4 вследствие трения своих внутренних поверхностей о выступающие из ряда змеевидной пружины части пальцев 4, которые в свою очередь передают крутящий момент на змеевидную пружину, в витках которой они расположены.

Крутильная податливость муфты определяется упругими свойствами змеевидной пружины, ее размерами и материалом. Эта податливость определяет способность муфты снижать нагруженность силовой передачи при действиях пиковых перегрузок.

Демпфирующие свойства муфты определяются конструкцией. Закрепление на второй полумуфте пальцев с возможностью поворота относительно своей оси с помощью установленных в их пазах шпонок позволяет увеличить демпфирующие свойства муфты, что повышает эффективность защиты силовой передачи от крутильных колебаний. Демпфирующие свойства повышаются из-за того, что во время работы увеличивается количество задействованных элементов трения и общая поверхность трения. Поворот пальцев относительно своей оси, увеличивающий трение, обеспечивается контактным взаимодействием между шпонками и направляющими пазами. При повороте витка пружины на некоторый угол палец из-за встречного воздействия шпонки на паз проворачивается по направлению угла поворота полумуфты. Общая поверхность трения увеличивается также за счет контактного взаимодействия змеевидной пружины с внутренним профилем полумуфты.

Выполнение криволинейным внутреннего профиля второй полумуфты, контактно взаимодействующего с наружной стороной витков змеевидной пружины, повышает нелинейность упругой характеристики муфты, что позволяет обеспечить более эффективную защиту силовой передачи от динамических нагрузок, увеличивая срок ее службы.

Конструкция упругой муфты обеспечивает защиту силовой передачи как от высокочастотных, так и от низкочастотных нагрузок. Для защиты от гармонических составляющих крутящего момента двигателя муфта должна размещаться в силовой передаче как можно ближе к источнику генерации возмущений, то есть устанавливаться за муфтой сцепления перед коробкой передач. Низкочастотные колебания с высокой амплитудой генерируются ходовой системой и подвеской. Для снижения нагружен-

ности от этих нагрузок муфта должна устанавливаться в ведущем мосту и иметь соответствующие упругие и прочностные параметры элементов для восприятия действующих нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование динамической нагруженности участков силовой передачи трактора Четра 6С-315 / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, И. А. Иванов, А. В. Калмыков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Наземные транспортные системы»; Вып. 5). – С. 47–50.
2. Research of dynamic characteristics of Chetra-6C315 tractor's power transmission / А. В. Калмыков, П. В. Потапов, В. В. Шеховцов, Е. В. Клементьев, Н. С. Соколов-Добрев // 31st Seminar of the Students' Association for Mechanical Engineering, Warsaw, Poland, May 22nd – 25th, 2012: book of Abstracts / Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering. – Warsaw, 2012. – P. 21–22.
3. Снижение динамической нагруженности трансмиссии трактора за счет ввода упругого реактивного звена / А. В. Калмыков, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, М. В. Ляшенко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 21 (124) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Наземные транспортные системы»; вып. 7). – С. 24–28.
4. Крутильные колебания от основных эксплуатационных нагрузок в валопроводе силовой передачи трактора ВТ-100 / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Вл. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, К. В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7 (ч. 2). – С. 125–128.
5. Исследование динамических характеристик трансмиссии сельскохозяйственного трактора 6-ого тягового класса / Вл. П. Шевчук, В. В. Шеховцов, Е. В. Клементьев, Н. С. Соколов-Добрев, А. В. Калмыков // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 2. – С. 44–49.
6. Исследование динамических процессов в силовой передаче гусеничного трактора тягового класса 6 при повороте / А. В. Калмыков, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, К. О. Долгов // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24–26 сент. 2013 г. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2013. – С. 161–162.
7. Динамическая нагруженность силовых элементов трансмиссии гусеничного трактора при эксплуатации в режиме «разгон – остановка» / Е. И. Тескер, В. В. Шеховцов, В. Ю. Тараненко, К. П. Подшивалин // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 8. – С. 21–23.
8. Влияние динамической связанности звеньев силовой цепи на характер распространения крутильных колебаний в валопроводе / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Вл. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, К. В. Шеховцов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 7 (ч. 2). – С. 128–131.
9. The Computational Research of the Dynamic Load of the Power Train Sites of the Caterpillar Tractor = Расчетные исследования динамической нагруженности участков силовой передачи гусеничного трактора / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, Вл. П. Шевчук, М. В. Ляшенко, А. В. Калмыков // The Archives of Automotive Engineering / Archiwum Motoryzacji. – 2013. – Vol. 60, No. 2. – С. парал.: 79–91 (англ.); 195–208 (рус.).
10. Строкатов, М. А. Экспериментальное исследование нагруженности трансмиссии гусеничного трактора

при синфазной и несинфазной установке ведущих колес / М. А. Строкатов, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев // Молодой ученый. – 2014. – № 8 (67, июнь-1), часть 3. – С. 262–267.

11. *Строкатов, М. А.* Экспериментальное исследование крутящего момента трактора ДТ-120 при трогании / М. А. Строкатов, В. В. Шеховцов // Тезисы докладов смотр-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, май 2014 г. / редкол.: А. В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, СНТО. – Волгоград, 2014. – С. 110.

12. Перспективы использования упругого реактивного звена в силовой передаче трактора / А. В. Калмыков, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Н. С. Соколов-Добрев, З. А. Годжаев // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 12. – С. 20–24.

13. Динамическая нагруженность силовой передачи трактора при изменении крутильной жесткости реактивного звена / А. В. Калмыков, Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко // Технология колесных и гусеничных машин. – 2014. – № 5. – С. 17–23.

14. Метод снижения динамической нагруженности силовой передачи гусеничного трактора / Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, А. В. Калмыков // Вестник машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 6–10.

15. Использование в трансмиссии трактора реактивного звена с переменной податливостью / А. В. Калмыков, М. В. Ляшенко, Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (166) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Наземные транспортные системы»; вып. 12). – С. 24–32.

16. *Шеховцов, В. В.* Анализ и синтез динамических параметров элементов силовых передач тягово-транспортных средств: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, М. В. Ляшенко; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 140 с.

17. *Шеховцов, В. В.* Decreasing of the Dynamic Loading of Tractor Transmission by Means of Change of the Reactive Element Torsional Stiffness / В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, П. В. Потапов // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1239–1244.

18. Снижение динамической нагруженности трансмиссии тягово-транспортного средства за счет элемента с управляемыми упруго-диссипативными свойствами / З. А. Годжаев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, А. И. Искалиев, Шиян Я. Э. Энрикес // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 5 (349). – С. 157–164. – DOI: 10.33979/2073-7408-2021-349-5-157-164.

19. *Могилевская, Е. А.* Установка упругой муфты в трансмиссию сельскохозяйственного трактора класса 6 / Е. А. Могилевская, В. В. Шеховцов // Проектирование колесных машин: матер. всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию начала подгот. инж. по автомобильной специ-

альности в МГТУ им. Н. Э. Баумана (25–26 дек. 2009 г.) / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2010. – С. 167.

20. *Могилевская, Е. А.* Установка упругой муфты в трансмиссию гусеничного трактора класса 6 / Е. А. Могилевская, Н. С. Соколов-Добрев, В. В. Шеховцов // Инновационные технологии в обучении и производстве : матер. VI всерос. науч.-практ. конф., г. Камышин, 15–16 дек. 2009 г. В 6 т. Т. 3 / ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 68–69.

21. П. м. 116411 РФ, МПК В 60 К 17/02. Устройство для управления жесткостью трансмиссии транспортного средства / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, Вл. П. Шевчук, Н. С. Соколов-Добрев, А. В. Калмыков, А. О. Пивоваров; ВолгГТУ. – 2012.

22. *Пушкарёв, А. А.* Муфта с упругой нелинейной характеристикой / А. А. Пушкарёв // XXII Региональная конференция молодых ученых Волгоградской области (г. Волгоград, 21–24 ноября 2017 г.): тез. докл. / редкол.: А. В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]; Комитет молодежной политики Волгоградской обл., Совет ректоров вузов Волгоградской обл., ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 81–83.

23. Упругая муфта для силовой передачи тягово-транспортного средства / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, А. А. Долотов, А. И. Искалиев, А. А. Пушкарёв // Прогресс транспортных средств и систем – 2018: мат. междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9–11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан-Баррикады». – Волгоград, 2018. – С. 67–68.

24. *Шеховцов, В. В.* Поддрессирование кабин колесных и гусеничных машин: учеб. пособие / В. В. Шеховцов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 276 с.

25. П. м. 148347 РФ, МПК F16D 3/56, F16D 3/58. Муфта / Л. П. Гаранин, А. В. Теплыгин, В. Е. Ковтун, Р. В. Ханжин; АО «НИИ полимерных материалов». – 2014.

26. А. с. 681260 СССР, МПИ F16H 3/70, F16H 3/64. Упругая муфта / М. С. Тривайло. – 1979.

27. П.м. 99837 РФ, МПК F16D 3/70. Муфта / Д. В. Гроховский. – 2010.

28. П. м. 140950 РФ, МПК F16D 25/00. Упруго-пневматическая муфта / Б. Д. Кукаленко, С. Г. Чулкин. – 2014.

29. А. с. 213480 СССР, МПИ F16H 3/66. Эластичная муфта / Д. А. Ныс, Л. М. Кордыш. – 1968.

30. А. с. 327337 СССР, МПИ F16H 3/66. Упругая муфта / О. А. Ховский, Д. Н. Решетов. – 1972.

31. П. м. 105383 РФ, МПК F16D 1/00. Пластинчатая муфта / В. Д. Анохин, С. В. Яблочко. – 2011.

32. Пат. 2115041 РФ, МПК F16D 1/00. Пластинчатая муфта / М. С. Сорочкин, А. М. Попов. – 1998.

33. А. с. 1048192 СССР, МПИ F16H 3/66. Упругая муфта / Д. И. Жарницкий, С. Н. Колчицкий, В. А. Попов, В. П. Анисифоров и др. – 1983.

34. А. с. 1392044 СССР, МПИ F16H 3/72. Упругая муфта / А. И. Кузьменко. – 1987.

35. А. с. 1186856 СССР, МПИ F16H 3/56. Упругая муфта / А. М. Лавренко, Д. С. Гапонов, Н. Ф. Киркач. – 1975.

36. П. м. 201977 РФ, МПК F16D 3/52, F16D 3/20, F16D 3/221, F16D 3/27. Упругая муфта / Ш. Я. Э Энрикес, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, А. И. Искалиев. – 2021.

Ответственный за выпуск редактор РИО
А. Н. Сергеева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 24-80-03
E-mail: lysak2@vstu.ru

Темплан 2024 г. (научные издания). Поз. № 17ж. Дата выхода в свет 27.03.2024 г.
Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 6,17.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 208.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.