

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В Е С Т Н И К

**ЛУГАНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**№ 1 (1)
2024**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Издательство ЛГУ им. В. Даля
Луганск
2024**

ВЕСТНИК

ЛУГАНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ

№1 (1) 2024

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ОСНОВАН В 2015 ГОДУ
ВХОДИТ В БАЗУ РИНЦ

Учредитель

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет
имени Владимира Даля»

VESTNIK

LUGANSK
VLADIMIR DAHL
STATE UNIVERSITY

№ 1 (1) 2024

THE SCIENTIFIC JOURNAL
WAS FOUNDED IN 2015
INCLUDED INTO THE BASE OF RISC

Founder

LSU NAMED AFTER V. DAHL

Входит в базу данных Российского индекса научного цитирования
(Лицензионный договор № 77-04/2025)

Главный редактор

Витренко Владимир Алексеевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Заместитель главного редактора

Дейнека Иннеса Григорьевна, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Замота Тарас Николаевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Киреев Андрей Николаевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Корсунов Константин Анатольевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Тарарычкин Игорь Александрович, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Ответственный секретарь

Чижевская Дарья Юрьевна, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Редакционная коллегия серии:

Антощенко Николай Иванович, д-р.техн.наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Батышев Константин Александрович, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

Беляев Сергей Владимирович, д-р техн. наук (СФУ, Красноярск)

Брешев Владимир Евгениевич, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Брюховецкий Андрей Николаевич, д-р техн. наук (ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, Луганск)

Волков Игорь Владимирович, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Зубков Виктор Егорович, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Капустин Денис Алексеевич, д-р техн. наук (ЛГПУ, Луганск)

Ленич Сергей Васильевич, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Семенов Константин Геннадьевич, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

Сёмин Дмитрий Александрович, д-р.техн.наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Сидоров Владимир Анатольевич, д-р техн. наук (ДНТУ, Донецк, ДНР)

Турушина Наталья Владимировна, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Филатьев Михаил Владимирович, д-р техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Чижевская Дарья Юрьевна, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Шаповалов Виктор Иванович, д-р.техн.наук (ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова, Луганск)

Энглези Ирина Павловна, д-р техн. наук (ДАТ, Донецк, ДНР)

Ясуник Светлана Николаевна, к-т техн. наук (ЛГУ им. В. Даля, Луганск)

Рекомендовано в печать Ученым советом

Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

(Протокол № 3 от 09.10.2024 г.)

© Авторы, 2024

© ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», 2024

СОДЕРЖАНИЕ**МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ С КАСКАДНЫМ СЖАТИЕМ Брянцев М. А., Данилейченко А. А., Ковтун А. С., Доценко Д. М. -----	7
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИОДИЗЕЛЬНОГО И ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ДВС Васильев И. П., Смелов С. В. -----	16
ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРАКТИКЕ РЕМОНТНЫХ СЛУЖБ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ Деркачёв С. В., Сидоров В. А., Ошовская Е. В. -----	21
РАСЧЕТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЫСТРОТЫ ИСЧЕРПАНИЯ РЕСУРСОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОСТАТКУ МЕЖРЕМОНТНЫХ И НАЗНАЧЕННЫХ РЕСУРСОВ ОБЪЕКТОВ ИХ ПОСТАНОВКИ Любченко Д. И., Чеботарев Д. Г., Зиньковский Д. В. -----	32

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

СИНТЕЗ ШПИНДЕЛЯ НА РЕГУЛИРУЕМОЙ КОНИЧЕСКОЙ ГАЗОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЕ ДЛЯ СТАНКА РЕЗКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ Брешев В. Е., Рябичев В. Д. -----	41
ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н. -----	52

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

СМЕСИ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛКИХ И СРЕДНИХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК Свиногоев Ю. А. -----	56
--	----

**ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ,
ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЕЛЛЕТНОГО ТОПЛИВА ИЗ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ И ПОЛИЭТИЛЕНА Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю., Никитин Ю. Н., Корженевская М. В. -----	67
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ УГЛЯ В КОЛЕНАХ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК Ленич С. В., Прилуцкий И. С. -----	78
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕНТРОВ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В УЛИЧНО-ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ Чижевская Д. Ю., Ветерцовский В. Н., Синчишен А. А. -----	88

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

**ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТРАБОТКИ ШАХТОПЛАСТОВ И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ
ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ УГЛЕНОСНОЙ ТОЛЩИ**

Павленко А. Т., Красногрудов А. В., Малкин В. Ю. ----- 94

**О СВЯЗИ ОБЩЕЙ ПОРИСТОСТИ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ С
МЕТАМОРФИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ ШАХТОПЛАСТОВ**

Филатьев М. В., Филатьева Е. Н., Голдованский А. В. ----- 104

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ
ПРИРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Замота Т. Н., Бондарец О. А.----- 110

CONTENTS

MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS ON PERFORMANCE INDICATORS CASCADE COMPRESSION MOTOR Bryantsev M. A., Danileychenko A. A., Kovtun A. S., Dotsenko D. M. -----	7
THE COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF BIODIESEL AND DIESEL FUELS FOR USE IN DVS Vasilyev I. P., Smelov S. V. -----	16
THE POSSIBILITIES AND PROBLEMS OF USING DIGITAL TWINS IN THE PRACTICE OF INDUSTRIAL REPAIR SERVICES Derkachev S. V., Sidorov V. A., Oshovskaya E. V. -----	21
CALCULATION OF FORECASTING THE RAPIDITY OF EXHAUSTING THE RESOURCES OF PRODUCT PARTS APPLIED TO THE REMAINING OF INTERREPAIR AND ASSIGNED RESOURCES OF THEIR SETTING OBJECTS Lyubchenko D. I., Chebotarev D. G., Zinkovskiy D. V. -----	32

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

SYNTHESIS OF A SPINDLE WITH AN ADJUSTABLE CONICAL AEROSTATIC BEARING FOR MONOCRYSTAL CUTTING MACHINES Breshev V.E., Ryabichev V.D. -----	41
VIBRATION RESISTANCE OF THE PIPELINE AT TRANSPORTATION OF CONTINUOUS MEDIA Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N. -----	52

FOUNDRY

COLD-CURED MIXTURES BASED ON TECHNICAL LIGNOSULFONATES FOR THE PRODUCTION OF SMALL AND MEDIUM-SIZED CAST IRON CASTINGS Svinoroev Yu. A. -----	56
--	----

TRANSPORT AND TRANSPORTATION TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF THE COUNTRY, ITS REGIONS AND CITIES, ORGANIZATION OF PRODUCTION IN TRANSPORT

IMPROVING THE METHOD OF GRANULATING PELLET FUEL FROM WOOD AND POLYETHYLENE WASTE Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu., Nikitin Yu. N., Korzhenevskaya M. V. -----	67
MODELING THE MOTION OF COAL PARTICLES IN THE ANGEL PIPES OF THE PNEUMATIC TRANSPORT MILLS Lenich S. V., Priluckiy I. S. -----	78
INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING TRAFFIC MANAGEMENT CENTERS IN URBAN STREET CONDITIONS Chizhevskaya D. Y., Vettsovsky V. N., Sinchishen A. A. -----	88

LABOR SAFETY

INTENSITY OF MINE FORMATION DEVELOPMENT AND GAS EMISSION
FROM THE MINED COAL BEARING STRATA

Pavlenko A. T., Krasnogradov A. V., Malkin V. Y. ----- 94

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE TOTAL POROSITY OF FOSSIL COALS
AND THE METAMORPHIC TRANSFORMATIONS OF MINE SEAMS

Filatiev M. V., Filatieva E. N., Goldovanskiy A. V. ----- 104

**TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR THE
AGRICULTURAL INDUSTRIAL COMPLEX**

MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL AND MECHANICAL
RUNNING-IN OF GEAR GEARS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Zamota T.N., Bondarets O.A. ----- 110

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 621.437

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ С КАСКАДНЫМ СЖАТИЕМ

Брянцев М. А., Данилейченко А. А., Ковтун А. С., Доценко Д. М.

INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS ON PERFORMANCE INDICATORS CASCADE COMPRESSION MOTOR

Bryantsev M. A., Danileychenko A. A., Kovtun A. S., Dotsenko D. M.

Аннотация. Оценено влияние давления продувки на различных скоростных режимах на коэффициент продувки ячеек ротора, температуру остаточных газов, а также максимальные давление и температуру цикла двигателя. Подтверждено закономерное возрастание индикаторной мощности двигателя по мере повышения давления продувки, что объясняется увеличением плотности, а, следовательно, количества свежего заряда, подаваемого в ячейки ротора. По результатам численного моделирования установлены основные зависимости термодинамических параметров рабочего тела в реперных точках индикаторной диаграммы двигателя, в частности, влияние коэффициента продувки, рациональные значения которого лежат в диапазоне 0,95-1,05, на давление и температуру остаточных газов. По данным расчётных исследований выявлено, что максимальное давление цикла двигателя не превышает 3...3,5 МПа, что предопределяет меньшие по сравнению с другими типами тепловых двигателей механические нагрузки, действующие на детали двигателя с каскадным сжатием, и, соответственно, позволяет уменьшить массогабаритные параметры конструкции двигателя в целом.

Ключевые слова: двигатель, каскадное сжатие, массообменные каналы, коэффициент продувки.

Abstract. The influence of the purge pressure at different speed modes on the rotor cell purge coefficient, residual gas temperature, and maximum pressure and temperature of the engine cycle is estimated. A regular increase in the engine indicator power with increasing purge pressure is confirmed, which is explained by an increase in density, and, consequently, the amount of fresh charge supplied to the rotor cells. Based on the results of numerical modeling, the main dependencies of the thermodynamic parameters of the working fluid at the reference points of the engine indicator diagram are established, in particular, the influence of the purge coefficient, the rational values of which lie in the range of 0.95-1.05, on the pressure and temperature of residual gases. According to the calculation studies, it was found that the maximum pressure of the engine cycle does not exceed 3...3.5 MPa, which predetermines lower mechanical loads acting on the parts of the engine with cascade compression compared to other types of thermal engines, and, accordingly, allows for a reduction in the mass and size parameters of the engine design as a whole.

Keywords: engine, cascade compression, mass transfer channels, purge ratio.

Введение. В теплоэнергетических машинах, преобразующих теплоту в механическую работу, основную часть внутренней работы составляет сжатие газообразного тела в цикле установки. Сжатие заряда посредством механического вытеснителя (поршня или лопаток рабочего колеса) термодинамически не рационально и сопряжено с усложнением конструкции двигателя. Новым направлением развития тепловых машин широкого назначения является использование волновых или каскадных обменников давления в качестве основного или дополнительного агрегата сжатия воздушного заряда. В обменниках давления осуществляется прямое преобразование энергии расширяющихся газов в располагаемую энергию сжатого воздуха в процессе непосредственного контакта между сжимающей и сжимаемой средами [1]. Использование каскадных обменников давления раскрывает перспективу создания двигателя с каскадным сжатием рабочей среды [2, 3, 4].

Целью статьи является изучение влияния режимных параметров на показатели работы двигателя с каскадным сжатием.

Материалы исследования. На эффективность работы дискового двигателя реактивного вращения КОД большое влияние оказывает давление продувки и число

массообменных каналов. Количественные характеристики анализируемых зависимостей показаны для базовой конструкции двигателя с исходными конструктивными параметрами, приведенными в табл. 1.

На рис. 1 представлены полученные по результатам численного моделирования рабочего цикла двигателя зависимости, подтверждающие увеличение коэффициента продувки ячеек ротора при повышении давления продувки во всем диапазоне скоростных режимов n_R работы двигателя. При этом наиболее интенсивный рост $\psi_{пр}$ наблюдается в области низких n_R (до 15000 мин⁻¹). Последнее объясняется двумя факторами: большей длительностью сообщения ячеек с продувочными окнами, а также явно недостаточной центробежной составляющей, что на данных скоростных режимах существенно улучшает качество очистки ячеек ротора от отработавших газов с интенсификацией работы продувочного вентилятора.

На режимах высоких частот вращения ротора незначительное время сообщения ячейки с продувочными окнами не позволяет заметно улучшить качество очистки ячеек даже при значительном давлении продувки. Так, на режиме $n_R = 20000$ мин⁻¹ увеличением $P_{пр}$ со 105 до 120 кПа сопровождается ростом $\psi_{пр}$ только на 9% (с 0,72 до 0,79).

Таблица 1

Параметры двигателя с каскадным сжатием

Название параметра	Ед. измерения	Значение
Внутренний диаметр ротора	мм	150
Наружный диаметр ротора	мм	300
Длина ротора	мм	50
Количество ячеек ротора	шт.	36
Количество массообменных каналов статора	шт.	26
Угол раскрытия окна ОНД	град.	40
Угол раскрытия окна ПНД	град.	50

Как показали проведенные расчетно-экспериментальные исследования, в диапазоне значений $\psi_{пр}$ от минимума до ~0,9 из ячейки в окно ОНД отводятся только отработавшие газы. При этом в ячейке к моменту окончания

процесса продувки помимо зоны свежего заряда сохраняются зона ОГ и зона перемешивания, причем зона свежего заряда становится все более весомой при больших значениях $\psi_{пр}$.

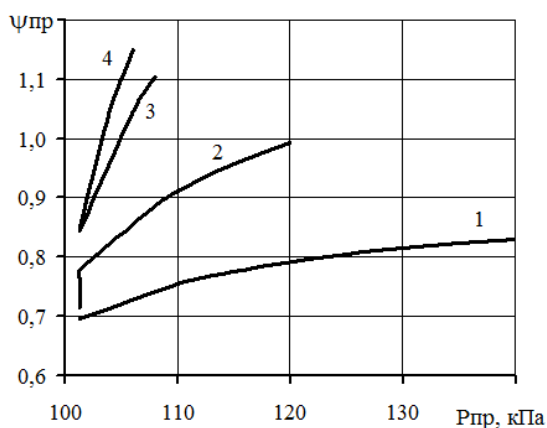


Рис. 1. Зависимость коэффициента продувки ячеек ротора от давления продувки $R_{пр}$ при различных частотах вращения ротора:

1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

В диапазоне $\psi_{пр} = 0,9...1,1$ к моменту разобращения ячейки с окнами низкого давления из нее вытесняется так называемая «зона перемешивания» свежего заряда и отработавших газов и к началу следующего цикла в ячейке остается некоторая часть отработавших газов предыдущего цикла, сосредоточенная большей частью в зоне ячейки, сопрягаемой к каналам статора.

Повышение коэффициента продувки свыше значений 1,1 не приводит к сколько-нибудь заметному изменению состава рабочего тела в ячейке после разобращения с окнами продувки (поскольку ячейка уже заполнена чистым свежим зарядом без примесей отработавших газов) и потому не может быть рекомендовано.

Следует отметить, что абсолютная очистка ячеек от ОГ не только не требуется, но и не желательна с точки зрения КПД. Действительно, как видно из рис. 2 и 3, с ростом давления продувки температуры и давление на различных режимах увеличиваются незначительно.

Как следует из представленных на рис. 2 кривых, с ростом $R_{пр}$ давление остаточных газов повышается, что характеризует снижение полноты использования потенциальной энергии горячих газов, образовавшихся в процессе сгорания, для сжатия свежего заряда. Особенно

ярко это влияние проявляется на низких скоростных режимах ДРВ. Например, на режиме $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$ рост $R_{пр}$ с 101,5 до 105 кПа (на 3,4%) сопровождается повышением Рост на 17,4% (с 207 до 243 кПа).

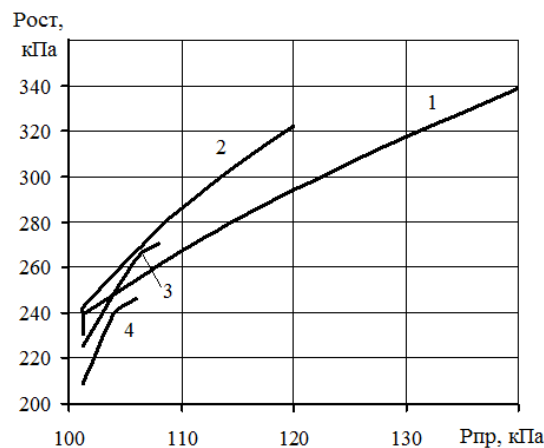


Рис. 2. Остаточное давление отработавших газов в зависимости от давления продувки при различных частотах вращения ротора:

1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

Отмеченное объясняется тем, что при высоких $R_{пр}$ к моменту окончания продувки в ячейке устанавливается более высокое давление, соответственно возрастает уровень давления в последних каналах массообменного каскада, что в свою очередь ограничивает возможность более глубокого расширения горячих газов.

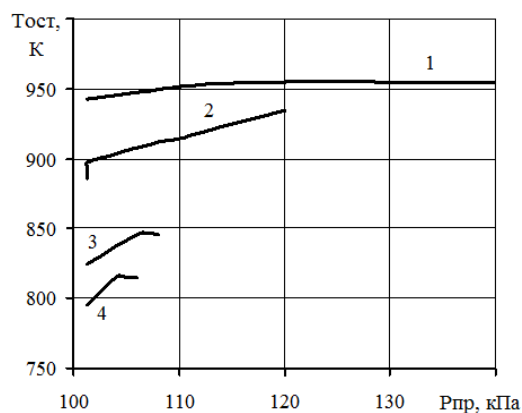


Рис. 3. Температура остаточных газов в зависимости от давления продувки при различных частотах вращения ротора:

1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

Такое же незначительное влияние на максимальные значения параметров цикла давления продувки заметно из рис. 4 и 5.

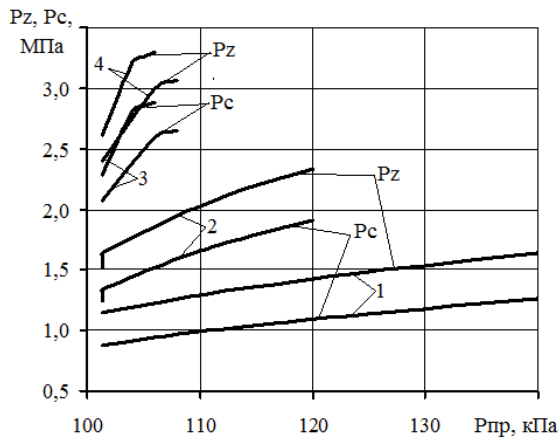


Рис. 4. Зависимость давления в конце сжатия P_c и максимального давления цикла P_z двигателя от давления продувки при различных n_R :
1 – $n_R = 20000$ мин⁻¹; 2 – $n_R = 15000$ мин⁻¹;
3 – $n_R = 10000$ мин⁻¹; 4 – $n_R = 8000$ мин⁻¹

Давление продувки оказывает незначительное влияние на температуру остаточных газов, причем степень его влияния снижается с ростом частоты вращения ротора ДРВ. Например на режиме $n_R = 20000$ мин⁻¹ повышение $P_{пр}$ с 101,5 до 120 кПа сопровождается увеличением $T_{ост}$ на 12 К (с 942 до 955 К), что составляет всего 1,4 %.

На режимах невысоких частот вращения ротора влияние $P_{пр}$ на $T_{ост}$ более выраженное. Аналогичное рассмотренному выше повышение $P_{пр}$ с 101,5 до 120 кПа на режиме $n_R = 15000$ мин⁻¹ сопровождается увеличением $T_{ост}$ уже на 35 К, что составляет 3,9%.

Давление продувки наиболее интенсивно оказывает влияние на максимальные давления и температуры цикла ДРВ в области низких частот вращения ротора, с ростом n_R влияние $P_{пр}$ снижается. Так, например, рост $P_{пр}$ с 101,5 до 106 кПа приводит к увеличению P_z на 29,5% при $n_R = 8000$ мин⁻¹ и только на 11,8% при $n_R = 20000$ мин⁻¹, максимальная температура цикла возрастает соответственно на 3,1% и 0,3%.

Обращает на себя внимание отличительная особенность рабочего процесса двигателя –

снижение максимального давления цикла при повышении частоты вращения ротора.

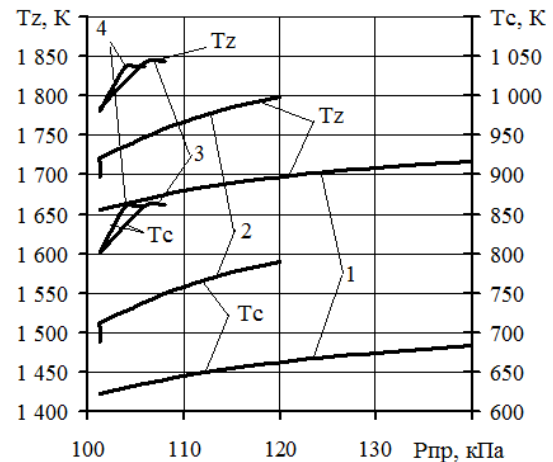


Рис. 5. Зависимость температур конца сжатия T_c и максимальной температуры цикла T_z двигателя реактивного вращения от давления продувки при различных n_R :
1 – $n_R = 20000$ мин⁻¹; 2 – $n_R = 15000$ мин⁻¹;
3 – $n_R = 10000$ мин⁻¹; 4 – $n_R = 8000$ мин⁻¹

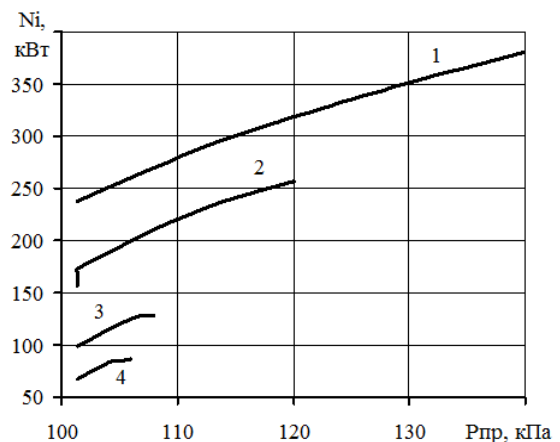


Рис. 6. Индикаторная мощность в зависимости от давления продувки при различных частотах вращения ротора:
1 – $n_R = 20000$ мин⁻¹; 2 – $n_R = 15000$ мин⁻¹;
3 – $n_R = 10000$ мин⁻¹; 4 – $n_R = 8000$ мин⁻¹

Влияние давления продувки на индикаторные показатели КДД отражено на рис. 6 – 8.

Как видно из рисунков, увеличение давления продувки является действенным способом повышения индикаторной мощности и крутящего момента ДРВ.

С ростом давления продувки индикаторная мощность двигателя реактивного вращения

закономерно возрастает, что объясняется увеличением количества свежего заряда, подаваемого в ячейки ротора ввиду увеличения его плотности. Так, например, на режиме 10000 мин^{-1} увеличение давления продувки с 101,5 до 105 кПа сопровождается увеличением мощности на 20 кВт (т.е. на 20,6%).

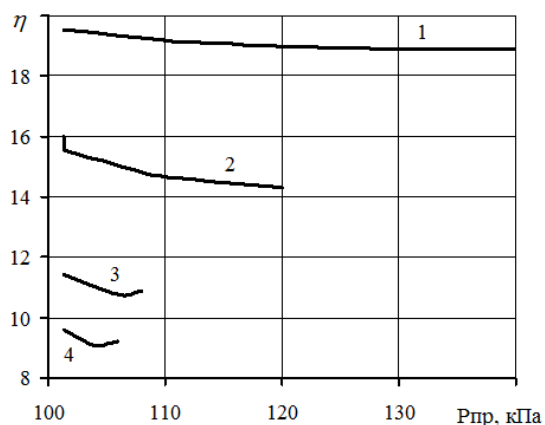


Рис. 7. Эффективный КПД двигателя:
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

На более высоких скоростных режимах работы двигателя влияние $R_{пр}$ на N_i несколько снижается, например, при $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$ увеличение $R_{пр}$ на 3,5 кПа (до 105 кПа) сопровождается ростом N_i только на 7,5% (с 237 до 255 кВт).

Давление продувки оказывает двойственное влияние на КПД двигателя. С одной стороны увеличение $R_{пр}$ сопровождается заметным ростом затрат на привод продувочного вентилятора, что негативно отражается на КПД.

С другой стороны, сопровождающее рост $R_{пр}$ повышение качества очистки ячеек от отработавших газов положительно сказывается на протекании процесса сгорания, что также положительно отражается на КПД двигателя.

В области невысоких давлений продувки ($R_{пр} = 101,5 \dots 110$ кПа) преобладающее влияние на КПД имеют повышающиеся затраты мощности на привод продувочного вентилятора, что отражается в общем снижении КПД. Например, при $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$ рост $R_{пр}$ от 101,5 до 110 кПа сопровождается снижением КПД на 0,7% (с 0,155 до 0,148).

С ростом $R_{пр}$ свыше 110 кПа становится заметным улучшение протекания процесса сгорания, и снижение КПД несколько замедляется.

В целом следует отметить, что, несмотря на незначительное снижение КПД, увеличение $R_{пр}$ для высоконагруженных режимов и условий эксплуатации является действенным и конструктивно легко осуществимым способом повышения мощностных характеристик двигателя.

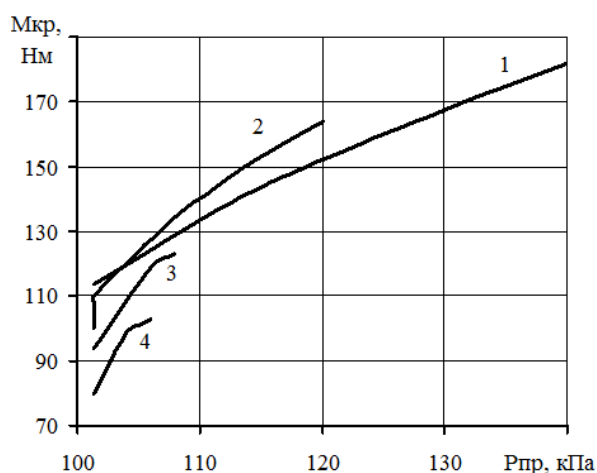


Рис. 8. Зависимость крутящего момента КДД от давления продувки:
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

Коэффициент продувки ячеек от отработавших газов (в период подключения ячеек к окнам продувки) оказывает определяющее влияние на протекание рабочего процесса двигателя реактивного вращения, поскольку характеризует расположение и протяженность (и соотношение) различных зон в ячейке ротора: зоны свежего заряда, отработавших газов и зоны перемешивания.

На рис. 9 и 10 изображено влияние коэффициента продувки на давление и температуру остаточных газов двигателя. Как видно из рис. 10, с увеличением $\psi_{пр}$ в диапазоне до $\psi_{пр} = 1$ температура остаточных газов двигателя повышается. Улучшение наполнения ячеек ротора свежим зарядом, характеризуемое коэффициентом продувки $\psi_{пр}$, сопровождается весьма значительным ростом давлений цикла (рис. 11, 12). К примеру, при $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$

увеличение $\psi_{\text{пр}}$ с 0,72 до 0,99 сопровождается ростом P_c на 48% (с 1,25 до 1,85 МПа) и P_z на 83% (с 1,5 до 2,75 МПа).

При этом повышение давления в процессе сгорания (от P_c до P_z) составляет примерно равную (соизмеримую) величину во всем диапазоне частот вращения ротора.

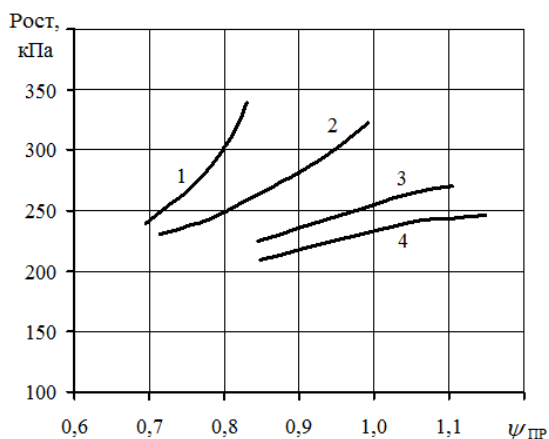


Рис. 9. Давление остаточных газов в зависимости от коэффициента продувки для различных частот вращения ротора двигателя:
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

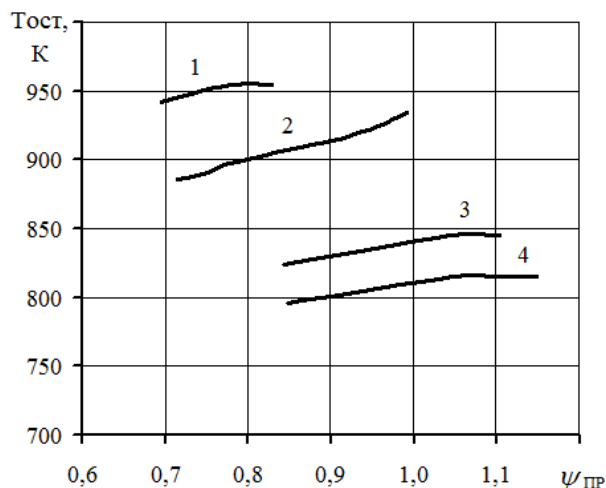


Рис. 10. Влияние коэффициента продувки ячеек на температуру остаточных газов при различных n_R :
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

Примечательно, что максимальное давление цикла двигателя не превышает 3...3,5 МПа, вследствие чего требования к прочности отдельных деталей и конструкции двигателя в целом предъявляются

незначительные в сравнении с другими типами широкораспространенных тепловых двигателей.

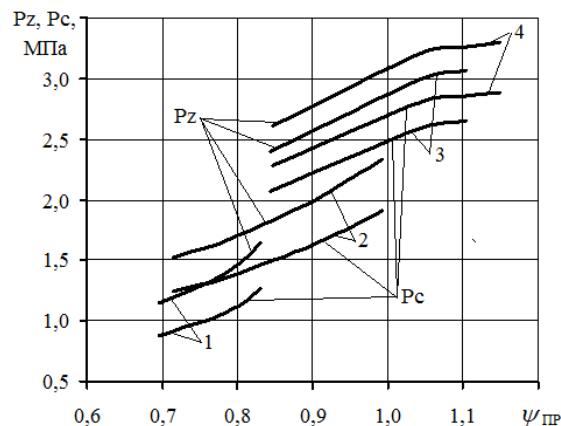


Рис. 11. Давления в характерных точках цикла в зависимости от коэффициента продувки:
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

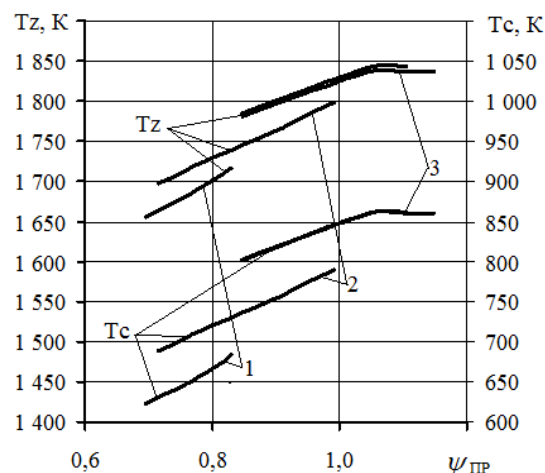


Рис. 12. Зависимость максимальной температуры цикла от коэффициента продувки:
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

Повышение качества продувки ячеек и полноты наполнения их свежим зарядом сопровождается заметным увеличением температур цикла во всем диапазоне скоростных режимов работы двигателя. Так при $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$ с ростом $\psi_{\text{пр}}$ до 1 T_c увеличивается с 1490 до 1585 К (на 6,4%), при этом T_z увеличивается с 1695 до 1800 К (на 6,2%).

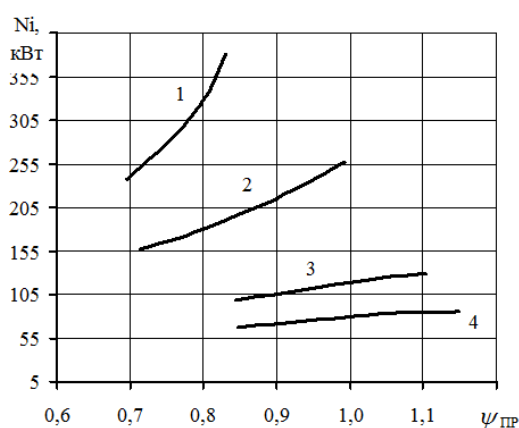


Рис. 13. Характер изменения дикаторной мощности ДРВ: 1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

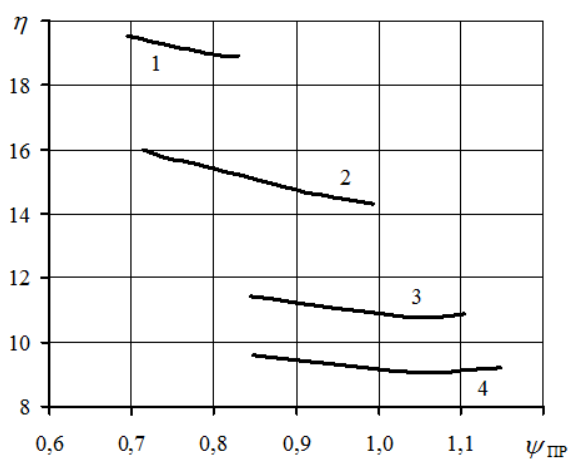


Рис. 14. Влияние коэффициента продувки на индикаторный КПД:
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

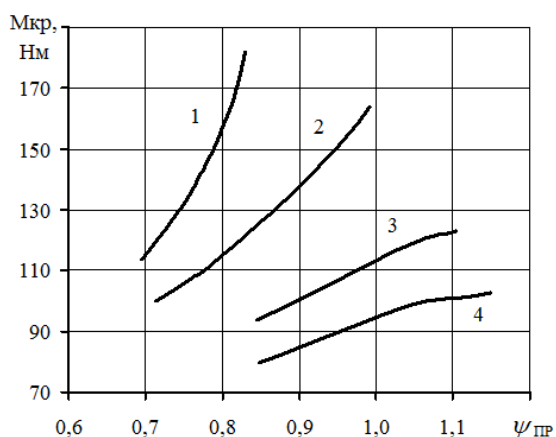


Рис. 15. Изменение крутящего момента ДРВ в зависимости от коэффициента продувки при различных n_R :
1 – $n_R = 20000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_R = 15000 \text{ мин}^{-1}$;
3 – $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n_R = 8000 \text{ мин}^{-1}$

Следует отметить, что вопрос увеличения $\psi_{пр}$ требует компромиса между повышением температур цикла (а значит и термического КПД цикла) и усилением теплонапряженности деталей и конструкции двигателя в целом.

На рис. 13 – 15 отображено влияние коэффициента продувки на индикаторные показатели двигателя.

Выводы. Выявлено влияние давления продувки $R_{пр}$ при различных частотах вращения ротора на коэффициент продувки ячеек ротора.

Давление продувки оказывает незначительное влияние на температуру остаточных газов, причем степень влияния снижается с ростом частоты вращения ротора.

Давление продувки наиболее интенсивно оказывает влияние на максимальные давление и температуру цикла двигателя в области низких частот вращения ротора, с ростом n_R влияние $R_{пр}$ снижается.

С ростом давления продувки индикаторная мощность двигателя закономерно возрастает, что объясняется увеличением количества свежего заряда, подаваемого в ячейки ротора ввиду увеличения его плотности.

Давление продувки оказывает двойственное влияние на КПД двигателя реактивного вращения. С одной стороны увеличение $R_{пр}$ сопровождается заметным ростом затрат на привод продувочного вентилятора, что негативно отражается на КПД. С другой стороны, сопровождающее рост $R_{пр}$ повышение качества очистки ячеек от отработавших газов положительно сказывается на протекании процесса сгорания, что также положительно отражается на КПД двигателя.

В области невысоких давлений продувки ($R_{пр} = 101,5 \dots 110 \text{ кПа}$) превалирующее влияние на КПД имеют повышающиеся затраты мощности на привод продувочного вентилятора, что отражается в общем снижении КПД. Несмотря на незначительное снижение КПД, увеличение $R_{пр}$ для высоконагруженных режимов и условий эксплуатации является действенным и конструктивно легко

осуществимым способом повышения мощностных характеристик двигателя.

Коэффициент продувки ячеек от отработавших газов (в период подключения ячеек к окнам продувки) оказывает определяющее влияние на протекание рабочего процесса двигателя, поскольку характеризует расположение и протяженность различных зон в ячейке ротора: зоны свежего заряда, отработавших газов и зоны перемешивания.

Исследовано влияние коэффициента продувки на давление и температуру остаточных газов двигателя. Улучшение наполнения ячеек ротора свежим зарядом, характеризуемое коэффициентом продувки $\psi_{пр}$, сопровождается весьма значительным ростом давлений цикла. К примеру, при $n_R = 10000 \text{ мин}^{-1}$ увеличение $\psi_{пр}$ с 0,72 до 0,99 сопровождается ростом P_c на 48% (с 1,25 до 1,85 МПа) и P_z на 83% (с 1,5 до 2,75 МПа).

Максимальное давление цикла двигателя не превышает 3...3,5 МПа, вследствие чего требования к прочности отдельных деталей и конструкции двигателя в целом предъявляются менее жёсткие в сравнении с другими типами широкораспространённых тепловых двигателей.

Увеличению коэффициента продувки $\psi_{пр}$ требует поиска компромиссного решения между повышением средней интегральной температуры подвода тепла в цикл, а, следовательно, термического КПД цикла и усилением теплонапряжённости деталей и конструкции двигателя в целом. По результатам проведенных исследований установлено, что рациональные значения коэффициента продувки находятся в диапазоне 0,95-1,05.

Список источников

1. Патент UA №77261, МПК6 F 02 B 33/42, Каскадный обменник давления, /Крайнюк А.И.. Крайнюк А.А. Заявка 20040806986, Дата подачи 21.08.2004, опубл. 15.11.2006. Бюл. № 11.
2. Данилейченко А.А. Конструктивные особенности двигателя с каскадным сжатием рабочей среды / А.А. Данилейченко,

М.А. Брянцев, Д.М. Доценко // Вестник ЛГУ им. В.Даля. – Луганск. – 2023. – № 7(73). – С.29-34.

3. Данилейченко А.А. Принцип действия двигателя с каскадным сжатием рабочей среды / А.А. Данилейченко, М.А.Брянцев, А.А.Базовой, В.В.Ваховский // Материалы 7-й всероссийской научно-технической конференции «Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства» (28-29апреля 2023 г., Ижевск). – Ижевск: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова». – 2023. – № 2. – С. 175-180.

4. Патент 105594 UA, F03G 7/06. Дисковый двигатель каскадного обмена давлением / Ю.В. Сторчеус, О.А. Данилейченко, А.С. Ковтун, М. А. Брянцев, заявл.01.10.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.

References

1. Patent UA №77261, MPK6 F 02 B 33/42, Kaskadnyj obmennik davleniya, /Krajnyuk A.I.. Krajnyuk A.A. Zayavka 20040806986, Data podachi 21.08.2004, opubl. 15.11.2006 Byul. № 11.
2. Danilejchenko A.A. Konstruktivnye osobennosti dvigatelya s kaskadnym szhatiem rabochej sredy / A.A. Da-nilejchenko, M.A.Bryancev, D.M.Docenko// Vestnik LGU im. V.Dalya. – Lugansk, izd. LGU. – 2023. – № 7(73). – S.29-34.
3. Danilejchenko A.A. Princip dejstviya dvigatelya s kaskadnym szhatiem rabo-chej sredy / A.A. Danilejchenko, M.A.Bryancev, A.A. Bazovoj, V.V. Vahovskij // Materialy 7-j vsrossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferen-cii «Avtomobilestroenie: proektirovanie, konstruirovanie, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva» (28-29aprelya 2023 g., Izhevsk). – Izhevsk: FGBOU VO «Izhevskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni M.T. Kalashnikova». – 2023. – № 2. – S.175-180.
4. Patent 105594 UA, F03G 7/06. Diskovyj dvigatel' kaskadnogo obmena davleniem / Yu.V. Storcheus, O.A. Danileychenko, A.S. Kovtun, M.A. Bryantsev, zayav 1.01.10.2015; opubl. 25.03.2016, Byul. № 6.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024

Информация об авторах

Брянцев Максим Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Данилейченко Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 6030-1239, AuthorID: 1185129

E-mail: 280376@rambler.ru

Ковтун Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Доценко Данил Михайлович, старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Information about the authors

Bryantsev Maksim Anatolievich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Danileychenko Alexander Anatolievich, candidate of sciences, a dosent of the chair « Internal combustion engines» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

SPIN-код: 6030-1239, AuthorID: 1185129

E-mail: 280376@rambler.ru

Kovtun Alexander Sergeevich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» Department of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Dotsenko Danil Mikhailovich, senior lecturer of the «Internal combustion engines» Department of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Для цитирования:

Брянцев М.А., Данилейченко А.А., Ковтун А.С., Доценко Д.М. Влияние режимных параметров на показатели работы двигателя с каскадным сжатием // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 7-15.

For citation:

Bryantsev M.A, Danileychenko A.A., Kovtun A.S., Dotsenko D.M. Influence of operating parameters on performance indicators cascade compression motor // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1 (1). – P. 7-15.

УДК 621.43

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИОДИЗЕЛЬНОГО И ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ДВС

Васильев И. П., Смелов С. В.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF BIODIESEL AND DIESEL FUELS FOR USE IN DVS

Vasilyev I. P., Smelov S. V.

Аннотация. Статья посвящена актуальной теме снижения парникового эффекта на планете. Практическую значимость статьи придаёт направление решения снижения парникового эффекта путём использования специального топлива, обеспечивающего улучшение сгорания и снижению выделения дисперсных частиц.

Актуальность темы статьи не вызывает вопросов, так как экологическая безопасность на планете приобретает всё большее значение.

В ходе исследования делается упор на практическое использование биодизеля с целью снижения парникового эффекта на планете.

Выявлены основные преимущества биодизеля: повышается КПД двигателя и снижаются выбросы твердых частиц.

Статья может быть полезна для научных сотрудников, которые занимаются экологическими вопросами на планете.

Ключевые слова: парниковый эффект, дизельное топливо, биодизельное топливо, топливный севооборот, получение биодизеля.

Abstract. Article is devoted to hot topic of drop of greenhouse effect on the planet. The practical importance of article is given by the direction of the solution of drop of greenhouse effect by use of the special fuel providing improvement of combustion and to drop of allocation of disperse particles.

The relevance of subject of article does not appeal questions as environmental safety on the planet gains the increasing value.

During probe emphasis is placed on practical use of the biodiesel for the purpose of drop of greenhouse effect on the planet.

The main advantages of the biodiesel are revealed: efficiency of the engine increases and blowouts of firm particles decrease.

Article can be useful to research associates who deal with environmental issues on the planet.

Keywords: greenhouse effect, diesel fuel, biodiesel fuel, fuel crop rotation, receiving biodiesel.

Введение. Для обеспечения снижения парникового эффекта на планете предлагается использовать топливо растительного происхождения-биодизель. Он изготавливается в специальном реакторе из растительного масла, метанола и катализатора при смешивании при температуре около 80°C. После окончания реакции происходит

разделение смеси на глицерин и биодизель. После сгорания биодизеля образуется CO₂, который поглощается растениями на полях. При этом обеспечивается кругооборот CO₂ в природе без увеличения содержания CO₂ в атмосфере. Из анализа состава биодизеля выявлено, что он содержит 11 об. % кислорода, в дизельном топливе кислорода содержится

только 0,004 об. %. Из-за повышенного содержания кислорода это приводит к улучшению сгорания биодизеля на первых стадиях сгорания.

На рис. 1 представлен характер появления парникового эффекта на планете.

Для уменьшения влияния парникового эффекта желательно использовать в качестве

топлива биодизель (БТ). На рис. 2 представлена схема получения биодизеля.

Существует варьирование реагентов при получении БТ, которые объясняются различными технологическими особенностями. Для наглядности предлагается содержание реагентов до (рис. 3) и после (рис. 4) реакции получения БТ из работы [1].

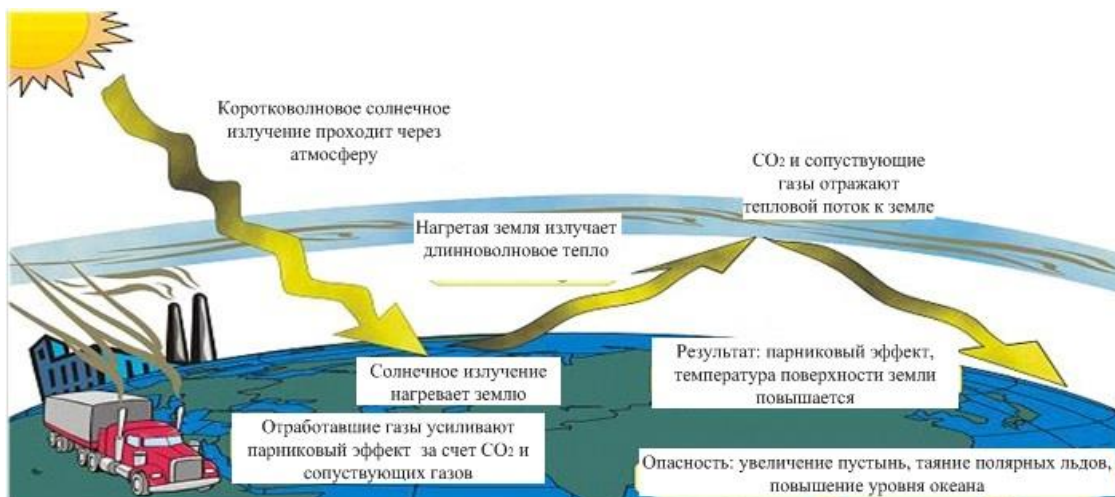


Рис. 1. Влияние различных факторов на парниковый эффект на планете

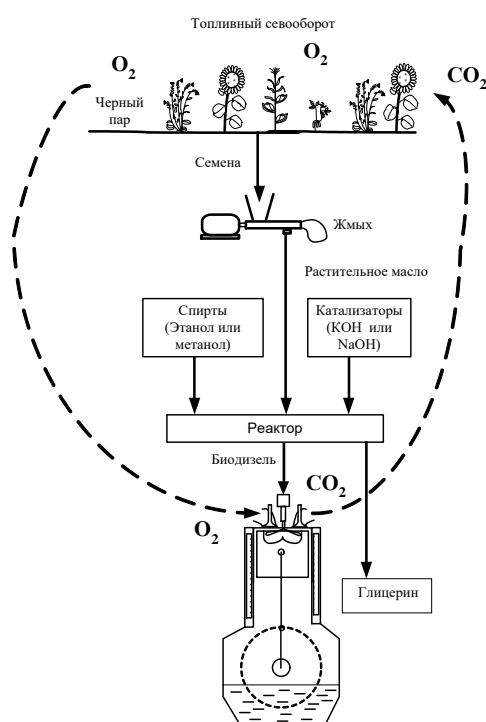


Рис. 2. Общая схема получения БТ из масличных культур



Рис. 3. Состав реагентов до приготовления

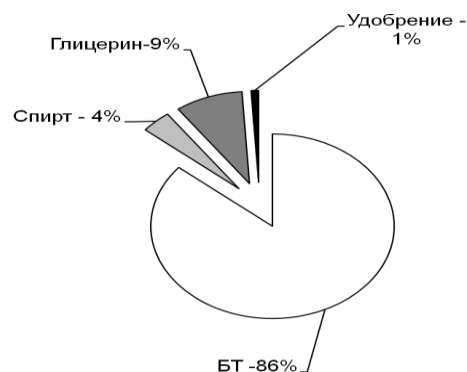


Рис. 4. Состав реагентов после приготовления БТ

В работе [2] используется соотношения реагентов при получении БТ из рапса, приведенные в табл. 2.

При получении БТ рекомендуется на 82,8 частей жира использовать 16,6 частей метанола и 0,6 частей NaOH.

В общем можно считать, что при использовании в качестве спирта метанола соотношение реагентов находится в

следующем диапазоне: на 86 частей растительного масла добавляется от 10 до 20 частей метанола, а количество щелочи составляет от 0,8 до 1,6 частей.

Результаты исследований.

Сравнительные характеристики БТ марки БИО ЭСТ и БИО ЭСТ «П» с нормами DIN 14214 приведены в табл. 2.2.

Таблица 2

Соотношение реагентов при получении БТ из РМ до и после реакции

Реагенты	До реакции, кг	До реакции, см ³	До реакции, %	После реакции, кг	После реакции, %
РапМ	356	386,9	87,6		
Метанол	44	55,6	10,8		
КОН	6,5		1,6		
Диметилловые эфиры жирных кислот				300	73,8
Глицерин				106,5	26,2
Сумма	406,5		100	406,5	100

Таблица 2.2

Характеристики БИОЭСТ «П» с нормами EN 14214

Характеристики	ДТ по ДСТУ 3868–99	БИО ЭСТ	БИО ЭСТ «П»	БТ EN 14214 (Европа)
ρ^{20} , кг/м ³	844	884	0,891	–
ρ^{15} , кг/м ³	–	887		0,86–0,9
ν^{20} , мм ² /с	5,3	7,3	10,6	–
ν^{40} , мм ² /с	–	4,73		3,5–5
$t_{всп}^{37}$, °C	78	173	150	120 min
Q_H , кДж/кг	42700	37200	37200	–
Цетановое число	45	51	52	51 min
Йодное число, г I ₂ /100 г	6	129,5	110	120 max
Содержание воды, мг/кг	нет	300	нет	500 max
Содержание фосфора, мг/кг	–	9	8	10 max
Кислотное число, мг КОН/г		0,46	До 1	0,5 max
Содержание метанола, % масс.		0	0,05	0,2 max
Содержание эфира, % масс.			96,5	96,5 min
Содержание свободного глицерина			0,04**	0,02 max
Содержание моноглицеридов, % масс.		Норма*	0,93**	0,8 max
Содержание диглицеридов, % масс.		Превышение*	0,6**	0,2 max
Содержание триглицеридов, % масс.			0,14**	0,2 max
Общий глицерин, % масс.			0,38**	0,25 max
$t_{пом}$, °C	–12	–3	0	
$t_{заст}$, °C	–24	–5	–5	

На данный момент времени использование того или иного топлива определяется

экономической целесообразностью, например, стоимостью одного кВт·ч (табл. 3).

Таблица 3

**Изменение стоимости одного кВт·ч для БТ по отношению к стоимости
одного кВт ч при работе двигателя на ДТ**

Топливо	Расход топлива, кг/ч	КПД, %	Стоимость топлива, евро/кг	Стоимость 1 кВт·ч, евро	Изменение стоимости 1 кВт ч, %
ДТ «Л»	0,686	0,238	0,655	0,225	–
МЭСМ–1	0,763	0,246	0,564	0,215	+4,2
МЭСМ – 2	0,751	0,25	0,589	0,221	+1,4
МЭРМ	0,779	0,241	0,567	0,221	+1,6
МЭПМ – 1	0,822	0,229	0,564	0,232	–3,2
МЭПМ – 2	0,788	0,238	0,565	0,223	+0,8
МЭПМ – 3	0,828	0,227	0,602	0,249	–10,9

где МЭСМ – метиловые эфиры соевого масла, МЭРМ – метиловые эфиры рапсового масла, МЭПМ – метиловые эфиры подсолнечного масла.

Из табл. 3 следует, что по экономическому критерию наиболее выгодно использовать МЭСМ – 1, МЭРМ и МЭСМ – 2. Важным является не только КПД двигателя, но и стоимость БТ. Высокий КПД двигателя может быть нивелирован большой стоимостью БТ на его получение. Определяющее значение имеет стоимость ДТ.

При исследованиях также была применена методика оценки качества БТ, которая заключалась в испытании в одном испытательном цикле опытного БТ и стандартного БТ, который полностью удовлетворяет требованиям.

Сравнительные результаты испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные результаты испытаний БТ

Показатели	В–100	Стандартное БТ	Отличие, %	Отличие с вероятностью 0,95
КПД, %	0,24	0,24	0	нет
$T_{ог}$, °C	309	301	2,6	есть
$T_{кс}$, °C	563	595	5,7	есть
α	1,94	1,93	0,5	нет
NO_x , %	654	525	20	есть
CO , чнм	268	222	17	–

Опытное БТ полностью соответствует экономическому показателю двигателя при работе на стандартном БТ. Это предполагает высокое качество опытного БТ, которое в любом случае необходимо проверить на соответствие стандарту.

Для уменьшения уровня выделения оксидов азота возможно использовать регулировку по углу опережения впрыскивания топлива. С этой целью была снята зависимость изменения КПД двигателя по углу опережения впрыскивания топлива при работе двигателя на БТ и ДТ (рис. 5).

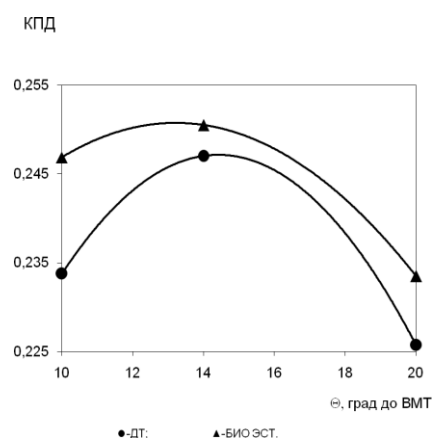


Рис. 5. Изменение КПД двигателя при работе на БТ и ДТ в зависимости от угла опережения впрыскивания

Характер изменения КПД двигателя позволяет рекомендовать уменьшение угла опережения впрыскивания как способом снижения выделения оксидов азота при работе на БТ при сохранении лучшей экономичности, чем при работе на дизельном топливе.

Выводы. В настоящее время на планете усиливается парниковое воздействие, которое выражается в повышении температуры на планете, таяние льдов, роста пустынь и т. д.

Это заключается в увеличении концентрации продуктов сгорания ископаемого углерода, в частности, CO_2 . Одним из способов борьбы с этим явлением является использования топлив растительного происхождения – биодизеля.

Биодизель производится из растительного масла с добавлением спирта и щелочи при подогреве около 80°C . В результате образуется глицерин и биодизель. CO_2 , который образовался в результате сгорания биодизеля поглощается растениями, из которых был получен биодизель. Получается замкнутый кругооборот CO_2 .

Список источников

1. Семенов В. Г. Биодизель. Физико-химические показатели и эколого-экономические

характеристики работы дизельного двигателя. – Харьков: Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 2002. – 186 с.

2. Lotko Wincenty Studium zastosowań paliw alternatywnych w silnikach o zapłonie samoczynnym. – Radom: Politechnika Radomska, 2000. – 228 s.

3. Васильев И. П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Монография. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2009. – 267 с.

References

1. Semenov V. G. Biodiesel. Physicochemical indicators and ecological-economic characteristics of diesel engine operation. – Kharkov: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2002. – 186 p.

2. Lotko Wincenty Studium zastosowań paliw alternatywnych w silnikach o zapłonie samoczynnym. – Radom: Politechnika Radomska, 2000. – 228 s.

3. Vasiliev I. P. Influence of vegetable fuels on ecological and economic indicators of diesel. Monograph. – Lugansk: Publishing house of V. Dahl National University, 2009. – 267 p.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024

Информация об авторах

Васильев Игорь Павлович, к.т.н. доцент кафедры «ДВС» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: vasilevkr@gmail.com

Смелов Станислав Валерьевич, студент группы ТЛ-811 «ДВС» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Information about the authors

Vasilev Igor Pavlovich, PhD in Technological Sciences associate professor of "DVS" of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: vasilevkr@gmail.com

Smelov Stanislav Valeryevich, Student of the DVS TL-811 group, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Для цитирования:

Васильев И. П., Смелов С. В. Сравнительный анализ характеристик биодизельного и дизельного топлив для использования в ДВС // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 16-20.

For citation:

Vasilev I. P., Smelov S. V. The comparative analysis of characteristics of biodiesel and diesel fuels for use in DVS // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1(1). – P. 16-20.

УДК 004.9:658.58

ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРАКТИКЕ РЕМОНТНЫХ СЛУЖБ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Деркачёв С. В., Сидоров В. А., Ошовская Е. В.

THE POSSIBILITIES AND PROBLEMS OF USING DIGITAL TWINS IN THE PRACTICE OF INDUSTRIAL REPAIR SERVICES

Derkachev S. V., Sidorov V. A., Oshovskaya E. V.

Аннотация. Работа посвящена вопросу применения цифровых двойников основного оборудования промышленных предприятий в практике ремонтных служб. Отмечено, что создание цифровых двойников позволяет существенно повысить надежность и непрерывность производственного процесса за счёт преобразования накопленных данных в информационные сообщения, используемые в методах предиктивной аналитики, что позволяет выявить повреждения оборудования на начальном этапе и предотвратить возникновение внезапных отказов.

Для проведения качественного диагностирования фактического состояния основного оборудования промышленного предприятия с использованием цифровых двойников к их формированию необходимо предъявлять определенные требования, так как набор данных, фиксируемых с помощью внешних датчиков, должен давать максимально достоверную и всестороннюю информацию об измеряемых параметрах для конкретного вида оборудования.

Ключевые слова: цифровизация производства, цифровой двойник, предиктивная аналитика, ремонт, оборудование.

Abstract. The work is devoted to the use of digital twins of the main equipment of industrial enterprises in the practice of repair services. It is noted that the creation of digital twins can significantly increase the reliability and continuity of the production process due to the transformation of accumulated data into information messages used in predictive analytics methods, which makes it possible to identify equipment damage at the initial stage and prevent the occurrence of sudden failures.

In order to carry out high-quality diagnostics of the actual state of the main equipment of an industrial enterprise using digital twins, it is necessary to impose certain requirements on their formation, since the set of data recorded using external sensors must provide the most reliable and comprehensive information about the measured parameters for a particular type of equipment.

Keywords: digitalization of production, digital twin, predictive analytics, repair, equipment.

Введение. В начале XXI века в Российской Федерации были приняты рекомендации по стандартизации информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции [1]. Посредством широкого внедрения компьютерных (информационных) технологий

в производство предполагалось увеличить эффективность промышленных предприятий. Этому способствовало усложнение производственно-технических и организационно-экономических систем, повышение рисков при функционировании

предприятий, более широкие возможности компьютерной техники.

Положительным результатом деятельности в данном направлении стало практически полное исключение на промышленных предприятиях контрольно-измерительных приборов с регистрацией данных на бумажных носителях, преобладающим стало цифровое накопление данных, изменились подходы к управлению производственными процессами и др. Такие процессы потребовали выполнения большого объема работ, связанных с установкой новых цифровых датчиков, прокладкой коммуникаций, обучением персонала работе с компьютерной техникой, согласованием с существующими системами управления, что привело к снижению количества технологического персонала, и возрастанию стоимости риска при возникновении сбоев и наладке систем управления.

Цифровизация является одним из направлений развития техногенной цивилизации, и актуальность данного процесса не вызывает никаких сомнений, однако возникает необходимость разработки эффективного использования новых подходов. Так, например, появление в 2020 году серии перспективных стандартов ПНСТ «Умное производство» требует понимания возможностей, структуры и задач применения цифровых двойников в практике ремонтных служб, обеспечивающих непрерывность функционирования промышленных предприятий.

Анализ последних исследований и публикаций. Серия перспективных предварительных национальных стандартов (ПНСТ) «Умное производство. Двойники цифровые производства» включает в себя такие стандарты, как: «Элементы визуализации цифровых двойников производства» [2], «Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения» [3], «Двойники цифровые производства. Часть 2. Типовая архитектура» [4], «Двойники цифровые производства. Часть 3. Цифровое представление физических

производственных элементов» [5], «Двойники цифровые производства. Часть 4. Обмен информацией» [6].

В стандартах [2 – 6] определены термины и содержание структуры цифровых двойников производства как виртуального представления физических элементов производственного процесса, таких как персонал, продукты производства, активы и описание процессов. Цифровой двойник производства представляет собой детальное моделирование конфигураций физических сущностей и динамическое моделирование изменений продукта, процесса и ресурсов в процессе производства. При этом уточняется, что оценка соответствия цифровой модели изделия включает в себя процедуры верификации и валидации математических моделей в соответствии с ГОСТ Р 57188, компьютерных моделей и их программного обеспечения по ГОСТ Р 57700.1, ГОСТ Р 57700.2, ГОСТ Р 57700.24, ГОСТ Р 57700.25. Также предполагается известным содержание программы интегрированной компьютеризации производства ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) и методологии моделирования IDEF (ICAM Definition). Рамки цифрового двойника несколько размыты определением «система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием» и требованием - «наполнение и функциональность цифровой модели зависит от стадии жизненного цикла изделия».

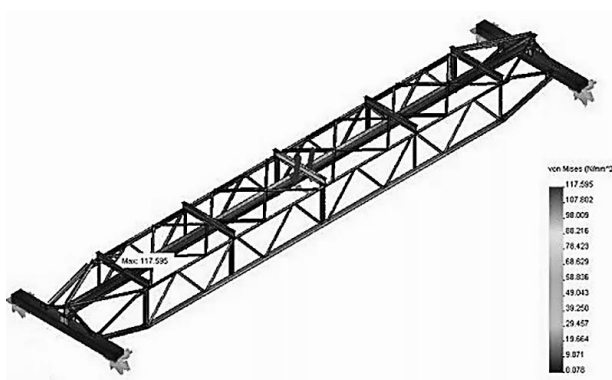
Фактически указанные стандарты, как все переведенные (скопированные) с импортных образцов, содержат общие рекомендации, предполагая, что конкретное насыщение цифровых двойников будет осуществляться компетентными фирмами. Установленное различие между цифровой моделью и системой математических и компьютерных моделей заключается в наличии электронных документов изделия, определяющих динамику его поведения.

Цель исследования. Данная статья посвящена возможности применения цифровых двойников основного оборудования

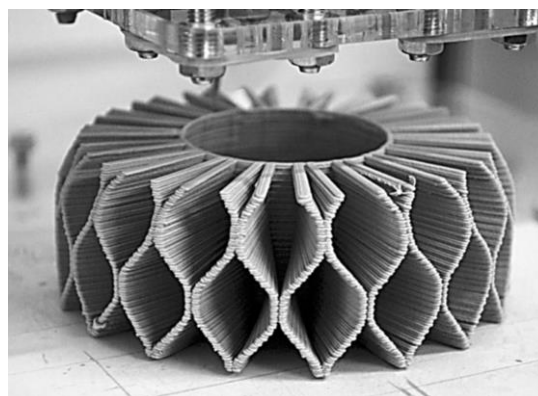
промышленных предприятий для нужд ремонтных служб.

Материалы и результаты исследований. Эффективность компьютерных моделей в сфере проектирования и исследований подтверждается колоссальными возможностями новейших технологий.

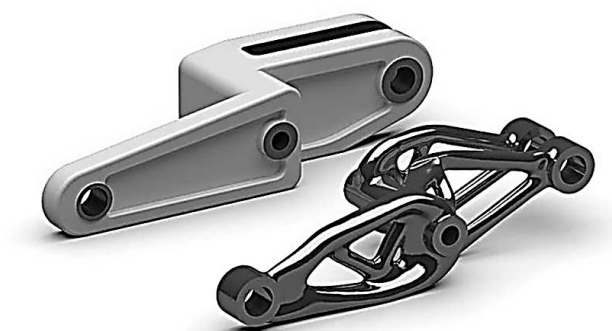
Например, анализ напряжённого состояния, программирование станков с числовым программным управлением (ЧПУ), работа измерительных систем, аддитивные технологии, управление сложными технологическими процессами, робототехника и т.д. (рис. 1).



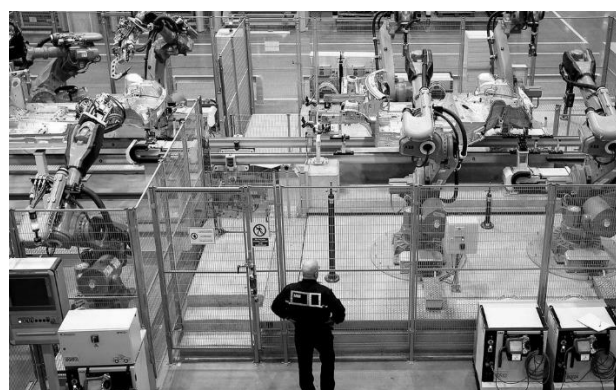
а



б



в



г

Рис. 1. Примеры использования компьютерных моделей:

а) определение напряжений элементов металлоконструкций; б) изделие, полученное с использованием аддитивной технологии; в) топологическая оптимизация при 3D-печати; г) управление группой роботов

Системы типа «Диспетчер» позволяют одновременно фиксировать большое число данных, визуализировать технологические процессы, включая функции автоматизированного и удалённого управления, как это показано на рис. 2. При этом следует отметить, что накапливаемый объём данных не поддаётся анализу ни в ручном, ни в автоматизированном виде. Обучение искусственного интеллекта данным операциям принципиально возможно, однако нестабильность, изменчивость начальных условий, ремонты и модернизация

оборудования требуют постоянного изменения алгоритмов анализа.

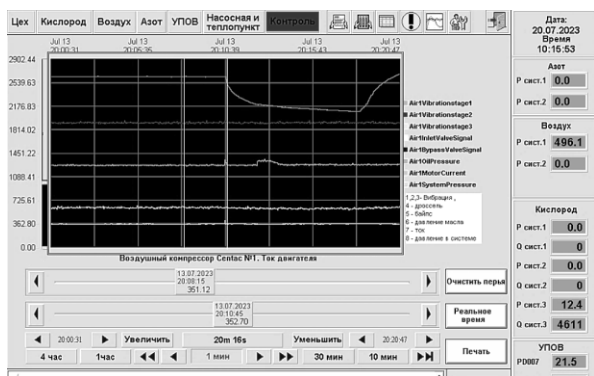
Можно привести несколько известных фактов применения цифровых двойников и методов предиктивной аналитики.

1. Государственная корпорация «Росатом» запустил пилотный проект по предиктивному анализу состояния оборудования на турбогенераторе энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС – 2. В рамках проекта было разработано 49 предиктивных моделей нескольких видов основного оборудования, таких как турбогенератор, паротурбинная

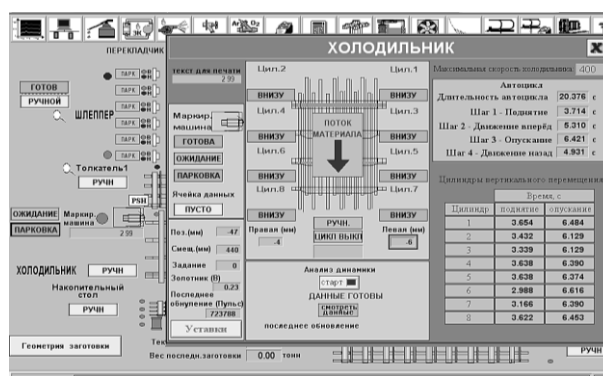
установка и циркуляционные насосы [7]. Системой отслеживается порядка 700 параметров, поступающих с различных датчиков.

2. Компания «Формат Кода» создала систему мониторинга и предиктивного

обслуживания гидроэлектростанции [8]. Установленные на турбинах датчики осуществляют сбор информации о частоте работы турбин, напряжении сети, температуре и других основных параметрах.



а



б

Рис. 2. Вид рабочего окна программы «Диспетчер»:

а – воздушный компрессор кислородного цеха; б – МНЛЗ - холодильник с шагающими балками

3. На Магнитогорском металлургическом комбинате внедрили программно-технический комплекс «Мониторинг-Предиктив» [9], который контролирует работу электромеханического оборудования в процессе его эксплуатации, где с помощью беспроводных датчиков измеряют электромагнитное поле электродвигателей и их вибрацию.

4. Для понимания причин сбоев при автозапуске насосов аналитики компании ПАО «Газпромнефть» собрали 200 млн. записей за год с контроллеров систем управления на 1649 скважинах, записи из аварийных журналов, схемы электроснабжения и другую информацию.

Представленные примеры демонстрируют случаи использование больших массивов данных и большого количества датчиков, формирующих многомерное диагностическое пространство симптомов. Однако, насыщение элементов технической системы датчиками подсистем контроля состояния снижают общий уровень надёжности. Вероятность отказа каждого датчика относительно мала, но датчиков много и вероятность неправильного их срабатывания возрастает.

Установка систем контроля, мониторинга, предиктивной аналитики оправданы в случае увеличения количества работающего оборудования и снижения квалификации ремонтного персонала при одновременном снижении его численности. Необходимость «замены механика с его субъективизмом» является основной причиной внедрения и совершенствования цифровых технологий, а снижение затрат на техническое обслуживание приводит к внеплановым отказам и увеличенным затратам на ликвидацию их последствий. Обслуживание систем контроля требует наличия высококвалифицированных специалистов, владеющих навыками устранения неполадок и работы с предоставляемыми массивами данных. Получение информативных сообщений из океана данных требует участия специалиста самого высокого уровня. Полученное информационное сообщение должно быть реализовано путём выполнения ремонтных операций, качество которых определяется квалификацией ремонтного персонала. Получается замкнутый круг проблем, решение которых предлагается на самом высоком интеллектуально достижимом уровне, забывая

о фактических проблемах каждого промышленного предприятия.

Практика эксплуатации электромеханического оборудования раскрывает широкий диапазон возможных проявлений технического состояния. Предполагается, что интеллектуальный мониторинг контролирует набор определенных параметров и анализирует их коллективное

поведение. Обнаружение малых отклонений от эталонных трендов служит основанием для принятия решения о необходимости технического обслуживания или ремонта (рис. 3) [10]. Такой подход способствует переходу от предельных значений к динамическому коридору возможных отклонений.

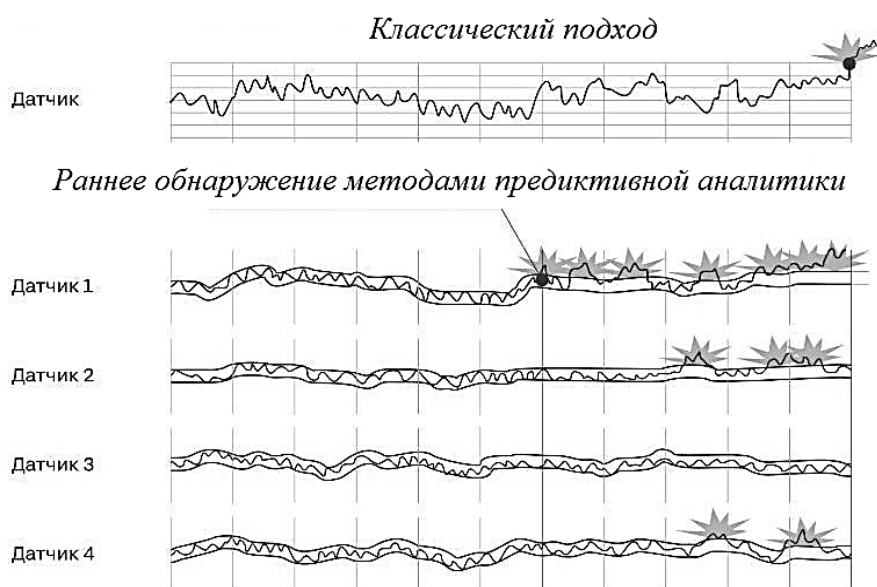


Рис. 3. Раннее обнаружение неисправности методами предиктивной аналитики

Применение методов предиктивной аналитики на основе интеллектуального мониторинга с помощью системы SmartSignal [11] позволяет выполнять контроль набора параметров по заданному узлу и анализ их коллективного поведения. На основании текущего значения набора данных с датчиков математическая модель предсказывает следующее действие, при этом математическая модель проходит обучение не на отказах, а на правильной работе оборудования в различных режимах. Предполагается использование матрицы допустимых состояний оборудования, состоящей из сочетаний параметров, встречающихся в истории наблюдений; использование моделирования на основе подобия с использованием данных с нескольких датчиков для выдачи предупреждений на ранней стадии;

использование экспертных диагностических систем и т. д.

Приведенные положения совпадают с основами вибрационного диагностирования механического оборудования: изменения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях, использование дополнительных измерений виброскорости и виброускорения, анализ данных без усреднения, правила распознавания повреждений и др. Хотя фиксация малых отклонений на ранней стадии вызывает сомнение. Накопление статистических данных при наблюдении за двумя однотипными механизмами в промышленных условиях показывает более сложную картину изменения вибрационных показателей, обусловленную влиянием технологической нагрузки, сезонных изменений, проводимых ремонтных операций и др.

Например, контроль технического состояния двух однотипных турбодетандеров компрессорного цеха проводился на протяжении 5 лет эксплуатации путём проведения ежедневных измерений вибрации при помощи виброанализатора и фиксации результатов с различным периодом между измерениями. Максимальный период составлял 1 месяц, минимальный – сутки (после проведения ремонта). Случайная последовательность работы двух турбодетандеров определялась производственной необходимостью.

Турбодетандер включает в себя электродвигатель мощностью 250 кВт и частотой вращения 3000 об/мин. (50 Гц), втулочно-пальцевую муфту, мультипликатор с передаточным отношением 0,2029, рабочее колесо с 20 лопатками, а также быстроходный вал, вращающийся с частотой 14760 об/мин. (246 Гц). Применение в опорах подшипников скольжения позволяет использовать в качестве основного диагностического параметра среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц, а в качестве вспомогательного – СКЗ и пиковое (ПИК) значение виброускорения в частотном диапазоне 10...5000 Гц.

Измерения вибрации проводились в контрольных точках в вертикальном (В), поперечном (П) и осевом (О) направлениях при работе под нагрузкой. Установлено, что наиболее информативными являются измерения, выполненные на мультипликаторе. Контрольная точка А – подшипник тихоходного вала со стороны двигателя, контрольная точка Б – подшипник быстроходного вала со стороны рабочего колеса. Допустимое значение виброскорости для данного класса машин в соответствии с ГОСТ-10816-97 составляет 7,1 мм/с. Значения виброускорения не нормируются, при их анализе используется относительная оценка. Изменение СКЗ виброскорости, СКЗ и ПИК значений виброускорения на протяжении 5-ти лет эксплуатации по турбодетандеру №1

показано на рис. 4. Можно отметить, что вибрационная картина в точках А и Б, отражающая влияние внешних воздействий и изменение внутренних факторов, определяющих работоспособное состояние, имеет различия, что связано с разной частотой вращения валов.

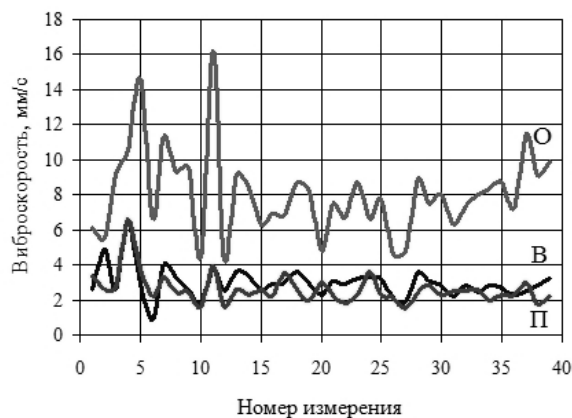
Ремонт данного оборудования (замена подшипников валов мультипликатора) проводился после 11-го измерения, что подтверждается снижением значений виброскорости: по точке А – от 16 до 4 мм/с (в 4 раза); по точке Б – от 7 до 1,4 мм/с (в 5 раз). Диагностические признак – соотношение между значениями виброскорости в вертикальном, поперечном и осевом направлениях позволяют сделать предварительные выводы в постановке диагноза. В данном случае необходимо обратить внимание на отсутствие стабильности в показаниях вибрационных показателей – изменения значений в 2...2,5 раза происходят постоянно, не меняя категории технического состояния. Такая вибрационная картина соответствует работе изношенного оборудования, установленного на податливом фундаменте. При этом оборудование выполняет возложенные на него функции. Следовательно, малые отклонения не могут служить признаком необходимости проведения ремонтных операций без учёта изменений значений технологических параметров.

Аналогичные выводы можно сделать и по изменению вибрационной картины на протяжении 5 лет эксплуатации по турбодетандеру № 2 (рис. 5). Как видно из рис. 5, соотношение между составляющими виброскорости иное, ремонт проведен после 48 измерения, что отразилось на графиках виброскорости и оставило неизменными колебания значений виброускорения. Размах колебаний между значениями в целом меньше, чем по турбодетандеру № 1.

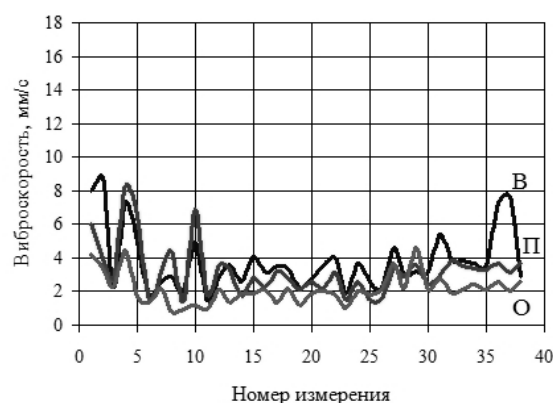
Можно сделать вывод, что условия установки и режимы эксплуатации приводят к значительным различиям в отображении технического состояния при использовании

параметров вибрации однотипных механизмов. При этом работа механизмов может сопровождаться значительным разбросом

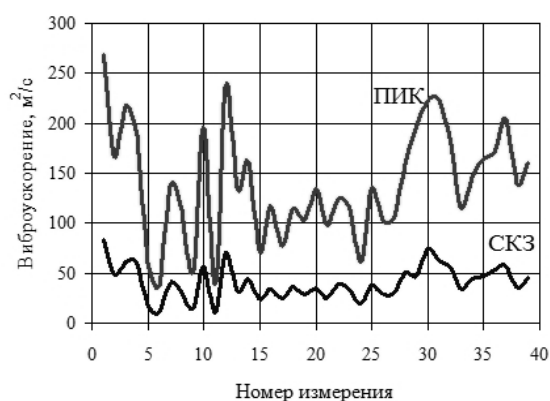
значений контролируемых величин даже при длительном режиме работы.



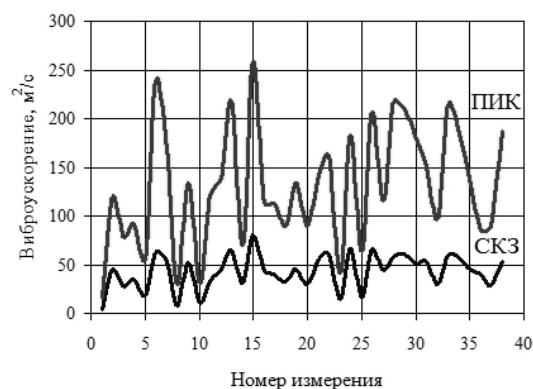
а



б



в



г

Рис. 4. Изменения значений вибрационных параметров турбодетандера №1:

а – СКЗ виброскорости точки А; б – СКЗ виброскорости точки Б; в – ПИК и СКЗ виброускорения точки А; г – ПИК и СКЗ виброускорения точки Б

Тогда, требования к цифровому двойнику для выполнения предиктивного анализа предполагают совмещение возможностей компьютерного моделирования, оценки фактического состояния и условий эксплуатации оборудования. Это формирует задачу наполнения компьютерной модели информацией о влиянии внешних факторов на снижение долговечности «идеального» изделия. В каждом конкретном случае будет формироваться индивидуальный набор данных, но для широко применяемых изделий эти показатели будут универсальными. Например,

для асинхронных двигателей привода электромеханических систем можно принять следующие показатели: количество включений, уровень и стабильность нагрузки, запыленность, температура среды. Для каждого показателя можно выделить 3...5 уровней значений по степени ухудшения. Данные уровни следует сравнить с проектными условиями для рассматриваемого изделия и по отклонениям оценить степень снижения долговечности и степень повышения риска отказа, включая затраты на ликвидацию последствий.

Необходимым требованием к цифровым двойникам является также понятный учёт всех доступных для регистрации факторов (например, даты установки, даты проведенных ремонтов, включая их содержание, качество монтажа и др.) с дальнейшим их применением для решения задач прогнозирования на основе логических моделей. Реализация такого

подхода представляется возможной с помощью электронных таблиц (например, MicroSoft Excel или Open Office), основное достоинство которых доступность для практики промышленной эксплуатации. Это позволит при создании и внедрении цифровых двойников перейти от этапа чрезмерных ожиданий к этапу реальных возможностей.

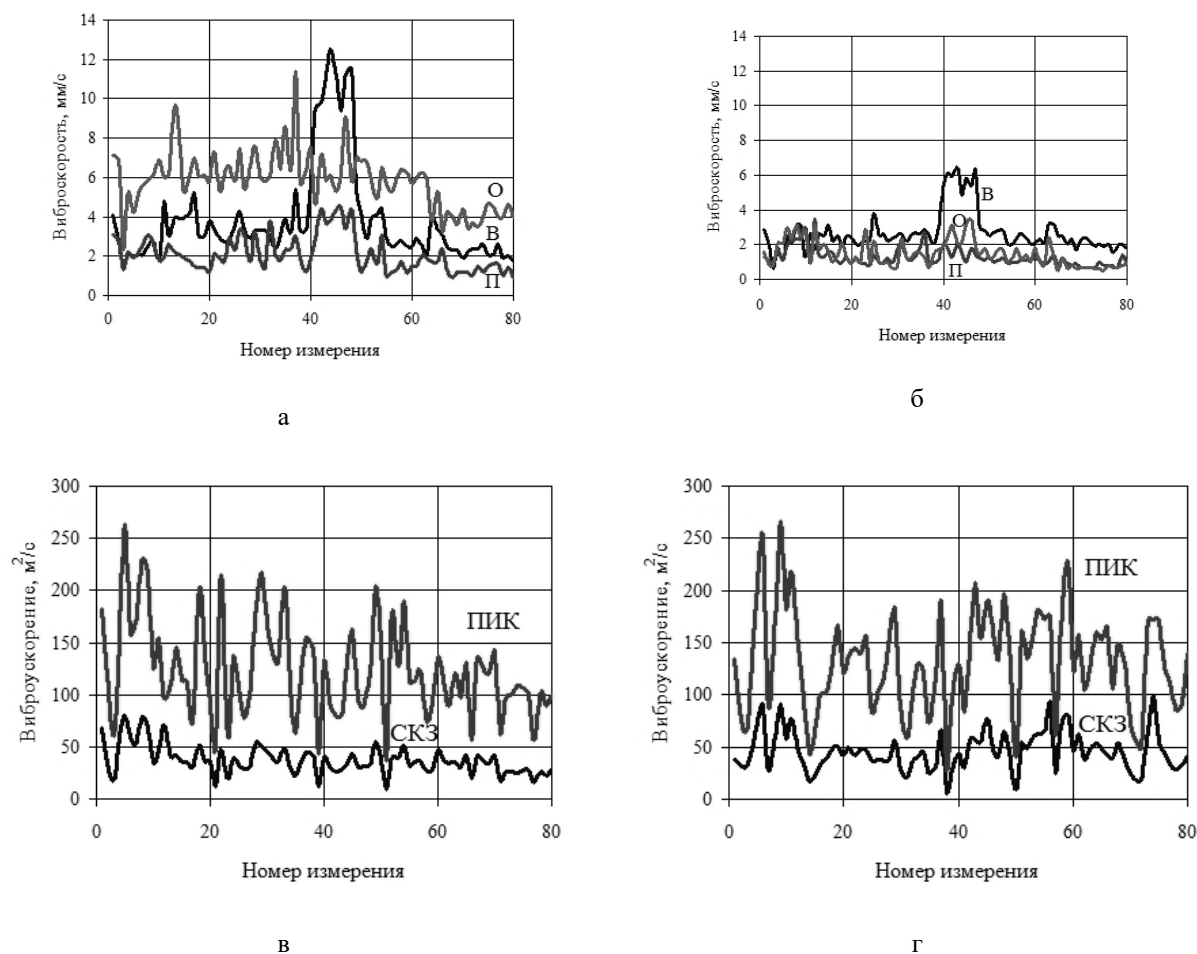


Рис. 5. Изменения значений вибрационных параметров турбодетандера №2:

а – СКЗ виброскорости точки А; б – СКЗ виброскорости точки Б; в – ПИК и СКЗ виброускорения точки А; г – ПИК и СКЗ виброускорения точки Б

Выводы. 1. Использование цифровых двойников и методов предиктивной аналитики в практике ремонтных служб промышленных предприятий позволяет обеспечить надежность и непрерывность производственного процесса за счёт выявления повреждений оборудования еще на начальном этапе возникновения.

2. Для проведения качественного диагностирования фактического состояния основного оборудования промышленного

предприятия к формированию его цифровых двойников необходимо предъявлять определенные требования. Набор параметров оборудования, фиксируемых с помощью внешних датчиков, должен давать максимально достоверную и всестороннюю информацию о техническом состоянии для конкретного вида оборудования.

Список источников

1. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования: рекомендации по стандартизации: издание официальное: приняты и введены в действие Постановлением Госстандарта России от 2 июля 2001 г. № 256-ст: введены впервые : дата введения 2002-02-07 / разработаны Научно-исследовательским Центром CALS-технологий «Прикладная Логистика» при участии Всероссийского научно-исследовательского института стандартизации (ВНИИСтандарт). – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 54 с.
2. ПНСТ 428-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Элементы визуализации цифровых двойников производства: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. № 37-пнст: дата введения 2021-01-01 / разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (АО «ВНИИС») и Акционерным обществом «Российская венчурная компания» (АО «РВК»). – Москва: Стандартинформ, 2020. – 8 с.
3. ПНСТ 430-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 2. Типовая архитектура: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. № 39-пнст: дата введения 2021-01-01 / разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (АО «ВНИИС») и Акционерным обществом «Российская венчурная компания» (АО «РВК»). – Москва: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
4. ПНСТ 430-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 2. Типовая архитектура: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. № 39-пнст: дата введения 2021-01-01 / разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (АО «ВНИИС») и Акционерным обществом «Российская венчурная компания» (АО «РВК»). – Москва: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
5. ПНСТ 431-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 3. Цифровое представление физических производственных элементов: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. № 40-пнст: дата введения 2021-01-01 / разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (АО «ВНИИС») и Акционерным обществом «Российская венчурная компания» (АО «РВК»). – Москва: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
6. ПНСТ 432-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 4. Обмен информацией: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2020 г. № 40-пнст: дата введения 2021-01-01 / разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (АО «ВНИИС») и Акционерным обществом «Российская венчурная компания» (АО «РВК»). – Москва: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
7. Электроэнергетический дивизион Росатома начал тиражирование системы предиктивной аналитики на АЭС страны. 22 Февраля, 2023. - Сайт Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». – URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/elektroenergeticheskij-divizion-rosatoma-nachal-tirazhirovanie-sistemy-prediktivnoy-analitiki-na-aes/>
8. Система мониторинга для гидроэлектростанций. – Сайт компании «Формат Кода». – URL: <https://formatkoda.ru/projects/sistema-monitoringa-gidroelektrostancij/?ysclid=m4ci3iq19p959730302>
9. Диагностика оборудования и прогнозирование неисправностей. – Сайт «Альянс в сфере искусственного интеллекта». – URL: <https://ai->

rusia.ru/library/mmk-

diagnostica?ysclid=m4cisigtsc428919611

10. Предиктивный анализ: блажь или реальная экономия? 7 декабря 2022. – Сайт компании «Формат Кода». – URL: <https://formatkoda.ru/blog/prediktivnyj-analiz-blazh-ili-realnaya-ekonomiya/>

11. Сайт компании «ИндаСофт». – URL: https://indusoft.ru/products/ge_digital/apm-smart-signal-ge/apm-smart-signal/

References

1. R 50.1.028-2001. Information technology for product lifecycle support. Functional modeling methodology: recommendations for standardization: official publication: prinyaty i vvedeny v dejstvie Postanovleniem Gosstandarta Rossii ot 2 iyulya 2001 g. № 256-st : vvedeny v pervye : data vvedeniya 2002-02-07 / razrabotany Nauchno-issledovatel'skim Centrom CALS-tehnologij «Prikladnaya Logistika» pri uchastii Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta standartizacii (VNIISTandart). – Moskva: IPK Izdatel'stvo standartov, 2001. – 54 s.

2. PNST 428-2020. Smart manufacturing. Digital production doubles. Visualization elements of digital production doubles: preliminary national standard of the Russian Federation: official publication: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 7 avgusta 2020 g. № 37-pnst: data vvedeniya 2021-01-01 / razrabotan Akcionernym obshchestvom «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut sertifikacii» (AO «VNIIS») i Akcionernym obshchestvom «Rossijskaya venchurnaya kompaniya» (AO «RVK»). – Moskva: Standartinform, 2020. – 8 s.

3. PNST 430-2020. Smart manufacturing. Digital production doubles. Part 2. Standard architecture: preliminary national standard of the Russian Federation: official publication: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 7 avgusta 2020 g. № 39-pnst: data vvedeniya 2021-01-01 / razrabotan Akcionernym obshchestvom «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut sertifikacii» (AO «VNIIS») i Akcionernym obshchestvom «Rossijskaya venchurnaya kompaniya» (AO «RVK»). – Moskva: Standartinform, 2020. – 16 s.

4. PNST 430-2020. Smart manufacturing. Digital production doubles. Part 2. Standard architecture: preliminary national standard of the Russian Federation:

official publication: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 7 avgusta 2020 g. № 39-pnst: data vvedeniya 2021-01-01 / razrabotan Akcionernym obshchestvom «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut sertifikacii» (AO «VNIIS») i Akcionernym obshchestvom «Rossijskaya venchurnaya kompaniya» (AO «RVK»). – Moskva: Standartinform, 2020. – 16 s.

5. PNST 431-2020. Smart manufacturing. Digital production doubles. Part 3. Digital representation of physical production elements: preliminary national standard of the Russian Federation: official publication: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 7 avgusta 2020 g. № 40-pnst: data vvedeniya 2021-01-01 / razrabotan Akcionernym obshchestvom «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut sertifikacii» (AO «VNIIS») i Akcionernym obshchestvom «Rossijskaya venchurnaya kompaniya» (AO «RVK»). – Moskva: Standartinform, 2020. – 16 s.

6. PNST 432-2020. Smart manufacturing. Digital production doubles. Part 4. Information exchange: preliminary national standard of the Russian Federation: official publication: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 7 avgusta 2020 g. № 40-pnst: data vvedeniya 2021-01-01 / razrabotan Akcionernym obshchestvom «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut sertifikacii» (AO «VNIIS») i Akcionernym obshchestvom «Rossijskaya venchurnaya kompaniya» (AO «RVK»). – Moskva: Standartinform, 2020. – 16 s.

7. Rosatom's Electric power division has started replicating the predictive analytics system at the country's nuclear power plants. February 22, 2023 - Website of the State Atomic Energy Corporation Rosatom. – URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/elektroenergeticheskij-divizion-rosatoma-nachal-tirazhirovanie-sistemy-prediktivnoy-analitiki-na-aes/>

8. Monitoring system for hydroelectric power plants. – The website of the company "Code Format". – URL: <https://formatkoda.ru/projects/sistema-monitoringa-gidroelektrostancij/?ysclid=m4ci3iq19p959730302>

9. Equipment diagnostics and fault prediction. – The website of the Alliance in the field of artificial intelligence. – URL: <https://ai-russia.ru/library/mmk-diagnostica?ysclid=m4cisigtsc428919611>

10. Predictive analysis: whim or real savings? December 7, 2022 - Website of the company "Code Format". – URL: <https://formatkoda.ru/blog/prediktivnyj-analiz-blazh-ili-realnaya-ekonomiya/>

11. The website of the company "IndaSoft". – URL: https://indusoft.ru/products/ge_digital/apm-smart-signal-ge/apm-smart-signal/

Статья поступила в редакцию 18.10.2024

Информация об авторах

Деркачёв Сергей Владимирович, к.т.н., руководитель молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение» доцент кафедры «Электрических станций» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, (ДНР).
SPIN-код: 9805-8678, AuthorID: 850398
E-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Information about the authors

Derkachev Sergey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Youth Scientific Laboratory «Instrument Engineering and Machine Tool Building», Associate Professor of the Department of Electrical Stations of Donetsk National Technical University, Donetsk.
SPIN-код: 9805-8678, AuthorID: 850398
E-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Сидоров Владимир Анатольевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии», старший научный сотрудник молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, (ДНР).
SPIN-код: 2618-4815, AuthorID: 848732
E-mail: sidorov_va58@mail.ru

Sidorov Vladimir Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants, Senior Researcher, Youth Scientific Laboratory "Instrument Engineering and Machine Tool Manufacturing" of Donetsk National Technical University, Donetsk.
SPIN-код: 2618-4815, AuthorID: 848732
E-mail: sidorov_va58@mail.ru

Ошовская Елена Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии», старший научный сотрудник молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение» Донецкого национального технического университета, г. Донецк, (ДНР).
SPIN-код: 6249-3730, AuthorID: 851249
E-mail: evo2008@bk.ru

Oshovskaya Elena Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants, Senior Researcher, Youth Scientific Laboratory "Instrument Engineering and Machine Tool Manufacturing" of Donetsk National Technical University, Donetsk.
SPIN-код: 6249-3730, AuthorID: 851249
E-mail: evo2008@bk.ru

Для цитирования:

Деркачёв С. В., Сидоров В. А., Ошовская Е. В. Возможности и проблемы применения цифровых двойников в практике ремонтных служб промышленных предприятий // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 21-31.

For citation:

Derkachev S. V., Sidorov V. A., Oshovskaya E. V. The possibilities and problems of using digital twins in the practice of industrial repair services // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1(1). – P. 21-31.

УДК 338.27:658.588

РАСЧЕТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЫСТРОТЫ ИСЧЕРПАНИЯ РЕСУРСОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОСТАТКУ МЕЖРЕМОНТНЫХ И НАЗНАЧЕННЫХ РЕСУРСОВ ОБЪЕКТОВ ИХ ПОСТАНОВКИ

Любченко Д. И., Чеботарев Д. Г., Зиньковский Д. В.

CALCULATION OF FORECASTING THE RAPIDITY OF EXHAUSTING THE RESOURCES OF PRODUCT PARTS APPLIED TO THE REMAINING OF INTERREPAIR AND ASSIGNED RESOURCES OF THEIR SETTING OBJECTS

Lyubchenko D. I., Chebotarev D. G., Zinkovskiy D. V.

Аннотация. Представлен анализ существующей методики прогнозирования вероятных повреждений деталей, эксплуатирующийся в нормальных условиях эксплуатации, в которой учитывается скорость накопления дефектов, и производится оценка уровня утраты работоспособности изделий. Новизна представленной работы состоит в расширении указанной методики (приведении в соответствие) под особенности заводского стационарного капитального ремонта изделий. Такая доработанная методика позволяет прогнозировать уровень послеремонтной надежности изделий, эксплуатирующихся в нормальных и тяжелых условиях эксплуатации, и в ходе ремонта применять ряд мер для максимально полной выработки ресурсов в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: двигатель, дефект, наработка, отказ, прогнозирование, ремонт, ресурс.

Abstract. The article presents an analysis of the existing methodology for predicting probable damage to parts operated under normal operating conditions, which takes into account the rate of accumulation of defects and assesses the level of loss of product operability. The novelty of the presented work consists in expanding the specified methodology (bringing it into compliance) with the specifics of factory stationary overhaul of products. Such an improved methodology allows predicting the level of post-overhaul reliability of products operated under normal and severe operating conditions, and during overhaul, applying a number of measures to maximize the full development of resources in such operating conditions.

Key words: engine, defect, operating time, failure, forecasting, overhaul, resource.

Введение. В работе приведены результаты анализа методики прогнозирования по [1] ресурса деталей авиационной техники, ее доработки и распространения на заводской серийный капитальный ремонт деталей, узлов, агрегатов, модулей и изделий различного назначения, в том числе сложных технических систем.

Непосредственно в процессе проведения капитального ремонта расчеты по прогнозированию ресурса или остатка деталей, узлов, агрегатов в Руководствах по ремонту изделий не предусматриваются. В ремонте применяется стандартный метод постановки на ремонтируемое изделие деталей, узлов, агрегатов и модулей с таким запасом

(остатком) ресурса, который заранее обеспечивает объекту постановки при нормальной его эксплуатации полную выработку межремонтного и/или назначенного ресурсов без досрочных съёмов с эксплуатации из-за отказа какой-либо из систем или отдельных компонентов изделия.

В общем понимании ресурсные характеристики изделия – это наработка (в моточасах, в циклах запуска-останова) или срок службы (в месяцах, годах) до капитального ремонта или до его списания. Цифровые показатели ресурсов рассчитываются на этапе разработки ГТД и в дальнейшем могут изменяться в порядке, установленном государственной нормативно-технической документацией. Данное исследование распространяется на наработку в интервалах времени, например, в моточасах.

В отношении авиационной техники наработка по [2] – это продолжительность или объем работы изделия авиационной техники – его суммарная наработка от контрольного начала эксплуатации до момента контроля технического состояния этого изделия. Применительно к заводскому ремонту момент контроля технического состояния изделия или его компонентов определяется в процессе дефектации полностью разобранного ремонтируемого изделия.

Техническое состояние изделия авиационной техники – совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств изделия авиационной техники, характеризующая в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на этот объект. В ремонте под определенным моментом времени также следует понимать дефектацию – момент контроля технического состояния изделия или его компонентов, техническое состояние которых сверяется с соответствующими требованиями ремонтной документации.

Одними из основных составляющих, определяющих техническое состояние изделия, являются дефект и отказ.

Дефект – любое повреждение или разрегулирование изделия (агрегата, технической системы) или отдельного ее механизма, которые не производят потери их работоспособности, изделие продолжает работать, однако одно или несколько его параметров не соответствуют требованиям эксплуатационной документации.

Отказ – потеря способности изделия выполнить требуемую функцию. Отказ приводит к досрочному съему изделия с эксплуатации, невыработке установленных ресурсов, а значит, к повышенным затратам эксплуатантов на увеличение количества ремонтов своих изделий и роста финансовых издержек из-за простоя техники.

Возможность полной выработки установленных межремонтных и назначенных ресурсов определяются величинами и количеством дефектов, а также наличием отказов изделий или их компонентов, в том числе в авиационной технике.

Назначенный ресурс изделия авиационной техники – суммарная наработка изделия авиационной техники, при достижении которой эксплуатация изделия должна быть прекращена независимо от его технического состояния. Выработка назначенного ресурса приводит к списанию и утилизации техники, если не предусматривается дальнейшее использование такой техники не по прямому назначению.

Межремонтный ресурс изделия авиационной техники – установленная в нормативно-технической документации наработка изделия авиационной техники между смежными ремонтами, при достижении которой эксплуатация изделия должна быть прекращена независимо от его технического состояния. Количество проведенных межремонтных ресурсов до полной выработки назначенного ресурса не регламентируется.

Цель статьи. В методике прогнозирования ресурса по [1], более ориентированной на эксплуатацию техники с учетом контроля технического состояния ее компонентов в заданный момент времени, отсутствует возможность ее применения в процессе

заводского стационарного капитального ремонта техники, однако потенциал данной методики с определенными доработками, указанными в данной статье, позволяет ее применять в ремонтном производстве, где ведение статистики дефектов и отказов с привязкой к наработке изделий и их компонентов является наиболее информативным с точки зрения финансово-экономической эффективности проводимого ремонта и обеспечения послеремонтной надежности.

Материалы исследования. В отличие от статистики забраковки на ремонтном предприятии, Карточки учета неисправностей КУН, оформляемые эксплуатантами в адрес разработчиков и изготовителей изделий, не позволяют вести необходимую статистику и делать по ним прогнозы вероятности выработки изделиями своих ресурсов при длительных повышенных нагрузках. Поэтому прогнозирование быстроты исчерпания ресурсов, распространенное на ремонтное производство, наиболее востребовано для эксплуатантов, несущих основные расходы по эксплуатации и поддержанию требуемой годности своих изделий (летной годности для авиационной техники).

Ведя статистику дефектов на всех деталях с привязкой к их наработкам, в распоряжении ремонтного предприятия оказывается вся необходимая информационная база для применения методик прогнозирования наступления критичных дефектов и появления отказов. Обработка такой базы согласно приведенной ниже доработанной методике, основа которой изложена в [1], позволяет ремонтному предприятию:

- подавать в адрес заводов-разработчиков и заводов-изготовителей свои предложения по совершенствованию технологий изготовления и ремонта изделий, а также по повышению их ресурсов;

- прогнозировать быстроту износа и досрочного съема деталей и самих изделий в различных нагруженных условиях эксплуатации изделий, ведущих, как следствие,

к неполной выработке своих межремонтных ресурсов и досрочному съему с отправкой в заводской ремонт.

Скорость накопления повреждений, ведущих к появлению дефектов и отказов, зависит от цикличности и амплитуды эксплуатационных нагрузок, механических свойств материала деталей, температуры, агрессивности среды и пр. – т.е. не только от человеческого фактора, но и независимых от него климатических условий региона. Поэтому прогнозирование возможности или недопустимости дальнейшей эксплуатации изделия оказывается возможным на основе оценки всех рисков развития дефектного состояния детали, узла, агрегата, модуля до физического наступления отказа.

Базовым принципом методики прогнозирования ресурса деталей является функция скорости накопления повреждений:

$$f(\delta) = \frac{d\delta}{dt}, \quad (1)$$

где δ – износ, накопленное повреждение детали (для механических повреждений указывается размерность износа, т.е. величина изменения геометрического размера, количество трещин и т.п.;

t – наработка детали (если наработка индивидуальная, она наносится на ее поверхность, если по основному изделию – указывается в пономерной эксплуатационной документации изделия, например, в основном, в часах).

Преобразование формулы (1) в упрощенном виде дает следующее выражение:

$$f(\delta) = \frac{d\delta}{dt} = C + K\delta + K_1\delta^2 + K_2\delta^2 + \dots + K_n\delta^2. \quad (2)$$

Однако оптимальных способов непосредственного измерения скорости накопления повреждений не существует, возможно только:

- произвести замер величины повреждения в конкретный момент наработки, например, во время дефектации на заводе в процессе ремонта изделия;

- либо производить периодические замеры в эксплуатации через равное количество моточасов наработки, что для эксплуатантов в ряде случаев может быть проблематичным.

Опуская ряд преобразований производных от (1, 2) математических формул, далее учитывается текущий размер повреждения δ_l , измеренный на наработке t_l некоторой детали в изделии или группы изделий, эксплуатировавших в одинаковых условиях.

В последующих расчетах прогнозирования применяются две постоянные A и h , определяемые через (3):

$$A = \frac{1}{K \lg e} - \text{коэффициент долговечности,}$$

влияющий только на скорость накопления повреждений, ведущих к дефекту, а потом к отказу;

$$h = \frac{C}{K} - \text{смещение, влияющее на}$$

положение скорости накопления относительно начала координат (рис. 1).

Коэффициент A выражается в единицах времени подобно наработке t , например, в часах, размерность h соответствует размерности δ в единицах дефектов, например, в мм износа или единиц одинаковых дефектов в штуках.

В ходе ряда преобразований верхние и нижние доверительные границы получают вид:

$$\delta = (\bar{\delta}_1 \pm (t_\beta \cdot \sigma_1 + h)) \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h. \quad (4) \text{ и } (5)$$

где σ_1 – среднее квадратическое отклонение повреждения в момент времени t_1 , аналогично для t_2 ;

$\bar{\delta}_1$ – среднее квадратичное повреждение при наработке t_1 , аналогично для t_2 ;

t_β – коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности.

Определение постоянных A и h возможно только с использованием статистических данных по забраковке деталей, узлов, агрегатов, модулей, наиболее качественная база которой ведется только на ремонтном предприятии.

Постоянные A и h вычисляются через анализ статистики дефектации и забраковки и забраковки большого числа деталей и, как минимум, на двух контрольных замерах – на одинаковой для них работе t_1 и при последующей большей, но также одинаковой для всех указанных деталей наработке t_2 :

$$A = \frac{t_2 - t_1}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}, \quad (6)$$

и

$$h = \frac{\bar{\delta}_2 - \bar{\delta}_1 \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1}. \quad (7)$$

Если известно, что некоторая величина повреждения δ_{max} может вызвать отказ (а для ремонтного предприятия это известно – такие величины указываются в Руководствах по ремонту как основание для бракования детали), можно с помощью уравнений (4) и (5) по верхней или по нижней доверительной границе вычислить минимальную наработку t_{min} детали при заданной вероятности отказа, величину которой можно выразить через p .

Для определения (рис. 1) заданной вероятности отказа p преобразование формулы (4) приводит к выражениям:

$$p = 0,5(1 - \beta), \quad (8)$$

и

$$t_{min} = A \cdot \lg \frac{\delta_{min} + h}{\delta_1 + t_\beta \cdot \sigma_1 + h}. \quad (9)$$

По заданной вероятности отказа p производится выбор коэффициента t_β , т.к. отказом является выход повреждения δ_{min} «дефект» к верхней доверительной границе δ_{max} (рис. 1), а доверительная вероятность β учитывает вероятность выхода повреждения за обе доверительные границы в виде как левой пунктирной и правой пунктирной кривых.

В отличие от методики по [1], ограничения по правой пунктирной кривой на рисунке 1 применимы в расчетах только в зоне на длине t_{max} , т.к. за отказом (это центральная сплошная

кривая к пику δ_{max}) дальнейшее прогнозирование событий физически не имеет смысла.

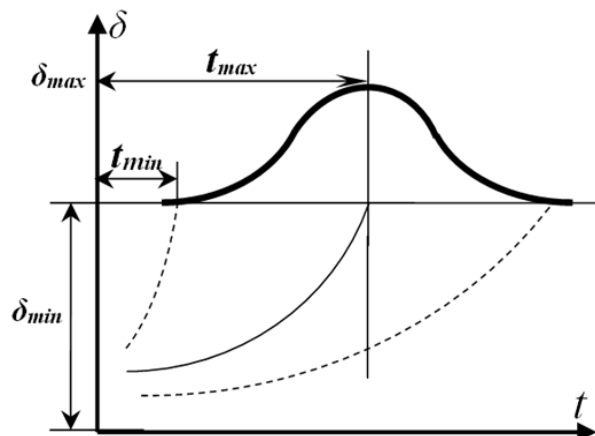


Рис. 1. Поле рассеивания повреждений с перерастанием дефекта в отказ)

Прогнозирование повреждения деталей одной номенклатуры производится по замерам износа множества таких деталей с различных однотипных изделий одного региона (условий) эксплуатации, при этом имеющих одну наработку. В отличие от данного исследования в [1] регион эксплуатации авиатехники не учитывается.

Для примера расчетов выбрана деталь сепаратор (рис. 2) муфты свободного хода МСХ главного вертолетного редуктора ГВР с выработкой (износом) ширины окон под ролики.

Для расчетов использованы:

- 18 различных ГВР, все с наработкой $t_1 \sim 250$ ч;
- 18 различных ГВР, все с наработкой $t_2 \sim 658$ ч.

Распространяя [1] на заводское ремонтное производство, для усовершенствования данной методики прогнозирования следует использовать недостающую в [1] информацию. Ее следует брать из Руководства по ремонту ГВР, согласно которому, пускай:

- приведенные наработки t_1 и t_2 далеки от полной выработки межремонтного ресурса $MPP = 1500$ часов для соответствующего типа ГВР, что должно продемонстрировать нейтральность расчетов;
- руководством по капитальному ремонту ГВР допустимый износ окон устанавливается не более 2,00 мм (рис. 2).

По результатам дефектации некие результаты замеров износа окон в этих 36 сепараторах сведены в табл. 1.

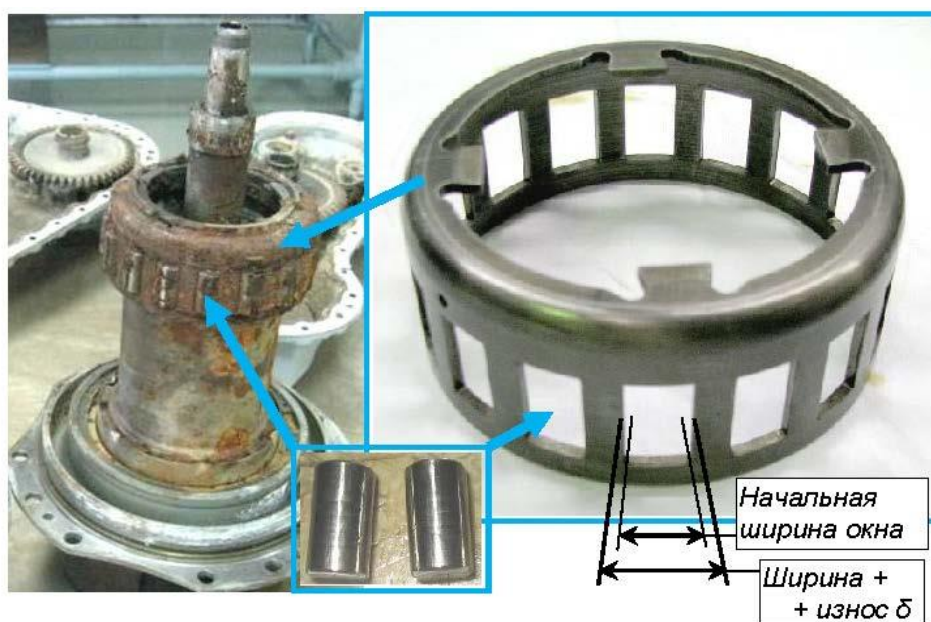


Рис. 2. Узел МСХ в процессе капитального ремонта ГВР: сепаратор и два ролика (комплект состоит из 16 роликов)

Таблица 1

Износ окон сепараторов МСХ ГВР

Износ δ , мм (рис. 2)	При наработке		Износ δ , мм (рис. 2)	При наработке	
	$t_1 \sim 250$ ч	$t_2 \sim 658$ ч		$t_1 \sim 250$ ч	$t_2 \sim 658$ ч
	n сепараторов, шт.			n сепараторов, шт.	
0,4	3	0	0,9	0	5
0,5	7	0	1,0	0	1
0,6	4	1	1,4	0	1
0,7	3	4	1,5	0	1
0,8	1	5	-	-	-

Средний износ $\bar{\delta}$ определяется формулой:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum (\delta \cdot n)}{\sum n} . \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (n \cdot (\delta - \bar{\delta})^2)}{\sum n}} . \quad (11)$$

Как указывалось выше, для каждой из двух наработок в расчетах участвуют по $\Sigma n = 18$ шт. сепараторов. Тогда методика прогнозирования состоит из следующих этапов:

Этап 1

Для наработки $t_1 = 250$ ч по (10):

$$\bar{\delta} = \frac{0,4 \cdot 3 + 0,5 \cdot 7 + 0,6 \cdot 4 + 0,7 \cdot 3 + 0,8 \cdot 1 + 0,9 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1,4 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0}{18} = 0,55 \text{ мм} .$$

Этап 2

Среднее квадратичное отклонение σ по (11):

$$\sigma = \sqrt{\frac{3 \cdot (0,4 - 0,55)^2 + 7 \cdot (0,5 - 0,55)^2 + 4 \cdot (0,6 - 0,55)^2 + \dots + 0 \cdot (1,5 - 0,55)^2}{18}} = 0,11 \text{ мм} .$$

Аналогичны расчеты для наработки $t_2 = 658$ ч.

Полученные значения внесены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные средние значения износов окон

	При наработке	
	$t_1 \sim 250$ ч	$t_2 \sim 658$ ч
Средний износ $\bar{\delta}$, мм	0,55	0,88
Среднее квадратичное отклонение σ , мм	0,11	0,22

Этап 3

Определение постоянных A по (6) и h по (7):

$$A = \frac{t_2 - t_1}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} = \frac{658 - 250}{\lg \frac{0,22}{0,11}} = \frac{408}{\lg 2} = 1355 \text{ ч} .$$

$$h = \frac{\bar{\delta}_2 - \bar{\delta}_1 \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1} = \frac{0,88 - 0,55 \frac{0,22}{0,11}}{\frac{0,22}{0,11} - 1} = \frac{0,88 - 1,10}{1} = -0,22 \text{ мм.}$$

Этап 4

Вычисление среднего уравнения накопления $\bar{\delta}$ через (4) износа (повреждений):

$$\bar{\delta} = (\bar{\delta}_1 + h) \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h = (0,55 - 0,22) \cdot 10^{\frac{t-250}{1355}} - (-0,22) = 0,3 \cdot 10^{\frac{t-250}{1355}} + 0,22; \text{ мм,}$$

где t – фактическая наработка изделия, по которой требуется производить расчеты прогнозирования накопления износа детали и приближения к величине бракования при дефектации такой детали.

Этап 5

Доверительная вероятность β всех возможных случаев износа из практики принимается не ниже 95 % или 0,95. Коэффициент t_β выбирается по формуле (10) расчета заданной вероятности отказа p :

$$p = 0,5(1 - \beta) = 0,5(1 - 0,95) = 0,025.$$

Данный показатель по теории вероятности согласно [3] приводит к значению $t_\beta = 2$. Тогда по (4) или (5) уравнение верхней доверительной границы процесса изнашивания сепаратора преобразуется в следующий вид:

- для $t_1 = 250$ ч:

$$\delta = (\bar{\delta}_1 + t_\beta \cdot \sigma_1 + h) \cdot 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h = (0,55 + 2 \cdot 0,11 - 0,22) \cdot 10^{\frac{t-250}{1355}} + 0,22 = 0,55 \cdot 10^{\frac{t-250}{1355}} + 0,22; \text{ мм.} \quad (12)$$

- для $t_2 = 658$ ч:

$$\delta = (\bar{\delta}_2 + t_\beta \cdot \sigma_2 + h) \cdot 10^{\frac{t-t_2}{A}} - h = (0,88 + 2 \cdot 0,22 - 0,22) \cdot 10^{\frac{t-658}{1355}} + 0,22 = 1,1 \cdot 10^{\frac{t-658}{1355}} + 0,22; \text{ мм.} \quad (13)$$

Расчет по нижней доверительной границе для прогнозирования приближения к критическому состоянию детали, к отказу, здесь не важен.

Результаты и обсуждения. Дальнейший расчет износа для контрольной наработки с прогнозированием полной или неполной выработки ресурса по отказу состоит в следующем.

В связи с тем, что расчеты проведены в диапазоне наработок между t_1 и t_2 , прогнозирование будет оставаться достоверным на протяжении последующего периода, близкого по длительности к периоду

$\Delta t = t_2 - t_1$, т.е. до выбранной наработки $658 + (658 - 250) = 1066$ ч (при МРР = 1500 ч). С учетом прогноза по полной выработке МРР целесообразно использовать заводскую статистику забраковки, а t_2 принимать как МРР = 1500 ч. Такой подход, не представленный в [1], позволяет прогнозировать послеремонтную надежность изделия в заданных условиях эксплуатации.

Согласно исходным данным в текущей задаче, состоящим в преобразовании [1] к потребностям обеспечения послеремонтной надежности изделий, пускай требуется

спрогнозировать износ окон сепаратора на некоей промежуточной наработке 1000 часов.

Используя выражение (12), прогноз износа сепараторов составит:

$$\delta = 0,55 \cdot 10^{\frac{1000-250}{1355}} + 0,22 = 0,55 \cdot 10^{0,5535} + 0,22 = 2,19 \text{ мм.}$$

Расчет по (13) опущен, он дает аналогичную величину ожидаемого износа.

Примечание. С целью дальнейшего развития указанных исследований, не входящих в рамки данной статьи, использование набора выше полученных расчетных значений по нескольким наработкам детали в диапазоне Δt позволяет нанести фиксированные результаты на график схемы рис. 1 с визуализацией тенденции изменения ее ресурсных показателей.

Окончание расчета по усовершенствованной методике с прогнозированием способности детали выработать полный межремонтный ресурс, тем самым обеспечив послеремонтную надежность изделия, сводится к следующему.

На наработке сепаратора в 1000 часов полученный прогнозный износ окон составляет 2,19 мм. Как указывалось в условии задачи, межремонтный ресурс сепаратора $MPP = 1500$ часов, по Руководству по ремонту допустимый износ окон составляет до 2,00 мм.

Выводы по заданному условию расчетов.

1) В представленных к расчетам условиях эксплуатации в муфте свободного хода сепаратор не способен обеспечивать полную выработку $MPP = 1500$ часов, т.к. на наработке в 1000 часов износ окон сепаратора уже прогнозно составит 2,19 мм при максимально допустимом износе до 2,00 мм при наработке 1500 часов. Как следствие, прогнозно ожидается отказ узла МСХ в ГВР на наработке главного вертолетного редуктора в диапазоне от 900 часов до 1000 часов.

2) С учетом использования статистики ремонтного производства целесообразно использовать статистику дефектов по одинаковым условиям эксплуатации для группы изделий, например, в песчаном жарком

климате Африки, в среднеевропейском климате: одна величина наработки t_1 для Африки и та же t_1 для европейского континентального климата. Аналогично и для t_2 .

3) В условиях ремонтного предприятия такие наработки, статистические дефекты и отказы могут использоваться как в целях обеспечения ремонтного производства комплектующими 2-й и 4-й категории с достаточным остатком ресурса, так и по запросам заинтересованных в подобных исследованиях организаций.

Распространение методики [1], доработанной к особенностям заводского ремонтного производства, позволяет прогнозировать быстроту истощения (расходования по наработке) остатков ресурсов изделий и возможности их полной выработки деталями, узлами, агрегатами, модулями газотурбинных двигателей, главных вертолетных редукторов авиационной техники, а также компонентов иных изделий в других отраслях промышленности в тех или иных тяжелых условиях эксплуатации. Доработанная методика позволяет определять, возможно ли устанавливать на ремонтируемое изделие ту или иную деталь первой, второй или четвертой категории, с полным и неполным остатком межремонтного ресурса.

В различных условиях эксплуатации скорость износа одних и тех же составных частей изделий зачастую неодинаковая. Поэтому по статистической скорости приближения к состоянию брака целесообразно прогнозировать, способен ли тот или иной компонент в заранее известных тех или иных условиях эксплуатации основного изделия обеспечивать ему полную выработку ресурса до очередного ремонта, или согласно статистике брака прогнозируется отказ изделия с досрочным его снятием с эксплуатации и отправкой в заводской ремонт. Такие условия эксплуатации заранее известны по географическому расположению заказчика ремонта и региона эксплуатации его техники.

Список источников

1. Обеспечение надежной работы деталей авиационных двигателей. Зайцев А.М. Изд-во «Транспорт», 1971 г. – С. 1-196.
2. ГОСТ Р 53863-2010 Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения / Введен впервые. Введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10.09.2010 г. № 240-ст. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 23 с.
3. Вентцель В.С. Теория вероятностей / Изд. 4-е стереотипн. М.: Наука, 1969. – 576 с., с ил.

Информация об авторах

Любченко Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания, Институт транспорта и логистики, Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 8741-6601; AuthorID: 1130478
ORCID 0009-0009-1290-9186
E-mail: vottako@rambler.ru

Чеботарев Данил Геннадиевич, студент группы ТЛ-831м кафедры двигателей внутреннего сгорания, Институт транспорта и логистики, Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: danChe8@gmail.ru.

Зиньковский Данил Валерьевич, студент группы ТЛ-831м кафедры двигателей внутреннего сгорания, Институт транспорта и логистики, Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: DVZinko@yandex.ru.

References

1. Ensuring reliable operation of aircraft engine components. Zaytsev A.M. Publishing house «Transport», 1971, p. 1-196.
2. GOST R 53863-2010 Air transport. System of maintenance and repair of aircraft equipment. Terms and definitions / Introduced for the first time. Put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology at 10.09.2010. № 240-st. – Moscow: Standartinform, 2011. – 23 p.
3. Venttsel V.S. Probability Theory / 4th Edition Stereotype M.: Science, 1969. – 576 p., with ill.

Статья поступила в редакцию 12.10.2024

Information about the authors

Lyubchenko Dmitriy Ivanovich, Candidate of technical sciences, Associate professor of the Department of internal combustion engines, Institute of Transport and Logistics Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
SPIN-код: 8741-6601; AuthorID: 1130478
ORCID 0009-0009-1290-9186
E-mail: vottako@rambler.ru,

Chebotarev Danil Gennadievich, student of group TL-831m Department of internal combustion engines, Institute of Transport and Logistics Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: danChe8@gmail.ru.

Zinkovskiy Danil Valerievich, student of group TL-831m Department of internal combustion engines, Institute of Transport and Logistics Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: DVZinko @yandex.ru

Для цитирования:

Любченко Д.И., Чеботарев Д.Г., Зиньковский Д.В. Расчет прогнозирования быстроты истощения ресурсов деталей изделий применительно к остатку межремонтных и назначенных ресурсов объектов их постановки // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 32-40.

For citation:

Lyubchenko D.I., Chebotarev D.G., Zinkovskiy D.V. Calculation of forecasting the rapidity of exhausting the resources of product parts applied to the remaining of interrepair and assigned resources of their setting objects // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1(1). – P. 32-40.

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 681.7.054.43; 621.671

СИНТЕЗ ШПИНДЕЛЯ НА РЕГУЛИРУЕМОЙ КОНИЧЕСКОЙ ГАЗОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЕ ДЛЯ СТАНКА РЕЗКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Брешев В. Е., Рябичев В. Д.

SYNTHESIS OF A SPINDLE WITH AN ADJUSTABLE CONICAL AEROSTATIC BEARING FOR MONOCRYSTAL CUTTING MACHINES

Breshev V.E., Ryabichev V.D.

Аннотация. Представлен структурно-параметрический синтез шпинделя на регулируемой конической газостатической опоре для применения в станках полуавтоматической резки монокристаллов на пластины. Исследуемый шпиндель является одноопорным, так как ротор вращается на одной сдвоенной конической газостатической опоре и регулируемым за счёт предусмотренного изменения величины среднего зазора с газовой смазкой опоры. Регулирование зазора конической газостатической опоры при эксплуатации позволяет сделать регулируемым весь шпиндель по несущей способности, жёсткости, собственным частотам колебаний, расходу технологического воздуха. В процессе синтеза проанализированы варианты конструктивного исполнения одноопорного шпинделя и его конической газостатической опоры с регулируемой величиной среднего зазора, установкой колец лабиринтных уплотнений. Предложена расчётная схема и математическая модель для определения несущей способности, жёсткости и расхода воздушной смазки для обеспечения работоспособности радиально-упорного газостатического подшипника. Выполнен расчёт параметров и сравнительный анализ одноопорной системы с газостатическим подшипником исходной конструкции и его модернизированными вариантами – с кольцевой камерой и лабиринтным уплотнением на выходе газовой смазки при варьировании величины среднего зазора и давления подачи воздушной смазки. Показана эффективность регулирования интегральных характеристик конической газостатической опоры через изменение её среднего зазора.

Ключевые слова: шпиндель, газостатическая опора, одноопорная система, противодействие, несущая способность, жёсткость.

Abstract. This paper presents the structural-parametric synthesis of a spindle supported by an adjustable conical aerostatic bearing, designed for semi-automatic machines used in slicing monocrystals into wafers. The spindle under investigation features a single-bearing configuration, where the rotor is supported by a dual conical aerostatic bearing. Adjustability is achieved by modifying the average clearance of the gas film within the bearing.

By controlling the clearance during operation, it's possible to regulate the spindle's load capacity, stiffness, natural frequencies of vibration, and process air consumption. Various design options for the single-

bearing spindle and its conical aerostatic bearing with adjustable average clearance were analyzed, including the integration of labyrinth sealing rings.

A computational scheme and mathematical model are proposed to determine the bearing capacity, stiffness, and air consumption required to ensure the functionality of the radial-thrust aerostatic bearing. Calculations were performed for the original bearing design and its improved variants—including an annular chamber and a labyrinth seal at the air outlet—under varying conditions of average clearance and air supply pressure.

The study demonstrates the effectiveness of controlling the integral characteristics of the conical aerostatic bearing by varying its average clearance.

Keywords: spindle, aerostatic bearing, single-bearing system, back pressure, load capacity, stiffness.

Введение. Под одноопорной системой шпинделя станка резки монокристаллов будем понимать самодостаточную с точки зрения динамической и статической устойчивости систему с одним газостатическим радиально-упорным подшипником. По своей конструкции он представляет собой сдвоенный конический газостатический подшипник. Предназначение шпинделя состоит в приведении во вращательное движение рабочих органов, таких как алмазный режущий инструмент, для осуществления резки монокристаллов на пластины алмазными кругами с внутренней режущей кромкой (АКВР) [1, 2, 3]. Бесконтактное приведение во вращение ротора шпинделя с инструментом реализуется благодаря тому, что подвижная и неподвижная части привода разделены зазором с воздушной смазкой в газостатической опоре, а силы электромагнитной природы передают на подвижную часть (ротор) крутящий момент через электромагнитное поле по принципу действия синхронного электродвигателя. Одноопорная система на газостатическом подшипнике обладает минимальными потерями на трение, исключает износ рабочих поверхностей, может регулироваться несколькими способами, а также обладает другими преимуществами, но при этом опорной системой шпинделя должен быть обеспечен достаточный уровень несущей способности и жесткости при незначительных расходах технологического воздуха и давлении его подачи 0,4 – 0,63 МПа.

Однако рассматриваемая одноопорная система шпинделя имеет ряд конструктивных

особенностей, которые выводят ее исследование и расчет за рамки существующих методик: малая относительная длина подшипника, наличие наклона опорных поверхностей газостатической опоры относительно оси вращения. Это требует разработки расчетной схемы и математической модели для расчета одноопорных шпинделей на коническом газостатическом подшипнике.

Целью работы является синтез шпинделя на регулируемом коническом газостатическом подшипнике, включающий разработку расчетной схемы и математической модели для расчета характеристик газостатического подшипника, которые позволят исследовать одноопорную систему на предмет выбора рациональных геометрических (конструктивных) параметров, регулируемости, а также модернизации для получения максимальных значений жесткости и грузоподъемности конического газостатического подшипника и всего шпинделя.

Расчет основных параметров одноопорной системы. Примером реализации одноопорной системы является шпиндельный узел станка автоматизированной резки полупроводниковых монокристаллов "Алмаз – 150 ЭШВ" [1, 2]. На рис. 1 показана трёхмерная модель его шпиндельного узла с установленным инструментом – алмазным кругом с внутренней режущей кромкой (АКВР) **6** и разрезаемым монокристаллом **7**, закрепленным на держателе **8** [2, 3]. Одноопорная система представлена газостатическим радиально-упорным

подшипником, устройством для крепления инструмента **3**, магнитной системой ротора **4** для бесконтактной передачи крутящего момента при взаимодействии с вращающимся электромагнитным полем статора **5**. Газостатический подшипник имеет подвижную **1** и неподвижную **2** опорные части. Их конические опорные (или рабочие) поверхности имеют угол наклона α к оси вращения. Угол α определяет соотношение между радиальными и осевыми составляющими реакций газовой смазки. Для систем с преобладанием радиальной нагрузки угол наклона должен быть минимально допустимым, но при этом обеспечивать осевую устойчивость одноопорной системы.

Рассматриваемая система является одноопорной, так как подвижная опорная часть **1** представляет собой единую деталь в форме широкого кольца, на которой выполнены две конические опорные поверхности, а между ними газовая смазка не дренажируется. Подшипник разделён на две равные и симметричные части, которые повернуты на угол α относительно оси, поэтому воспринимают радиальные и осевые нагрузки.

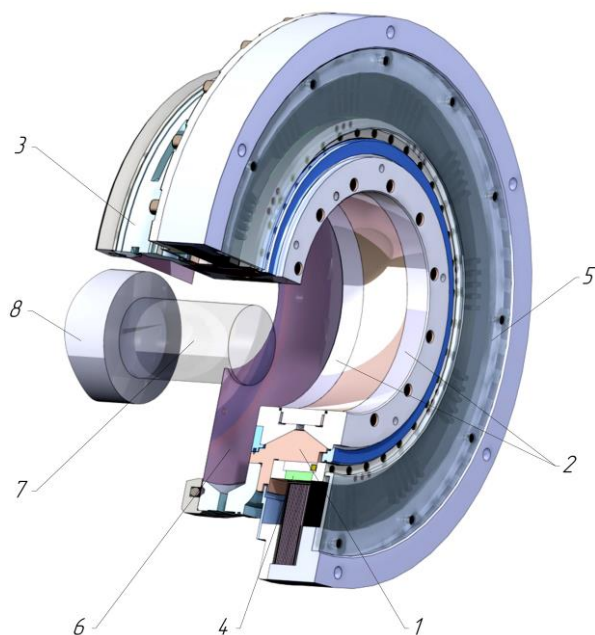


Рис. 1. Трёхмерная модель шпиндельного узла

При работе воздух давлением 0,4-0,63 МПа через впускное отверстие подается в кольцевую

камеру, из которой через ограничители расхода попадает в воздушный зазор, отделяющий подвижную опорную часть **1** от неподвижной части **2**. Распределение давления в газовом зазоре является функцией конструктивных параметров, давлений газа на входе и выходе, а также положения подвижной части относительно неподвижной, которая определяется величиной среднего зазора и эксцентриситетом. Последний возникает при действии внешней нагрузки и приводит к перепаду давления газовой (воздушной) смазки в зазоре, что и создает подъемную силу. Условием работоспособности одноопорной системы является отсутствие механического контакта между рабочими поверхностями конического подшипника [1, 4-7].

Так называемая «левитация» ротора одноопорной системы обеспечивается непрерывной подачей технологического воздуха. При этом стабильность его пространственного положения можно рассматривать как устойчивость движения ротора в динамической системе «ротор-опоры» [8-14]. Несущая способность в радиальном и осевом направлениях определяется системой взаимосвязанных параметров, таких как угол наклона опорных плоскостей α , их радиусы, давление подачи, диаметр и число питателей и др. В центральном (симметричном) положении подвижной опорной части при нулевом эксцентриситете давление газа распределено осесимметрично в любом сечении, перпендикулярном оси вращения, поэтому его равнодействующая равна нулю. Если под действием внешней нагрузки W_e подвижная опорная часть смещается относительно подшипника на величину эксцентриситета e , то сечение кольцевого зазора становится переменным, что сопровождается изменением давления по зазору. В зоне минимального зазора давление максимально, и наоборот, в зоне максимального – минимально [1, 15-18].

Рабочая частота вращения определяется требованиями технологического процесса, который реализует данная машина. Например, для станка резки монокристаллов она

составляет 1000-1500 об/мин, в насосах и компрессорах – 1000...10000 об/мин, в шлифовальных пневмошпинделях – 20000...200000 об/мин [1, 4, 6]. Частота вращения рассматриваемой одноопорной системы может изменяться от 0 об/мин (когда опора работает как аэростатический подвес) до критической частоты вращения $n_{кр}$, при которой поток газовой смазки становится турбулентным (в зависимости от величины среднего зазора и диаметра подшипниковой шейки $n_{кр}$ изменяется от 6500 до 70000 об/мин).

Расчёт одноопорной системы заключается в определении таких параметров: предельной частоты вращения, собственных частот и критических частот вращения, потребляемой мощности и мощности потерь, времени разгона и торможения, механического коэффициента полезного действия, предельных осевых, радиальных и угловых нагрузок (несущих способностей), жесткости в соответствующих направлениях и расхода воздушной смазки на газовую опору. Последние три параметра определяются расчетом конического газостатического подшипника одноопорной системы.

Существующие методики расчета газостатических опор [4-7, 15-18] не рассматривают аэростатические опоры с малым – менее 0.5 – отношением длины подшипника к его диаметру (параметр λ) и коническими опорными поверхностями с углом α более 20° .

Из перечисленных методик расчета газостатических подшипников наиболее удобной для исследования одноопорной системы является методика, предложенная в [17, 18]. В ней рассматриваются газостатические опоры, не имеющие конусности, поэтому для одноопорной системы принимаем допущения и рассматриваем расчетную модель, в которой все параметры радиально-упорного подшипника соотнесены с параметрами радиального газостатического подшипника.

Приведенная на рис. 2 расчетная схема включает в себя такие изменения:

- опорные поверхности подшипника, угол наклона которых относительно оси вращения составлял α , развернуты в горизонтальное положение, при котором $\alpha = 0$. Поворот выполнен вокруг точки, находящейся на среднем радиусе $R = (R_{\min} - R_{\max}) / 2$;

- общая длина аэростатического подшипника L складывается из двух длин конусных частей и промежутка между ними, который является камерой и находится под давлением, что позволяет их соединить в единую опорную поверхность;

- для более полного соответствия с методикой расчета [17, 18] убраны кольца лабиринтных уплотнений (рис. 2, а).

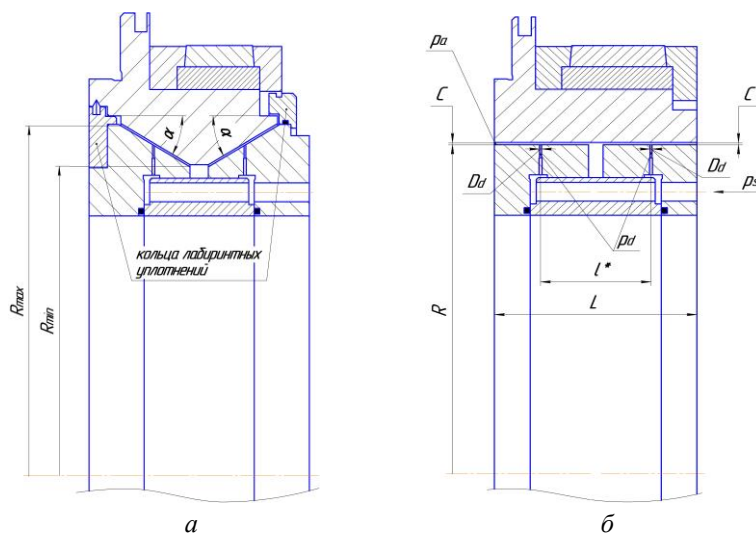


Рис. 2. Конструкция (а) и расчетная схема (б) одноопорной системы шпинделя

Подшипник в соответствии с расчетной моделью имеет радиус $R = 175$ мм, длину $L = 97$ мм и средний зазор $C = 10...30$ мкм. Поступление воздуха в зазор осуществляется через два ряда ограничителей расхода с диаметром $D_d = 0,5$ мм, количеством $N = 22$ в одном ряду наддува, расстояние между рядами (линиями) $l^* = 40$ мм. Воздух, проходящий через каждый ограничитель, дважды дросселируется – в самом ограничителе расхода и в рабочем зазоре.

Расчет аэродинамических сил, вызываемых смещением подвижной опорной части, сводится к определению вырожденной матрицы жесткости, которая при отсутствии вращения состоит всего лишь из двух элементов \bar{K}_ε и \bar{K}_γ , называемых соответственно коэффициентами радиальной и угловой жесткости. Эти коэффициенты характеризуют несущую способность и жесткость радиального газостатического подшипника. Для их вычисления необходимо определить безразмерный параметр режима \bar{m} , характеризующий отношение перепадов давления вдоль смазочного слоя ($p_d - p_a$) и на ограничителе расхода ($p_s - p_d$). Он зависит от особенностей конструкции опоры и свойств подаваемой газовой смазки [1, 17, 18]:

$$\bar{m} = \frac{12\mu a l \left(\frac{2}{k+1}\right)^{2(k-1)} N n_d D_d}{C^2 p_s}, \quad (1)$$

где C – величина среднего зазора при нулевом эксцентриситете;

k – показатель адиабаты, который для двухатомных газов и воздуха равен 1.4.

Относительное противодавление \bar{p}_d представляет собой отношение давления на

выходе из питателя (p_d) к давлению подачи (p_s). \bar{p}_d определяется через функцию истечения:

$$\bar{p}_d = \sqrt{\frac{\left(\frac{p_a}{p_s}\right)^2 + \bar{m}\zeta}{1 + \bar{m}\zeta}}, \quad (2)$$

где ζ – функция, зависящая от геометрических параметров опоры (λ и относительной раздвижки линий наддува – $b = l^*/L$):

$$\zeta = \frac{\lambda(1-b)}{2}. \quad (3)$$

Скорость истечения воздуха через питатели определяется перепадом давления на ограничителе \bar{p}_d .

$$\bar{p}_d = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (4)$$

С его ростом скорость истечения воздуха достигает критической величины – скорости звука. Если $\bar{p}_d \leq 0.528$, то скорость потока превосходит скорость звука, при этом могут возникать скачки уплотнения, для которых характерны поглощение энергии и локальные падения давления. По этой причине режимы течения газа через питатели должны быть докритическими, что гарантирует устойчивую работу конической газостатической опоры. Обычно в газостатических опорах на воздушной смазке $0.528 < \bar{p}_d < 0.9$ [6]. Расчет противодавления по формуле (2) для рассматриваемой опоры при условии, что $p_a = 1$ атм, требует уменьшения давления наддува.

Для расчета коэффициентов жесткости используем унифицированные формулы:

$$\bar{K}_r^\varepsilon = \frac{C}{4\lambda R^2 p_s} K_r^\varepsilon = \frac{2}{3} \cdot \frac{0.75\pi\nu}{ch\lambda + 0.5mU_r \cdot chb\lambda \cdot sh(1-b)\lambda} \times \left(\frac{shb\lambda \cdot sh(1-b)\lambda}{\lambda \bar{p}_d} + I_0 \frac{chb\lambda}{\sqrt{\nu}\lambda} \right), \quad (5)$$

$$\overline{K}^\gamma = \frac{C}{4\lambda^2 R^4 p_s} K^\gamma = \frac{0.75\pi}{\lambda} \times$$

$$\times \left(\frac{2}{3} \left[(2+b) \overline{p_d} - 3 \overline{p_a} + \frac{2(1-b)\overline{p_a}^2}{\overline{p_d} + \overline{p_a}} \right] + \frac{\left(\overline{p_d} - \overline{p_a} \right) \eta}{\lambda^2 (1-b)} \left(b \cdot chb\lambda - \frac{shb\lambda}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{\overline{p_d} - \overline{p_a}}{1-b}} \cdot \left[I_1 - \left(th \frac{(1-b)\lambda}{2} + \eta \frac{shb\lambda}{sh(1-b)\lambda} \right) I_2 \right] \right), \quad (6)$$

где U_r – аппроксимированная функция истечения через формулу Прандтля, имеющая вид: $U_r = 0.5 \overline{p_d}$;

$$\eta = \frac{ib\lambda \overline{shb\lambda} + chb\lambda - 1}{sh\lambda + 0.5mU_r \overline{shb\lambda} \overline{shb\lambda}} - \text{комплексный}$$

коэффициент;

I_0, I_1, I_2 – серия однотипных интегралов, решение которых приведено ниже:

$$I_0 = \int_b^1 \frac{sh\lambda(1-x)}{\sqrt{\beta-x}} dx,$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \int_b^1 \frac{x}{\sqrt{\beta-x}} \begin{bmatrix} ch\lambda(1-x) \\ sh\lambda(1-x) \end{bmatrix} dx.$$

Для расчета грузоподъемности одноопорной системы в рамках линейной постановки задачи используем соотношение [1, 17, 18]:

$$W_e = \lambda A_\Sigma \cdot p_s \cdot \overline{W}_e = \lambda A_\Sigma p_s \overline{K_r} \varepsilon_r, \quad (7)$$

где $A_\Sigma = 4R^2$ – глобальный масштаб площади;

$$\varepsilon_r = \frac{i}{N} - \text{относительный эксцентриситет,}$$

максимальное значение которого соответствует предельной грузоподъёмности опоры и может достигать максимального значения 0,8.

В одноопорной системе используется радиально-упорный подшипник с коническими опорными поверхностями под углом α к оси вращения, поэтому результирующее действие газовой смазки направлено под таким же углом к радиальному направлению. Тогда несущая

способность радиально-упорного подшипника $W_{еку}$ определяется радиальными составляющими (вдоль оси OY) от реакций газовой смазки:

$$W_{екó} = W_e \cdot \cos \alpha. \quad (8)$$

Предельный (максимальный расчётный при $\overline{p_a} \rightarrow 0$) объемный расход газа Q через опору, приведенный к нормальным условиям:

$$Q = \frac{\pi N^3 p_s^2}{12 \mu p_a} \cdot m \cdot 3600. \quad (9)$$

Так как $\overline{p_d} = f(\overline{p_a}^2)$, следовательно достижение нужного интервала значений противодавления и уход от критического режима течения газа через питатели можно получить не только уменьшением давления подачи p_s , а и увеличением давления на выходе из зазора p_a . Последнее позволит поднять давление наддува и значительно увеличить грузоподъемность или уменьшить расход воздуха при неизменной несущей способности. Таким образом можно улучшить характеристики одноопорной системы с $\lambda < 0.5$. Технически это реализуется тем, что воздух из зазора поступает не в атмосферу, а кольцевую камеру, где выравнивается давление по всей окружности и не снижается до атмосферного благодаря лабиринтным уплотнениям (рис. 2, а).

Результаты выполненных расчетов основных параметров одноопорной системы при варьировании зазора и обеспечении докритического режима приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры одноопорной системы при изменении среднего зазора

Средний зазор с воздушной смазкой C , м	Давление наддува p_s , МПа	Несущая способность одноопорной системы		Предельная угловая нагрузка M_γ , Н·м	Расход воздуха Q , м ³ /ч
		в радиальном направлении $W_{екy}$, Н	в осевом направлении $W_{екz}$, Н		
10×10^{-6}	0.69	8192	2364	26716	2.4
15×10^{-6}	0.38	2524	728	6470	2.0
20×10^{-6}	0.29	1131	327	2468	2.1
25×10^{-6}	0.25	600	173	1177	2.2
30×10^{-6}	0.22	335	97	611	2.3

Приведенные результаты расчётов показывают, насколько велико влияние величины среднего зазора C с воздушной смазкой на несущую способность газостатического подшипника, а значит, и на зависимые параметры – жёсткость и собственные частоты колебаний опоры. При изменении величины среднего зазора в 3 раза и таком же изменении давления подачи воздушной смазки радиальная и осевая несущие способности (грузоподъёмности) газостатической опоры шпинделя изменяются более чем в 24 раза.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности и эффективности регулирования выходных параметров и характеристик газостатического подшипника и всего одноопорного шпинделя через изменение величины C – среднего зазора с воздушной смазкой. Вторым важным моментом является тот факт, что именно конические опорные поверхности допускают их относительное и равномерное сближение или удаление. На этом основании коническая одноопорная система может эффективно регулироваться в процессе эксплуатации изменением величины среднего зазора в газостатическом подшипнике. Радиальные, сферические и другие газостатические подшипники данным свойством не обладают [1, 17, 18]. Рассматриваемая одноопорная система, конструкция которой была показана на рис. 1, допускает регулирование среднего зазора с воздушной смазкой сближением конических опорных поверхностей подшипника через

замену проставочного кольца между неподвижными коническими опорными поверхностями газостатического подшипника. Возможно использование и других технических решений (например, винтовых пар или дифференциальных винтовых механизмов) для сближения или удаления конических опорных поверхностей.

На рис. 3 показана зависимость противодействия \bar{p}_d от давления на выходе из зазора p_a .

$$\bar{p}_d = \sqrt{\frac{\left(\frac{p_a}{p_s}\right)^2 + \bar{m}\zeta}{1 + \bar{m}\zeta}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{p_a}{p_s}\right)^2 + \bar{m} \cdot \frac{\lambda(1-b)}{2}}{1 + \bar{m} \cdot \frac{\lambda(1-b)}{2}}}.$$

Расчёты выполнены для трех подшипников с различным относительным удлинением λ .

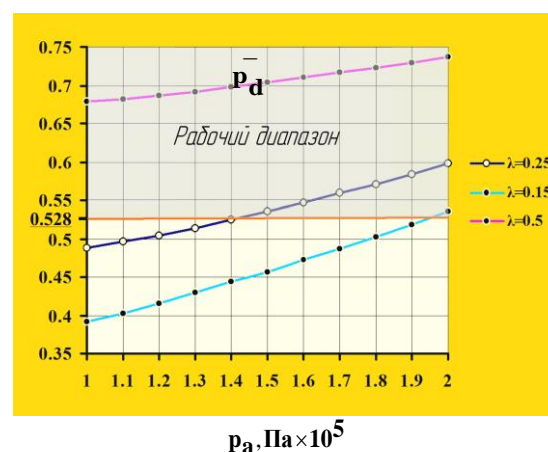


Рис. 3. Зависимости противодействия \bar{p}_d от p_a для опор различной длины

Таким образом, с уменьшением длины подшипника, что характерно для рассматриваемого шпинделя, рабочий докритический режим функционирования газостатического подшипника может быть обеспечен за счёт увеличения давления смазки на выходе из зазора с помощью лабиринтных

уплотнений. С учетом вышеизложенного был выполнен расчет одноопорной системы с варьированием давления на выходе из конического газостатического подшипника.

Результаты расчета одноопорной системы при варьировании давления на выходе из опоры и величины среднего зазора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры одноопорной системы

Средний зазор с воздушной смазкой C , м	Отношение давления на выходе к давлению на входе p_a/p_s , МПа	Несущая способность одноопорной системы		Предельная угловая нагрузка M_γ , Н·м	Расход воздуха Q , м ³ /ч
		в радиальном направлении $W_{еку}$, Н	в осевом направлении $W_{екз}$, Н		
10×10^{-6}	0.1/0.45	5524	1595	17616	1.6
	0.1/0.55	6694	1932	21422	1.9
	0.1/0.63	7568	2185	24236	2.2
15×10^{-6}	0.143/0.45	2599	750	6007	1.7
	0.2/0.55	2681	774	5672	1.5
	0.24/0.63	2768	800	5613	1.4
20×10^{-6}	0.19/0.45	1180	340	2225	1.7
	0.245/0.55	1196	345	2158	1.6
	0.28/0.63	1248	360	2111	1.6
25×10^{-6}	0.21/0.45	621	179	1075	1.9
	0.262/0.55	634	183	1069	1.9
	0.304/0.63	640	185	1064	1.8
30×10^{-6}	0.22/0.45	365	105	605	2.2
	0.271/0.55	373	108	608	2.1
	0.313/0.63	376	109	606	2.1

Анализируя данные табл. 2, видим, что установка дополнительного сопротивления в виде лабиринтного уплотнения на выходе газовой смазки из зазора приводит не только к обеспечению докритического режима работы опоры, но и улучшению ее технических характеристик, расширению возможностей регулирования одноопорной системы шпинделя. Например, при среднем зазоре $C = 15$ мкм при отсутствии регулирования давления на выходе грузоподъемность одноопорной системы может достигать 2524 Н при расходе воздуха 2 м³/ч (табл.1), а при регулировании давления на выходе грузоподъемность может достигать величины 2724 Н, при расходе воздуха 1.3 м³/ч.

Выводы. Выполнен синтез шпинделя на регулируемом коническом газостатическом

подшипнике, включающий разработку расчетной схемы и математической модели для расчёта характеристик газостатического подшипника, которые позволят исследовать одноопорную систему на предмет выбора рациональных геометрических (конструктивных) параметров, регулируемости, а также модернизации для получения максимальных значений жесткости и грузоподъемности конического газостатического подшипника и всего шпинделя.

Одноопорная механическая система шпинделя станка резки монокристаллов имеет двухсторонний радиально-упорный газостатический подшипник с коническими опорными поверхностями. Его конструкция обеспечивает достаточные величины несущей

способности, жёсткости и частоты вращения, а также может быть регулируемой для подстройки и эффективного применения в станках резки. Конический газостатический подшипник через изменение величины среднего зазора с воздушной смазкой обеспечивает регулирование в широком диапазоне несущей способности, жёсткости, собственных частот колебаний и расхода воздушной смазки шпинделя.

При этом данная конструкция шпинделя характеризуется минимальными потерями на трение, высоким уровнем виброустойчивости, широким диапазоном скоростных режимов, имеет высокий технический ресурс и надёжность. Предложенная в работе методика расчёта основана на преобразовании расчётной схемы газостатического подшипника от конической к типовой, что позволяет исследовать параметры конических газостатических подшипников с любым углом наклона рабочих поверхностей. Модернизация системы, которая заключается в установке лабиринтных уплотнений на выходе газовой смазки, позволяет поднять несущую способность опоры на 10 % при одновременном снижении на 30 % расхода воздушной смазки.

Список источников

1. Брешев В.Е. Приводы машин с кольцевыми рабочими органами без механических опор: монография / В.Е. Брешев, С.В. Шевченко. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 186 с.
2. Брешев В.Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография / В. Е. Брешев. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 208 с.
3. Бочкин О.И. Механическая обработка полупроводниковых материалов / О.И. Бочкин, В.А. Брук, С.Н. Никифорова-Денисова. – М.: Высшая школа, 1983. – 112 с. – (Профтехобразование. Полупроводники).
4. Подшипники с газовой смазкой / Под ред. Н.С. Грессема, Дж. У. Пауэлла; пер с англ. П.П. Мостовенко и др. – М.: Мир, 1963. – 423 с.
5. Пешти Ю.В. Газовая смазка. – М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 1993. – 381 с.
6. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А.Шейнберг, В.П. Жедь, М.Д. Шишеев и др.; Под ред. С.А. Шейнберга. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
7. Константиnescу В.И. Газовая смазка / В.И. Константиnescу; пер. с рум. Г.П. Махо; Под ред. М.В. Коровчинского. – М.: Машиностроение, 1968. – 709 с.
8. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 472 с.
9. Алфутов Н.А. Устойчивость движения и равновесия: [учеб. для студентов высш. учеб. зав.]. / Н.А. Алфутов, К.С. Колесников; под ред. К.С.Колесникова. – [2-е изд.] – М.: МГТУ, 2003. – (Серия "Механика в техническом университете" в 8 т.). Т.3 – 2003. – 256 с.
10. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. – [4-е изд.]. – СПб.: Лань, 2003. – 304 с.
11. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики: [учеб. для студентов высш. учеб. зав.]: в 2 т. / Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.– [2-е изд.] – СПб.: Лань, 2002. – 736 с.
12. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения / Малкин И.Г. – [2-е изд.]. – М.: Наука, 1966. – 530 с.
13. Никифоров А.Н. Проблемы колебаний и динамической устойчивости быстровращающихся роторов [Электронный ресурс]: Национальная технологическая группа / Никифоров А.Н. // Вестник научно-технического развития – 2010. – №3(31). – URL: <http://www.vntr.ru>
14. Кельзон А.С. Динамика роторов в упругих опорах / А.С. Кельзон, Ю.П.Циманский, В.И. Яковлев. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
15. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012 – 334 p.
16. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. – Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. – 595 p.
17. Пинегин С.В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / Пинегин С.В., Табачников Ю.Б., Сипенков И.Е. – М.: Наука, 1982. – 265 с.

18. Пинегин С.В. Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой: Справочник / С.В. Пинегин, А.В. Орлов, Ю.Б. Табачников. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с. – (Основы проектирования машин).

References

1. Breshev, V. E. Drives of machines with ring working bodies without mechanical supports: monograph / V. E. Breshev, S. V. Shevchenko - Lugansk: Publishing house of LNU named after V. Dahl, 2017. - 186 p.
2. Breshev, V. E. Development of the theory and methods of designing contactless drives with combined and passive stability: monograph / V. E. Breshev. - Lugansk: Publishing house of LSU named after V. Dahl, 2016. - 208 p.
3. Bochkin, O. I. Mechanical processing of semiconductor materials / O. I. Bochkin, V. A. Bruk, S. N. Nikiforova-Denisova. - M.: Higher School, 1983. - 112 p., - (Vocational education. Semiconductors).
4. Gas-lubricated bearings / edited by N.S. Grassem, J.W. Powell; translated from English by P.P. Mostovenko et al. - Moscow: Mir, 1963. - 423 p.
5. Peshti Yu.V. Gas lubrication. - Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 1993. - 381 p.
6. Gas-lubricated sliding bearings / [Sheinberg S.A., Zhed' V.P., Shishev M.D. et al.]; edited by S.A. Sheinberg. - [2nd ed.]. - Moscow: Mashinostroenie, 1979. - 335 p.
7. Constantinescu V.I. Gas lubrication / Constantinescu V.I.; translated from Romanian by G.P. Makho; edited by M. V. Korovchinsky. - Moscow: Mashinostroenie, 1968. - 709 p.
8. Lyapunov A. M. General Problem of Stability of Motion. - Moscow-Leningrad: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1950. - 472 p.
9. Alfutov N. A. Stability of Motion and Equilibrium: [textbook for students of higher educational institutions]. / N. A. Alfutov, K. S. Kolesnikov; edited by K. S. Kolesnikov. - [2nd ed.] - Moscow: Moscow State Technical University, 2003. - (Series "Mechanics at the Technical University" in 8 volumes). Vol. 3 - 2003. - 256 p.
10. Merkin D. R. Introduction to the Theory of Stability of Motion. - [4th ed.]. - SPb.: Lan, 2003. - 304 p.
11. Butenin N.V. Course of theoretical mechanics: [textbook for students of higher educational institutions]: in 2 volumes / Butenin N.V., Lunts Ya.L., Merkin D.R. - [2nd ed.] - SPb.: Lan, 2002. - 736 p.
12. Malkin I.G. Theory of stability of motion / Malkin I.G. - [2nd ed.]. - Moscow: Nauka, 1966. - 530 p.
13. Nikiforov A.N. Problems of oscillations and dynamic stability of high-speed rotors [Electronic resource]: National technology group / Nikiforov A.N. // Bulletin of scientific and technical development - 2010. - No. 3 (31). - URL: <http://www.vntr.ru>
14. Kelzon A.S. Dynamics of rotors in elastic supports / A.S. Kelzon, Yu.P. Tsimansky, V.I. Yakovlev. - M.: Nauka, 1982. - 280 p.
15. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. - Oxford, 2012 - 334 p.
16. Wiley, J. Air Bearings. Theory, Design and Applications / J. Wiley. - Farid Al-Bender KU Leuven, Department of Mechanical Engineering Leuven Belgium, 2021. - 595 p.
17. Pinegin S.V. Static and dynamic characteristics of gasostatic supports / Pinegin S.V., Tabachnikov Yu.B., Sipenkov I.E. - M.: Nauka, 1982. - 265 p.
18. Pinegin S.V. Precision rolling bearings and bearings with gas lubrication: Handbook / S.V. Pinegin, A.V. Orlov, Yu.B. Tabachnikov. - M.: Mashinostroenie, 1984. - 216 p. - (Fundamentals of machine design).

Статья поступила в редакцию 22.11.2024

Информация об авторах

Брешев Владимир Евгеньевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Станки, инструменты и инженерная графика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Автор ID: 1248354, SPIN-code: 1923-7663.

E-mail: veb_lug@mail.ru

Рябичев Виктор Дронович, д.т.н., профессор, ректор Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 5471-6304, AuthorID: 1048809

E-mail: dahl.univer@yandex.ru

Information about the authors

Breshev Vladimir Evgen'evich, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Professor of the Department «Machines, Tools and Engineering Graphics» of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Author ID: 1248354, SPIN-code: 1923-7663.

E-mail: veb_lug@mail.ru

Ryabichev Viktor Dronovich, doctor of technical sciences, prof., of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

SPIN-код: 5471-6304, AuthorID: 1048809

E-mail: dahl.univer@yandex.ru

Для цитирования:

Брешев В. Е., Рябичев В.Д. Синтез шпинделя на регулируемой конической газостатической опоре для станка резки монокристаллов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 41-51.

For citation:

Breshev V. E., Ryabichev V.D. Synthesis of a spindle on an adjustable conical gas-static support for a machine for cutting monocrystals // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1 (1). – P. 41-51.

УДК 539.43

ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД

Солодовник М. Д., Ясуник С. Н., Волков И. В., Кузнецова М. Н.

VIBRATION RESISTANCE OF THE PIPELINE AT TRANSPORTATION OF CONTINUOUS MEDIA

Solodovnik M. D., Yasunik S. N., Volkov I. V., Kuznetsova M. N.

Аннотация. Рассмотрен вопрос виброустойчивости трубопровода. Аналитически определены критические значения параметров, соответствующих вибрационным явлениям. Рассчитаны собственные частоты в зависимости от частоты пульсаций дорезонансного и переходного к резонансу режимов. Рассмотрены антивибрационные устройства.

Ключевые слова: трубопровод, транспортировка, вибрация, колебания, частота, антивибрационные устройства, гофра.

Abstract. The issue of vibration resistance of the pipeline is considered. The critical values of the parameters corresponding to vibration phenomena are analytically determined. The natural frequencies are calculated depending on the pulsation frequency of the pre-resonant and transition to resonance modes. Anti-vibration devices are considered.

Key words: pipeline, transportation, vibration, vibrations, frequency, anti-vibration devices, corrugation.

Введение. Ряд предыдущих публикаций авторов настоящей статьи был посвящен, в основном, вопросам статической прочностной способности готовых оболочечных изделий, а также технологии их изготовления, включая возможную оптимизацию, например, обеспечение равнопрочности и др. Ранее исследованное должно быть дополнено динамической оценкой устройств, содержащих тонкостенные оболочки. В статье ставится задача оценки динамической устойчивости и разрушения оболочечной коммуникации – трубопровода при транспортировке сплошных сред. При данном процессе значимые последствия могут вызвать вибрационные явления (которые изучаются в отдельном разделе – вибрационной механике) [1]. Под вибрацией понимают высокочастотные с малой амплитудой колебания. Данные колебания могут стать причиной интенсивного механического взаимодействия между

твердыми частицами, приводящего к ускоренному разрушению. Либо, если речь идет о течении жидкости или газа, колебания могут вызвать переход от ламинарного к турбулентному режиму, что может привести к опасному явлению резонанса, гидро- и пневмоудара и др.

Для математической модели дифференциальное уравнение поперечных колебаний $w(x, t)$ оболочки или трубы радиуса R , толщиной h имеет вид:

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{1}{R} \left(m v^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2m \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right) = h(m + M) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где D – цилиндрическая жесткость трубы;

m, M – массы единицы длины трубы и транспортируемой среды со скоростью v ;

$v = v_0 + v_1 \cos pt$ – пульсирующая скорость движения с возмущающей от нагнетательных агрегатов частотой p .

Учитывая возможность разделения переменных по x, t [2] (математический прием вычленения из (1) более важной части), представим общее решение уравнения (1) в виде:

$$w(x, t) = \operatorname{Re}[\exp(i\omega t)][C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx} + (C_3 e^{-kx} + C_4 e^{kx})], \quad (2)$$

где $k = 2\omega\sqrt{(m+M)D}$ с граничными условиями на участке трубы $0 \leq x \leq l$,

$$w(0, t) = w(l, t) = 0;$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(0, t) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t); \quad (3)$$

с помощью которых определяются C_1, C_2, C_3, C_4 и решение (1). Наличие в нем компоненты $(\pm \exp)$ свидетельствуют о незатухающих колебательных движениях, переходящих в вибрационные с большой собственной частотой ω , отвечающей уравнению:

$$\frac{\partial^2 \omega_n(t)}{\partial t^2} + \omega_n^2(1 - 2a_n \cos pt)\omega_n(t) = 0, \quad (4)$$

где a_n – коэффициент пульсации;

p – частота внешних возмущающих колебаний.

Решение с учетом предыдущих формул принимает вид

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{m}{m+M} \left[\frac{n^2 \pi^2}{l^2} \cdot \frac{EJ}{m} - v^2 \right]}, \quad (5)$$

причем

$$\frac{p}{2\omega_n} = 1 + \frac{a_n}{2}, \quad (6)$$

где $(n = 1, 2, \dots)$.

На рис. 1 показана область динамической неустойчивости трубопровода – оболочки в зависимости от коэффициента пульсации a .

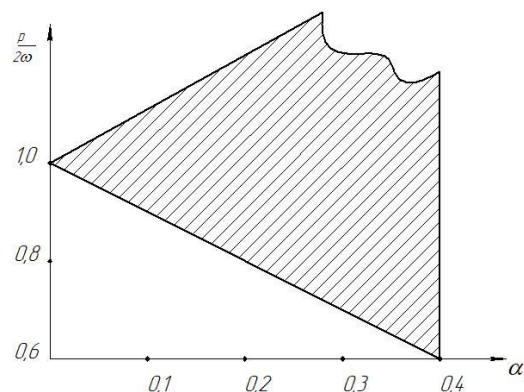


Рис. 1. Угловая область неустойчивости

В табл. 1, 2 приведены значения собственных частот ω_n в зависимости от частоты пульсаций (вынужденных колебаний p)

$$p = \frac{n\pi}{30}, \quad (7)$$

где n (об/мин) – число оборотов нагнетательного агрегата – насоса, в свою очередь,

$$\omega_n \approx \frac{1}{2}pn,$$

где n – целые положительные числа.

Таблица 1

Дорезонансный режим			
$p(1/c)$	62,8	94,2	125,6
n (об/мин)	$n = 600$	$n = 900$	$n = 1200$
$\omega(1/c)$	26,2	39,2	52,3

Таблица 2

Переходной режим, соответствующий резонансу и разрушению			
$p(1/c)$	62,8	94,3	125,7
$\omega(1/c)$	39,3	59,1	78,5

Таблицы обосновывают необходимость постоянного мониторинга режимов транспортировки. Более детальная информация по приборному определению частот, одних из

важных характеристик несущей способности при наличии вибраций, имеется в [3].

Существует много приемов по снижению вредного воздействия резонанса, например авторами статьи в предыдущих публикациях

дана численная оценка несущей способности составной цилиндрической трубы с конусом, заменяющей громоздкие – образные компенсаторы.

В [4] приведен феноменальный, по причине резонансного пневмоудара, случай многокилометрового вдоль 13 км разрушения трубы, которого можно было бы избежать с помощью гофрированной трубы, изготовленной из существующих сейчас новых материалов.

Ниже приведены схемы антивибрационных устройств.

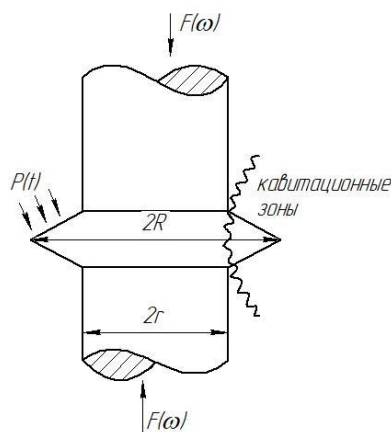


Рис. 2. Один из вариантов составной оболочки-компенсатора, при конструкторской проработке которого допускается увеличение числа гофр

Заслуживает внимания комплексная бесшумная противорезонансная схема (рис. 3).

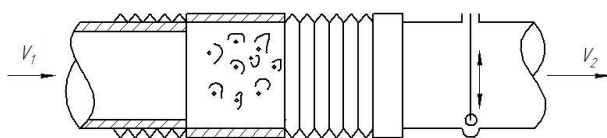


Рис. 3. Антивибрационное устройство

Кроме того, параллельно в местах вибрационного разрушения вершинных гофр развиваются кавитационные явления, что

дополнительно усложняет исследование несущей способности упругих систем.

Выводы:

1. В статье получены критические значения параметров, соответствующих вибрационным явлениям, вызывающих потерю устойчивости и разрушения несущих конструкций при обработке и транспортировке сплошных сред.

2. Предложены устройства по снижению вредного воздействия вибраций и их последствий.

Список источников

1. Вибрации в технике. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
2. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – М.: Машиностроение, 1976. – 215 с.
3. Богуслаев В.А., Жуков В.Б., Яценко В.К. Прочность деталей ГТД. – Запорожье: изд-во ОАО «Мотор Сич», 2003. – 528 с.
4. Разрушение / Под ред. Р.М. Шнейдеровича и Н.А. Махутова в 7-ми т. – М.: Машиностроение, 1976-1977.

References

1. Vibrations in engineering. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – 352 p.
2. Svetlitsky V.A. Random oscillations of mechanical systems. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 215 p.
3. Boguslaev V.A., Zhukov V.B., Yatsenko V.K. Durability of GTD parts. – Zaporozhye: publishing house of JSC Motor Sich, 2003. – 528 p.
4. Destruction / Edited by R.M. Schneiderovich and N.A. Makhutov in 7 volumes. – M.: Mechanical Engineering, 1976-1977.

Статья поступила в редакцию 15.08.2024

Информация об авторах

Солодовник Михаил Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: tm.univer@yandex.ru

Ясуник Светлана Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: jsn7628620@mail.ru

Волков Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: volnaana@mail.ru

Кузнецова Марина Николаевна, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения и инженерный консалтинг» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: kuz_mari@rambler.ru

Information about the authors

Solodovnik Mikhail, candidate of Physical and Mathematical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: tm.univer@yandex.ru

Yasunik Svetlana, candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: jsn7628620@mail.ru

Volkov Igor, candidate of Technical sciences, associate professor, associate professor of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: volnaana@mail.ru

Kuznetsova Marina, senior lecturer of the department of engineering technology and engineering consulting of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: kuz_mari@rambler.ru

Для цитирования:

Солодовник М.Д., Ясуник С.Н., Волков И.В., Кузнецова М.Н. Виброустойчивость трубопровода при транспортировке сплошных сред // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1 (1). – С. 52-55.

For citation:

Solodovnik M.D., Yasunik S.N., Volkov I.V., Kuznetsova M.N. Vibration resistance of the pipeline during transportation of continuous media // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1 (1). – P. 52-55.

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.742.22

СМЕСИ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛКИХ И СРЕДНИХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

Свинороев Ю. А.

COLD-CURED MIXTURES BASED ON TECHNICAL LIGNOSULFONATES FOR THE PRODUCTION OF SMALL AND MEDIUM-SIZED CAST IRON CASTINGS

Svinoroev Yu. A.

Аннотация. Предложили использование в качестве технологической добавки, повышающей прочностные характеристики смеси, вещество – карбоксиметилцеллюлозу, применяющуюся как активную полимерную основу в разнообразных клеевых материалах. Определили концентрационные границы применения КМЦ в смеси на уровне 0,15% – 0,25%. Предложили использовать каолиновую глину в качестве пластифицирующей добавки, для повышения формуемости смеси. Определили концентрационные границы применения пластифицирующей добавки на уровне 3,5 – 4,0 %. Провели сравнительный анализ разработанной смеси в сравнении с аналогом альфа-сет процесса. Установили, что предложенный состав дешевле по стоимости, экологически безопаснее и позволяет производить качественные отливки.

Разработанный состав смеси холодного отверждения по своим физико-механическим и технологическим характеристикам не уступает аналогам из альфа-сет-процесса.

Ключевые слова: литейное производство, литейные связующие материалы, связующая способность, технический лигнин, физико-механические свойства смесей, формуемость, осыпаемость, карбоксиметилцеллюлоза, коалин, сульфат аммония, отливка.

Abstract. It has been proposed to use a substance – carboxymethylcellulose mixture used as an active polymer base in a variety of adhesive materials as a technological additive that increases the strength characteristics. The concentration limits of CMC application in the mixture were determined at the level of 0.15% – 0.25%. It was proposed to use kaolin clay as a plasticizing additive to increase the formability of the mixture. The concentration limits of the plasticizing additive application were determined at the level of 3.5 – 4.0%. A comparative analysis of the developed mixture was carried out in comparison with the analogue of the alpha-set process. It was found that the proposed composition is cheaper in cost, more environmentally friendly and allows for the production of high-quality castings.

The developed composition of the cold-curing mixture, in terms of its physico-mechanical and technological characteristics, is not inferior to analogues from the alpha-set process.

Key words: foundry, casting binders, binding capacity, technical lignin, physico-mechanical properties of mixtures, formability, crumblability, carboxymethylcellulose, coaline, ammonium sulfate, casting.

Введение. Технологические процессы производства отливок являются основой современного машиностроения, от 60 до 90%, по массе конструкции, всего, что ездит, летает, плавает, состоит из деталей, произведенных тем или иным методом литья [1, 2].

Современные литейные технологии – это производственные процессы, основанные на применении специфических материалов, характерных только в литейном производстве, обрабатываемых на профильном узкоспециализированном оборудовании с целью получения качественной отливки любой конфигурации и размера с заранее заданным комплексом свойств [3].

Установилось, что фактором, определяющим название той или иной литейной технологии, является ключевой компонент, предопределяющий технологическую возможность изготовления отливки [4]. Например, говорят: «изготовлено по амин-процессу», «изготовлено по альфа-сет-процессу», «изготовлено по ПГС-процессу», в каждом случае определяющим в названии технологии лежит вид используемого *литейного связующего* материала. Это свидетельствует о том, что основным по технологической значимости является литейный связующий материал [5, 6].

Основное производство отливок сосредоточено на достаточно не большом количестве предприятий, примерно 25 – 30% от совокупного перечня, характеризующиеся массовым типом производства, где все технологические операции выполняются на специализированных технологических комплексах, включающих автоматические или автоматизированные конвейерные линии и специальные автоматы (напр., по производству литейных стержней, стержневые машины Лемпе) [7]. На долю таких приходится от 65 до 95% производства отливок, в зависимости от отрасли машиностроения. Однако 70 – 75 %, по количеству, это мелкие и средние предприятия специализирующиеся, как правило, на ремонте или узкой специализации производства литья [2, 7]. При том, что специфика единичного и

мелкосерийного производства кардинальным образом отличается от производства массового, рынок диктует те же дорогостоящие технологические прежде всего связующие материалы, что и для крупных предприятий с массовым производством. Как правило, это смолы на фенольной основе, что в данном случае является неоправданно дорогое и экологически опасно. То, что присуще массовому производству, не всегда эффективно для производства единичного.

Стоимость килограмма смолы на фенольной основе с учетом роста цен колеблется в пределах от 7 до 10 евро, в зависимости от марки и назначения [7, 8]. В силу социально-политических причин наблюдается неуклонный рост этого вида материалов [7, 9].

Целесообразно рассмотреть альтернативные решения [10, 11, 12], которые бы смогли преодолеть указанную диспропорцию, а учитывая трудности, связанные с встраиванием, внедрением новых материалов в технологические цепочки крупных предприятий с массовым типом производства, попытаться применить инновации в условиях гибкого по экономической природе, единичного и мелкосерийного производства отливок.

Цель исследований состояла в разработке недорогого по стоимости, экологически чистого по природе, эффективного по применению литейного связующего материала, ориентированного на использование в промышленных предприятиях с мелкосерийным и единичным производством отливок.

Ограничения по разрабатываемым смесям. Разработка должна быть проста в применении и эффективна в получаемых результатах, содержательно это выражается в том, что изначально по замыслу исключался вариант сложного процесса приготовления связующего как такового в производственных условиях, что могло бы обусловить потребность в создании на предприятии дополнительного технологического модуля со своими

регламентами и сопутствующими расходами. Предполагается, что соответственным «местом сборки» предлагаемого, нового связующего материала являлся бы участок приготовления непосредственно самой литейной смеси, то есть технический агрегат, смеситель (лопостной, катковый и тому подобное).

Ход выполнения исследования

Идея работы. Сделано предположение, что в качестве основы для синтеза новых связующих материалов потенциально можно использовать природный биополемерный комплекс на основе технического лигнина. Этот материал представлен на рынке вторичных веществ техногенного происхождения в разнообразных модификациях технических лигносульфонатов (ЛСТ) – жидких, порошкообразных, твердых по физическому состоянию и разнообразных вариаций по химическому составу. Это предопределяет спектр разнообразных возможностей для создания принципиально новых продуктов.

Ресурсная база. Технический лигнин, в разных его модификациях, является крупнотоннажным отходом переработки растительного сырья. Из основных производств, вырабатывающих этот материал, является целлюлозно-бумажная промышленность. В зависимости от способа делегнификации древесины различают сульфатный, сульфитный и гидролизный лигнин.

Общий объем генерирования данного вещества в мире оценивается в пределах до 100 млн тонн [13], причем основная его масса сбрасывается в виде стоков и является значимым фактором загрязнения водного бассейна планеты [9, 13, 14]. На данный момент рационального комплексного способа проблемы утилизации технического лигнина не существует. Это предопределяет

перспективность данного направления исследования, достаточную для разработки продуктов ресурсную базу, невысокую стоимость исходного сырья и отсутствие его удорожания на перспективу.

Потенциальная область применения. В растительной ткани лигнин выполняет функции связи, скрепления целлюлозных волокон и обеспечивает ее результирующую прочность. По этой причине этот материал генетически предрасположен к использованию в качестве связующего [9, 14, 15].

В литейном производстве актуальна проблема поиска, разработки и применения экологически безопасных, недорогих по стоимости, недефицитных на рынке, но технологически эффективных связующих материалов.

Наиболее перспективным технологическим сегментом при производстве отливок являются технологии, использующие холодно-твердеющие смеси, так называемые ХТС-процессы [16], одним из которых является альфа-сет-процесс [17, 18].

Метод литья в холодно-твердеющую смесь основан на свойствах песчаной смеси утверждаться под воздействием катализатора без нагревательного воздействия. При этом такой процесс имеет целый ряд преимуществ, их сводная характеристика приведена в табл. 1.

Перечисленные преимущества ХТС-процессов диктуют необходимость более детального изучения процессов структурообразования смесей с ЛСТ для практической реализации указанных преимуществ на смесях с их применением.

Рассмотрим возможность применения ЛСТ как исходного связующего материала в ХТС-процессах производства литья.

Структурно-логическая схема проведения исследования в виде поэтапного решения обобщенных задач, показана на рис. 1.

Таблица 1

**Сводные характеристики преимущества ХТС-процессов при изготовлении
отливок в литейном производстве**

№	Показатель	Содержание
1	Обеспечение качества поверхности отливок	Обеспечивается чистота поверхности, соблюдается точность геометрических размеров отливки, достигается высокое качество изделий
2	Обеспечение размерной точности отливок	Деформация при производстве форм отсутствует, количество дефектов минимальное
3	Снижение себестоимости	За счет использования более простого оборудования себестоимость продукции снижается
4	Возможность автоматизации	Простота технологических операций обеспечивает возможность автоматизации процесса приготовления смесей
5	Сокращение энергозатрат	За счет отсутствия операции нагрева литейной формы или стержня
6	Снижение трудоемкости	Снижается трудоемкость финишных операций

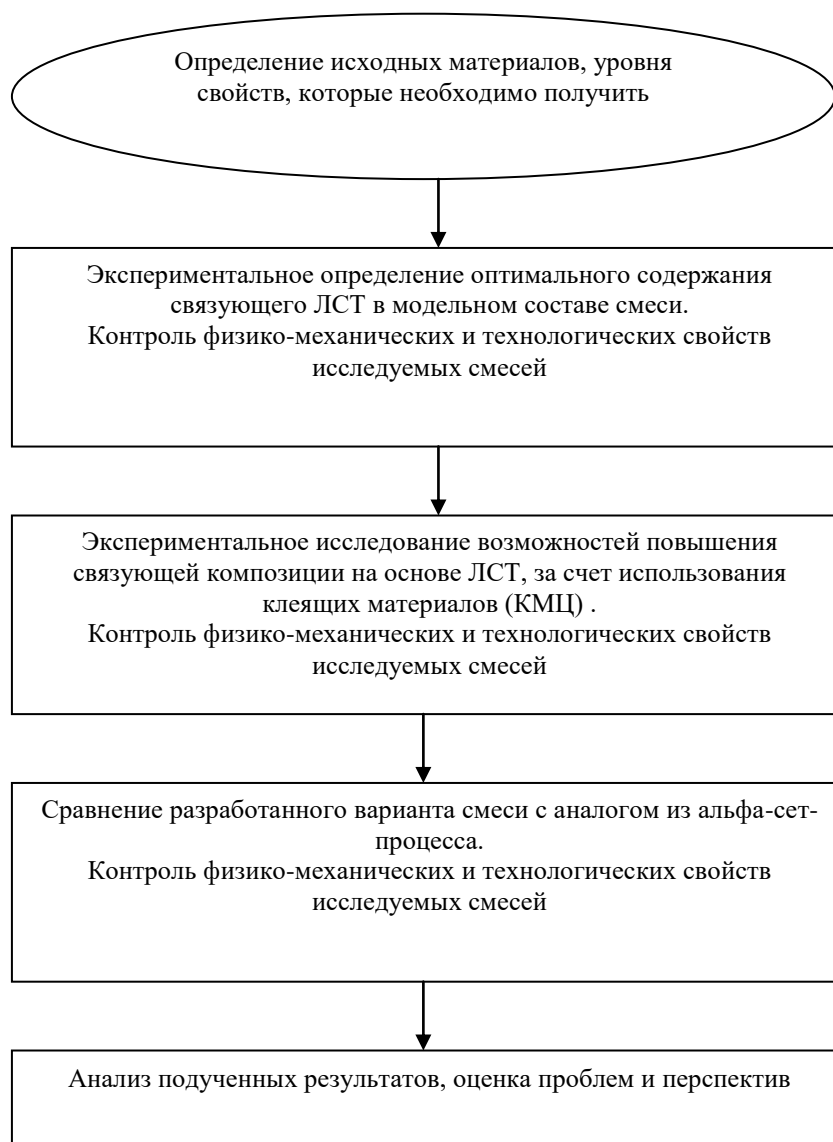


Рис. 1 . Структурно-логическая схема проведения исследования

Материалы. В качестве основного связующего материала для проведения исследований взяли жидкий технический лигносульфонат, произведенный по технологии сульфитной варки. В качестве разнообразных технологических добавок сульфат аммония, карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) и в качестве пластифицирующего элемента каолиновую глину.

Исследовали кинетику набора прочности при реализации технологии холодного отверждения на основе применения жидких технических лигносульфонатов. Предварительно, исходя из имеющихся общепринятых представлений о химизме взаимодействия ЛСТ с аммонийными солями [15, 19], провели их модифицирование. В качестве модификатора использовали сульфат аммония. В общем виде сущность подобного химического воздействия заключается в том, что двухвалентный аммоний за счет замещения сульфогрупп в олигомерных цепях ЛСТ

образует их поперечные сшивки, что проявляется в формировании определенной пространственной каркасной полимерной структуры, что в итоге приводит к холодному отверждению песчаной смеси.

По предварительно проведенным исследованиям установили [9, 19], что оптимальное содержание сульфата аммония в смеси составляет 2%. Первоначально готовили связующий материал, вводя в ЛСТ аммоний и тщательно перемешивая композицию при комнатной температуре 20 – 25°C. После выдержки в течение 30 – 40 мин. связующее готово к применению.

Первоначально определяли оптимальное содержание модифицированного ЛСТ в составе смеси. Эксперименты проводили на модельных смесях с содержанием соответственно: 4, 6, 8, 10% модифицированных ЛСТ в смеси. Исследовали кинетику набора прочности. Результаты экспериментов приведены на рис. 2.

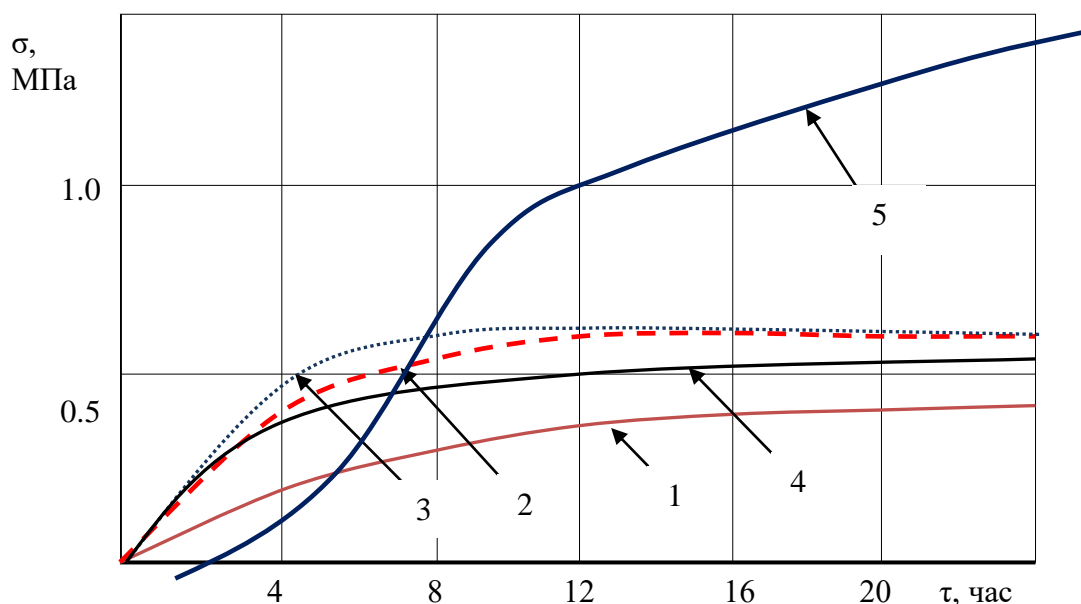


Рис. 2. Исследование кинетики затвердевания смесей с ЛСТ модифицированным сульфатом аммония при различном содержании связующего в смеси. Содержание связующего в смеси, соответственно: линия 1 – 4% ЛСТ в смеси; линия 2 – 6 % ЛСТ в смеси линия 3 – 8% ЛСТ в смеси, линия 4 – 10% ЛСТ в смеси, линия 5 смесь по альфа сет процессу

По совокупности проведенных экспериментов установили, что оптимальное содержание ЛСТ, модифицированного сульфатом аммония составляет 6%, при этом достигаемые показатели прочности после 24 ч. выдержки составляют 0,62 МПа. Такой результат может быть не всегда достаточным для получения качественной отливки. В целях увеличения прочности холодно-твердеющей смеси с ЛСТ, модифицированных сульфатом аммония, предложено в состав смеси дополнительно ввести карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ), часто применяемую как активную клеящую основу в различных продуктах.

На основе серии проведенных поисковых экспериментов установили, что КМЦ в виде порошка можно вводить в наполнитель, кварцевый песок непосредственно в процессе приготовления смеси. Расчетное содержание, с точки зрения получения максимальной прочности и опыта применения КМЦ, находится в пределах от 0,05 до 0,35 % от состава смеси. Исследовали смеси с содержанием 0,1...0,2...0,3% КМЦ в составе смеси. Задача исследований состояла в определении оптимального значения КМЦ в составе смеси. Сводные результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 3.

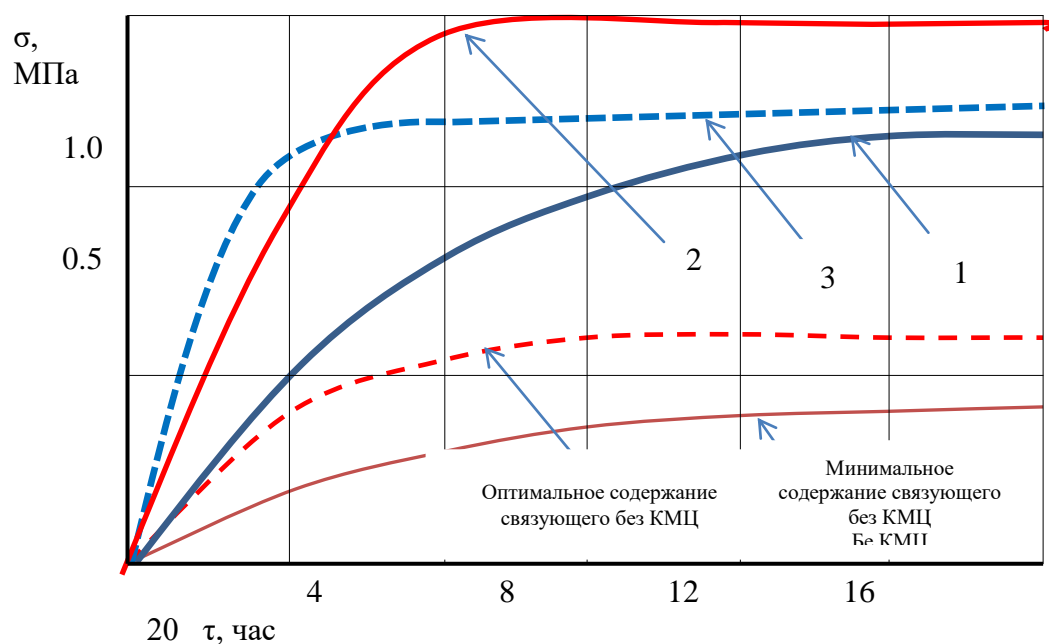


Рис. 3. Исследование кинетики затвердевания смесей с добавкой КМЦ при оптимальном содержании лигносульфонатного связующего в смеси (6% ЛСТ, 0,2% сульфата аммония). Содержание связующего в смеси соответственно: линия 1 – 0,1 % КМЦ, линия 2 – 0,2 % КМЦ, линия 3 – 0,3% КМЦ

Установили, что применение КМЦ в составе литейной смеси существенно увеличивает показатели прочности модельных связующих композиций.

В процессе экспериментальных исследований фиксировали физико-механические и технологические свойства исследуемых смесей. По итогам реализации указанного алгоритма исследований сводные данные по составам смесей, физико-

механическим и технологическим их свойствам сведены в табл. 2.

Оценивая полученные результаты, можно говорить о том, что состав 6 табл. 2 по комплексу свойств наиболее близок к варианту, который можно было бы применить в практике производства отливок и, в дальнейшем рекомендовать для производства определенного сегмента литья.

Недостатком указанного состава смеси, который может приводить к браку, является необходимость улучшения формуемости. Этот показатель определяет размерную точность и

воспроизведение конфигурации будущей отливки, а поэтому должен быть максимально приближен к идеалу.

Таблица 2

Компонентные составы и показатели физико-химических и технологических свойств разрабатываемых составов смесей

Порядковый номер компонентного состава смеси	Состав смеси, масс., %			Физико-механические свойства		Технологические свойства		
	ЛСТ с добавкой 2% сульфата аммония	КМЦ	Песок	Прочность на сжатие через 24 ч., МПа	Прочность на растяжение сухих образцов, МПа	Живучесть, мин.	Осыпаемость, %	Формуемость, %
1	4		96	0,42	0,57	11	1,39	72,9
2	6		94	0,61	0,72	13	0,88	89,1
3	8		92	0,61	0,67	15	0,93	90,1
4	10		90	0,56	0,47	14	1,06	92,8
5	6	0,1	94	1,27	1,82	11	0,18	93,1
6	6	0,2	94	1,50	2,02	11	0,11	94,9
7	6	0,3	94	1,33	2,00	10	0,10	98,0

В целях повышения формуемости было предложено использовать в составе смеси формовочную каолиновую глину. Установили экспериментальным путем, что содержание глины в смеси в оптимальном количестве будет составлять 3,7%. При этом в качестве основной модельной смеси была выбрана смесь 6 (табл. 2). При данном количестве глины

наблюдались наилучшие показатели прочностных и технологических свойств.

Проведено сравнение предложенного состава смеси на основе ЛСТ со смесью, изготовленной по технологии альфа-сет-процесса. Результаты проведенных экспериментов показаны в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные характеристики свойств предложенного состава смеси со смесью на основе альфа-сет-процесса

Состав смеси	Физико-механические свойства		Технологические свойства		
	Прочность на сжатие через 24 ч., МПа	Прочность на растяжение сухих образцов, МПа	Живучесть, мин.	Осыпаемость, %	Формуемость, %
По предлагаемому варианту, состав: 1. Песок кварцевый – 94%, 2. ЛСТ (с добавкой 2% сульфата аммония) – 5,5% КМЦ – 0,2% Глина каолиновая – 3,7%	1,53	2,11	15	0,13	98,9
По альфа-сет-процессу, состав: 1 Песок кварцевый – 98% 2. Смола марки АЛЬФАБОНД – 2,0% 3. Отвердитель сложноэфирный – 25%, от количества смолы	1,51	2,69	7	0,15	99,3

По технологическим показателям предложенный состав смеси не уступал базовому, используемому в настоящее время, однако его отличительной особенностью было то, что предлагаемая смесь не содержала в своем составе компонентов, генерирующих на этапах технологического процесса изготовления отливки высокотоксичные и канцерогенные вещества [20, 21, 22].

С экономической точки зрения стоимость килограмма смолы альфабонд немецкого производства составляет 5,8 – 6,3 евро, стоимость килограмма ЛСТ составляет 0,1 – 0,2 евро, что несоизмеримо меньше, чем стоимость фенольной смолы. Существенная экономическая выгода будет сохраняться несмотря на то, что ЛСТ используется в составе смеси почти в три раза больше, чем смолы, а остальных ингредиентов используется в незначительных объемах, и они не смогут существенно изменить баланс.

В отличие от смоляных смесей альфа-сет-процесса, компоненты предлагаемой смеси нетоксичны, имеют гораздо больший срок хранения, просты в обращении, пожаробезопасны и не зривоопасны [9, 23].

При заливке литейных форм, изготовленных из предлагаемой смеси, полученные чугунные отливки легко извлекались из формы, смесь высыпалась из полостей при легком постукивании молотком. В процессе смесеприготовления заливки расплавленного чугуна в форму, охлаждения отливки в форме и последующей выбивке каких-либо резких запахов не ощущалось. Поверхности отливки были чистыми без пригара и инородных включений.

Выводы. Установили, что биополимерные материалы на основе лигнина могут быть применены в качестве исходного материала для синтеза новых литейных связующих материалов, отвечающих современному уровню свойств.

Определили экспериментально оптимальное содержание связующего в смеси на уровне 5,8 – 6,2%.

Доказали на практике предположение, что использование аммонийных солей в качестве модификатора ЛСТ может привести к обеспечению процессов холодного (при комнатных температурах) отверждения смеси на их основе.

Предложили использование в качестве технологической добавки, повышающей прочностные характеристики смеси, вещество – карбоксиметилцеллюлозу, применяющуюся как активную полимерную основу в разнообразных клеевых материалах.

Определили концентрационные границы применения КМЦ в смеси на уровне 0,15% – 0,25%.

Предложили использовать каолиновую глину в качестве пластифицирующей добавки для повышения формуемости смеси.

Определили концентрационные границы применения пластифицирующей добавки на уровне 3,5–4,0 %.

Провели сравнительный анализ разработанной смеси в сравнении с аналогом альфа-сет-процесса. Установили, что предложенный состав дешевле по стоимости, экологически безопаснее и позволяет производить качественные отливки.

Список источников

1. Технология литейного производства: учебное пособие для практических занятий / А.И. Батышев, В.Д. Белов, К.А. Батышев, С.А. Сироткин, Л.Д. Смелянец, Ю.А. Свиногоев, В.Д. Рябичев, Ю.И. Гутько. – Москва, Луганск: изд-во «Перо» / Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. – 266 с.
2. Проектирование и производство заготовок в машиностроении: учебное пособие / Батышев К.А., Батышев А.И., Свиногоев Ю.А., Рябичев В.Д., Гутько Ю.И./Под.ред. К.А. Батышева. – Москва, Луганск: Изд-во «Перо» / Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. – 220с.
3. Основы материаловедения и технология материалов: учебное пособие / Батышев К.А., Батышев А.И., Безпалько В.И., Семенов К.Г., Свиногоев Ю.А., Рябичев В.Д., Гутько Ю.А. – Москва, Луганск: Изд-во «Перо» / Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2021. –374с.

4. Мельников А.П., Кукуй Д.М. Современные тенденции развития технологии в литейном производстве // *Литье и металлургия*. – №3 (47). 2008. – С. 65-80.
5. Буданов, Е. Н. Семь основных мифов и заблуждений относительно литейного производства / Е. Н. Буданов // *Литейное производство*. – 2009. – № 9. – С. 2-10.
6. Свинороев Ю.А. О потенциале применения лигносульфонатов в качестве связующих для технологических процессов литья./ Ю.А. Свинороев, Р. Бэр, Ю.И. Гутько // *Литейное производство*. – 2016. – №12. – С. 23-26.
7. Дибров, И. А. Состояние и перспективы развития литейного производства России = State and prospects development of foundry production in Russia / И. А. Дибров // *Литейное производство и металлургия*. – 2021. – Беларусь [Электронный ресурс]: 29-я Международная научно-техническая конференция и информационная выставка : труды участников конференции / Белорусский национальный технический университет; под общ. ред. Е. И. Маруковича; ред.: С.В. Машканова [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 6-11.
8. Информационный ресурс «Hüttenes-Albertus», Германия. URL: <http://www.huettenes-albertus.ru/>.
9. Свинороев Ю.А. Разработка и применение новых экологически чистых связующих материалов на основе технического лигнина в производстве отливок: монография / Ю.А. Свинороев. – Москва, Луганск: Изд-во «Перо» / Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2023. – 218 с.
10. Falah Mustafa Al-Saireh & Yuri Svinoroev Assessment of casting binding materials based on modified technical lignosulfonates/ *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)* ISSN (P): 2249–6890; ISSN (E): 2249–8001 Vol. 10, Issue 2, Apr 2020, 335–346.
11. Falah Mustafa Al- Saireh & Yuri Svinoroev Production of high quality casting binders from materials containing lignin / *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)* ISSN(P): 2249-6890; ISSN(E): 2249-8001 ; Published: Sep 22, 2020.
12. Батышев К.А. Современные технологии производства отливок из цветных сплавов: монография / К.А. Батышев, К.Г. Семенов, Ю.А. Свинороев. – Москва: Первый том, – 2021. – 76 с.
13. Информационный ресурс. Международный институт лигнина. URL: <https://www.ili-lignin.com/>.
14. Дейнеко И.П. Утилизация лигнинов: достижения, проблемы и перспективы/Химия растительного сырья. – 2012. – №1. – С. 5-20.
15. Браунс Ф.Э. Химия лигнина: монография. – Издательство "Лесная промышленность". – М. – 1964. – 864с.
16. Вальтер А.И., Рябова Н.А. Альфа-сет процесс и CO2-процесс. Экспериментальные исследования, свойства смесей / *Современные материалы, техника и технологии*. – 2022 г. – №3(42). – С.10-14.
17. Orkas J. 2001. Technical and environmental requirements for surplus foundry sand utilization. Helsinki University of Technology, Report TKK-VAL-3/2001, Espoo, Finland, 148 страниц (английский язык).
18. Информационный ресурс. Альфа-сет процессы. URL: <http://www.ruscastings.ru/files/file2088.pd>.
19. Семик А. П. О получении формовочных и стержневых смесей на основе технических лигносульфонатов / Семик А. П. // *Вестн. Киев. политехн. ин-та*. – Машиностроение: 1984. – вып. 21. – С. 12-16.
20. The Directive of the European Parliament and Council of the 24-th November 2010 concerning industrial emissions (2010).
21. Митрохина А.С., Макарова А.Е. Вредные факторы литейного производства/ *Современные наукоемкие технологии*. – №5 – 2014. – С. 103.
22. Лазаренков М.А. Исследование воздушной среды рабочих зон литейных цехов при современных технологиях изготовления стержней и форм / А.М. Лазаренков, М.А. Садох. *Литейное производство и металлургия*. – Минск – №3, 2022г. – С 122-126.
23. Информационный ресурс. Справочник химика 21, URL: <https://www.chem21.info/info/658985/>.

References

1. Foundry technology: a textbook for practical classes / A.I. Batyshev, V.D. Belov, K.A. Batyshev, S.A. Sirotkin, L.D. Smelyanets, Yu.A. Svinoroev, V.D. Ryabichev, Yu.I. Gutko. - Moscow, Lugansk: Pero Publishing House / Publishing House of Leningrad State University named after V. Dahl, 2022. - 266 p.
2. Design and production of blanks in mechanical engineering: a textbook / Batyshev K.A., Batyshev A.I., Svinoroev Yu.A., Ryabichev V.D., Gutko Yu.I. / Ed., K.A. Batyshev. - Moscow, Lugansk: Pero Publishing House / Publishing House of Leningrad State University named after V. Dahl, 2022. - 220 p.
3. Fundamentals of Materials Science and Materials Technology: a textbook / Batyshev K.A., Batyshev A.I., Bezpalko V.I., Semenov K.G., Svinoroev Yu.A., Ryabichev V.D., Gutko Yu.A. - Moscow, Lugansk: Pero Publishing House / Publishing house of Leningrad State University named after V. Dahl, 2021. - 374 p.
4. Melnikov A.P., Kukuy D.M. Modern trends in the development of technology in foundry production // Casting and metallurgy. - No. 3 (47). 2008. - P. 65-80.
5. Budanov, E.N. Seven main myths and misconceptions regarding foundry production / E.N. Budanov // Foundry production. - 2009. - No. 9. - P. 2-10.
6. Svinorov Yu.A. On the potential of using lignosulfonates as binders for casting processes. / Yu.A. Svinorov, R. Baer, Yu.I. Gutko // Foundry production. - 2016. - No. 12. - P. 23 - 26.
7. Dibrov, I.A. State and prospects for development of foundry production in Russia / I.A. Dibrov // Foundry production and metallurgy. - 2021. - Belarus [Electronic resource]: 29th International Scientific and Technical Conference and Information Exhibition: proceedings of the conference participants / Belarusian National Technical University; under the general editorship of E.I. Marukovich; ed.: S. V. Mashkanova [et al.]. - Minsk: BNTU, 2021. - P. 6-11.
8. Information resource "Hüttenes-Albertus", Germany. URL: <http://www.huettenes-albertus.ru/>
9. Svinoroev Yu.A. Development and application of new environmentally friendly binders based on technical lignin in the production of castings: monograph / Yu.A. Svinoroev. - Moscow, Lugansk: Publishing house "Pero" / Publishing house of Leningrad State University named after V. Dahl, 2023. - 218 p.
10. Falah Mustafa Al-Saraireh & Yuri Svinoroev Assessment of casting binding materials based on modified technical lignosulfonates/ International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001 Vol. 10, Issue 2, Apr 2020, 335-346.
11. Falah Mustafa Al- Saraireh & Yuri Svinoroev Production of high quality casting binders from materials containing lignin / International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ISSN(P): 2249-6890; ISSN(E): 2249-8001 ; Published: Sep 22, 2020.
12. Batyshev K.A. Modern technologies for the production of castings from non-ferrous alloys. Monograph / K.A. Batyshev, K.G. Semenov, Yu.A. Svinoroev. - Moscow: First volume, - 2021. - 76 p.
13. Information resource. International Lignin Institute. URL: <https://www.ili-lignin.com>.
14. Deineko I.P. Lignin utilization: achievements, problems and prospects / Chemistry of plant raw materials. - 2012. - No. 1. - P. 5-20.
15. Brauns F.E. Lignin chemistry. Monograph / Publishing house "Lesnaya Promyshlennost", Moscow 1964. - 864 p.
16. Walter A.I., Ryabova N.A. Alpha-set process and CO₂-process. Experimental studies, properties of mixtures / Modern materials, equipment and technologies. - 2022. - No. 3 (42). - P. 10-14.
17. Orkas J. 2001. Technical and environmental requirements for surplus foundry sand utilization. Helsinki University of Technology, Report TKK-VAL-3/2001, Espoo, Finland, 148 страниц (английский язык).
18. Information resource. Alpha-set processes. URL: <http://www.ruscastings.ru/files/file2088.pdf>
19. Semik A. P. On obtaining molding and core mixtures based on technical lignosulfonates / Semik A. P. // Vesn. Kyiv. Polytechnical Institute. - Mechanical Engineering: 1984. - issue 21. - P. 12 - 16.
20. The Directive of the European Parliament and Council of the 24th November 2010 concerning industrial emissions (2010).
21. Mitrokhina A. S., Makarova A. E. Harmful factors of foundry production / Modern science-intensive technologies. - No. 5 - 2014. - P. 103.

22. Lazarenkov M. A. Study of the air environment of working areas of foundries with modern technologies for the production of cores and molds / A.M. Lazarenkov, M.A. Sadokha. Foundry production and metallurgy. - Minsk - No. 3, 2022. -

P. 122 - 126. 23. Information resource. Chemist's Handbook 21, URL: <https://www.chem21.info/info/658985/>

Статья поступила в редакцию 25.11.2024

Информация об авторе

Свино́ров Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровые технологии машины в литейном производстве» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: desna.us@yandex.ru

Information about the author

Svinoroev Yuri Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Digital Machine Technologies in Foundry Production" of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: desna.us@yandex.ru

Для цитирования:

Свино́ров Ю.А. Смеси холодного отверждения на основе технических лигносульфонатов для производства мелких и средних чугуновых отливок // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 56-66.

For citation:

Svinoroev Yu. A. Cold-cured mixtures based on technical lignosulfonates for the production of small and medium-sized cast iron castings // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1 (1). – P. 56-66.

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТРАНЫ, ЕЕ РЕГИОНОВ И ГОРОДОВ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 662.638:662.8.05-492.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ПЕЛЛЕТНОГО ТОПЛИВА ИЗ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ И ПОЛИЭТИЛЕНА

Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю., Никитин Ю. Н., Корженевская М. В.

IMPROVING THE METHOD OF GRANULATING PELLET FUEL FROM WOOD AND POLYETHYLENE WASTE

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu., Nikitin Yu. N., Korzhenevskaya M. V.

Аннотация. В статье рассматривается вопрос о возможности использования для производства методом гранулирования pelletного топлива из отходов древесины и полиэтилена. На основании литературных источников выполнен анализ методов повышения механической прочности pelletного топлива и возможности их применения. Усовершенствован способ гранулирования pelletного топлива за счет модернизации гранулятора, позволяющего изготавливать pelletное топливо, покрытое тонким слоем полиэтилена. Экспериментально определена механическая прочность полученного pelletного топлива.

Ключевые слова: отходы древесины, отходы полиэтилена, pelletное топливо, связующие, механическая прочность, гранулятор.

Abstract. The article discusses the possibility of using pellet fuel from wood and polyethylene waste for production by granulation. Based on the literature sources, the analysis of methods for increasing the mechanical strength of pellet fuel and the possibility of their application is carried out. The method of pellet fuel granulation has been improved due to the modernization of the granulator, which makes it possible to produce pellet fuel coated with a thin layer of polyethylene. The mechanical strength of the obtained pellet fuel was determined experimentally.

Key words: wood waste, polyethylene waste, pellet fuel, binders, mechanical strength, granulator.

Введение. В России взят курс на стимулирование переработки и потребления древесных отходов. Подпрограммой «Лесопромышленный комплекс» государственной программы Российской

Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», утвержденной распоряжением Правительства российской федерации от 19 июня 2013 г. № 997-р, одной из задач определено развитие

биоэнергетики и производства биотоплива, а также увеличение переработки древесных отходов.

Россия в мире по запасам древесины занимает второе место и по объемам ее заготовки пятое. Несмотря на то что древесина является возобновляемым ресурсом, тем не менее в связи с довольно большими объемами ее заготовки все более остро становится вопрос о комплексном (использование безотходных технологий переработки древесины) и эффективном использовании древесных лесных ресурсов. Ежегодно на предприятиях деревопереработки в России образуется около 35766,3 тыс. куб. м древесных отходов, из них 19,95 % – это опилки, стружка, пыль. При этом опилки, стружка, мелкие кусковые отходы практически не используются [1].

Одним из основных направлений использования древесных отходов в настоящее время является производство биотоплива – пеллет. Использование таких видов древесных отходов в качестве пеллетного топлива позволит существенно сократить использование лесных ресурсов, способствует повышению глубины переработки древесины, решает проблему утилизации образования отходов, повышает экологическую безопасность – повышение качества жизни и здоровья населения, снижает себестоимость производства при производстве пеллет в местах образования отходов, позволяет получить дополнительную прибыль, приносит социальную выгоду – образование дополнительных рабочих мест [2].

Пеллеты как альтернативное топливо могут быть использованы для автомобильного транспорта, обслуживающего предприятия деревообработки, – применение газогенераторных автомобилей, что приведет к снижению расходов на транспортировку. Кроме того, использование пеллет в качестве энергоносителей позволит обеспечить деревообрабатывающие предприятия автономным отоплением, электричеством и газом [3, 4].

Основные недостатки пеллетного топлива: низкая механическая прочность (при хранении

и транспортировке пеллет нижние слои испытывают высокое давление и крошатся, образуя пылевидную фракцию, что приводит к ухудшению свойств как топлива – снижению энергоэффективности) [5, 6]; большая эмиссия разных мелкодисперсных твердых частиц в атмосферу [7]; гигроскопичность (при достижении влажности 22-26% пеллеты рассыпаются, что при организации их перевозки и хранения обязывает соблюдать специальные условия) [8], древесные пеллеты могут выделять большое количество ядовитого монооксида углерода во время хранения [9], при обращении с древесными гранулами выделяется мелкая пыль, которая может привести к взрыву [10]. В связи с этим актуальным является минимизация этих недостатков пеллетного топлива.

По данным ЦДУ ТЭК, предприятия России в 2021 году увеличили выпуск полиэтилена до 3,26 млн т. В России ежегодное потребление полиэтилена составляет около 1,7 млн т. Значительная доля полиэтилена применяется для изготовления товаров с ограниченным сроком службы, которые являются источниками отходов [11].

Полиэтилен отличается высокой устойчивостью к воздействиям окружающей среды (солнечных лучей, влаги) био-, химической стойкостью и поэтому длительное время не разлагается [12]. Следовательно, проблема утилизации этого вида отходов становится все острее. Применение сжигания для утилизации не выход, так как при этом процессе высвобождаются токсичные компоненты, которые попадают в атмосферу. Это вынуждает искать более эффективные методы утилизации полиэтилена с целью получить материал для новой продукции с особыми свойствами [13].

Среди отходов полимеров, входящих в состав ТБО, наиболее весомо содержание ПЭ и ПЭТ. В настоящее время ввиду загрязненности, отсортированные полимерные отходы находят ограниченное применение. Поэтому эффективно их использовать для получения синтез-газа газификацией. Этот газ, возможно, использовать как топливо, поскольку более

80% его объема составляют горючие компоненты, такие же, как у синтез-газа, получаемого промышленным способом из каменного угля и мазута [14, 15].

В настоящее время применяется множество технологий, использующих различное оборудование для утилизации отходов полиэтилена, основанных на температурном воздействии с целью получения сырья для новой продукции, но, очевидно, этого недостаточно, так как растут мусорные полигоны, поэтому актуальным является расширение методов и совершенствование оборудования для переработки полиэтиленовых отходов, неиспользуемых для получения вторичных полиэтиленов.

Целью исследования является усовершенствование способа производства пеллет с высокой механической прочностью из отходов древесины и полиэтилена.

Метод решения. Для увеличения прочности пеллет от 1,1 до 4,3 МПа предлагается при их изготовлении применять температуру прессования от 100 до 125°C, а давление прессования от 5 до 15 МПа. Установлено, что наиболее устойчиво к вибрации пеллетное топливо, полученное из отходов древесины сосны, – доля пылевидной фракции составила 6,4 %. Для повышения предела прочности при сжатии пеллетного топлива 4,0-4,5 МПа предлагается состав

древесины: сосны 15–35 %, березы 20-40 % и ольхи от 30-65 % [16].

Повышение механических свойств достигается применением комбинирования растительной биомассы (отходов сельского хозяйства с низкой температурой плавления золы) и древесных отходов (с высокой температурой плавления золы) для изготовления пеллетного топлива [17].

Одним из методов повышения физико-механических свойств древесного пеллетного топлива является торрефикация твердой биомассы – тепловая обработка в бескислородной среде при температурах 200-300°C с дальнейшим гранулированием. Среди всех видов древесного топлива является наиболее энергоэффективным. Пеллеты обладают большей насыпной плотностью, чем обычные древесные пеллеты, хорошей сыпучестью и прочностью (табл. 1), не пылят при транспортировке, гидрофобны (могут храниться на открытом воздухе и отгружаться в открытые контейнеры), имеют высокую энергетическую плотность [18].

Недостатками технологии торрефикации являются: дорогостоящий процесс предварительной подготовки древесины; высокие капитальные затраты на разработку и изготовление оборудования, образование вредных веществ [19].

Таблица 1

Сравнительные характеристики пеллетного топлива [20]

Показатели	Древесные пеллеты	Торрефицированные пеллеты
Влажность, %	7-10	1-5
Теплота сгорания, МДж/кг	15-16	20-24
Выход летучих веществ на сухую массу, %	70-75	55-65
Содержание углерода на сухую массу, %	20-25	28-35
Насыпная плотность, кг/м ³	550-750	750-850
Объемная плотность энергии, ГДж/м ³	7,5-10,4	15,0-18,7
Содержание пыли	Ограниченное	Ограниченное
Гигроскопические свойства	Гигроскопичный	Гидрофобный
Биологическая деградация	Да	Нет
Требования к измельчению	Повышенные	Обычные
Пригодность к обработке	Высокая	Высокая
Однородность продукта	Высокая	Высокая
Транспортные расходы	Умеренные	Низкие

Один из методов повышения физико-механических свойств топливных пеллет и эффективности процесса их получения – технология получения топливных пеллет из растительной смеси и технического гидролизного лигнина – природного полимера с высокой пластичностью и связывающей

активностью, способствующего хорошей адгезии в процессе прессования смеси лигниновых частиц с поверхностью древесного компонента и высокой когезии самого монолита в пеллете [21, 22, 23]. Один из составов представлен в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства пеллет, изготовленных из смеси древесных отходов и гидролизного лигнина

Содержание компонентов		Прочность брикетов, МПа		Плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Зольность, %	Теплота сгорания (рабочая), ккал/кг
гидролизный лигнин	древесные отходы	временное сопротивление сжатию	сопротивление истиранию				
30	70	8	58	0,86	8,2	2,8	4740

Растительные смеси предлагаемого состава обеспечивают получение топливных пеллет с более высокой рабочей теплотой сгорания, достаточно высокой прочностью и плотностью, низкими водопоглощением и зольностью.

Способ получения твердого топлива, который может быть использован в промышленности и для коммунально-бытовых потребностей, с утилизацией пластмассовых отходов и отходов растительного происхождения [24]. Пластмассовые отходы измельчают, затем компоненты дозируют, смешивают, прессуют, при повышении давления пластмасса плавится, готовое твердое топливо охлаждают. Такое твердое топливо содержит 60-97 мас. % материала растительного происхождения и 3-40 мас. % вяжущего.

Для производства твердого топлива применяют следующую технологию: в шихту, содержащую пластмассы, макулатуру и древесные отходы, автоматически впрыскивают 20% воды; смешивают; уплотняют шихту экструдером за три оборота и выдавливают через формовочные сопла торцевой пластины [25]. Вода используется для поддержания температуры в процессе выдавливания.

Применение технологий, использующих пластмассы в качестве связующих, способствует образованию защитной пленки, заполнению пор пластмассой, повышению прочности твердого топлива.

Недостатком технологий, использующих пластмассы в качестве связующих, является невозможность получить равномерный состав твердого топлива и состав пеллетного топлива с содержанием пластмассы менее 3%. Применение несORTированной пластмассы для сжигания и газификации приводит к вредным выбросам. Если использовать такое твердое топливо в промышленности и для коммунально-бытовых потребностей, то необходимо применять сложную дорогостоящую очистку дымовых газов.

Производство пеллет из древесных отходов со связующими веществами (лигнин, пек, альбумин, казеин, крахмал, пластмасса и др.), добавляемыми с целью повышения физико-механических свойств, представленное в работах [6], не нашло применения в промышленности в связи с тем, что пока не найдено дешевого, экологически чистого связующего компонента, способного обеспечить высокую влагостойкость брикетов [17, 26].

Большинство стандартов различных стран запрещают применение связующих для изготовления брикетов (пеллет), поскольку содержат жесткие экологические требования по выбросам (диоксида углерода, оксидов серы и азота, сажи и других токсичных газов) при сжигании, а также по количеству золы и ее плавкости [27].

Известен способ производства древесных пеллет, где гранулирование выполняется прокаткой рассыпного сырья, подаваемого из бункера, закрепленного на раме, посредством открытия задвижки двумя коническими вальцами, закрепленными на приводном валу с возможностью вращения, имеющими гладкую поверхность, что позволяет равномерно захватывать корм по всему радиусу матрицы с прямыми режущими кромками ячеек, жестко установленной в обойме рамы и зажатой кольцом посредством его ввинчивания, а в нижней части приводного вала, приводящегося в движение электродвигателем через клиноременную передачу и редуктор, находящегося под матрицей, установлена система регулирования зазора, состоящая из упорного подшипника и гайки, а также подрезной нож, закрепленный гайкой [28].

Недостатком известного способа является недостаточная механическая прочность пеллет.

Предлагается технология производства древесных пеллет, покрытых тонкой пленкой полиэтилена. Грубое дробление обрезков древесины осуществляли с помощью барабанной рубильной машины РБ-55 до размеров, не превышающих 1,25 куб. см. Сушку выполняли в сушилке барабанного типа. В результате влажность материала находилась в пределах 8-12%. Измельчение древесного сырья выполняли в дробилке молоткового типа МД 2×2 до размера не более 25 миллиметров в длину и ширину и двух миллиметров в толщину. Прессование осуществляли в пресс-грануляторе (рис. 1). После прессования выполняли охлаждение с помощью вентилятора.

Пресс-гранулятор работает следующим образом. Включают электродвигатель 1 пресса-гранулятора, который через клиноременную передачу 2 и редуктор 3 приводит во

вращательное движение приводной вал 4, накопленное в бункере 5, закрепленном на раме 6, рассыпное древесное сырье подается посредством плавного открытия задвижки 7. Далее подают питание к нагревателям 8. Нагреватели 8 нагревают плиту 9 с отверстиями 10, совпадающими с отверстиями матрицы 11. Диаметр отверстий 10 несколько больше диаметра отверстий матрицы 11. В лаборатории определяют температуру плавления конкретных отходов полиэтилена согласно стандарту «ГОСТ 21553-76 Пластмассы. Методы определения температуры плавления».

Температура плавления полиэтилена в зависимости от плотности находится в пределах от 105 до 146⁰С [12]. После прогрева плиты 9 до температуры плавления полиэтилена в полость 12, расположенную между матрицей 11 и плитой 9, под давлением с помощью экструдера 13 подают расплавленный полиэтилен. При заполнении полости 12 экструдер 13 отключают. Рассыпное сырье, попадая на матрицу 11, уплотняется и продавливается в ячейки 16 двумя коническими вальцами 17, закрепленными на приводном валу 4. В нижней части приводного вала 4 установлена система регулирования зазора, состоящая из упорного подшипника 18 и гайки 19. Так как ячейки 16 имеют прямые режущие кромки 20, то уплотненное сырье сразу проходит через ячейки 16 матрицы 11 и при избыточном его количестве не происходит продольного сдвига сырья по плоскости матрицы 11. Пеллеты из матрицы 11 перемещаются в полость 12. При этом включают экструдер 13 и под давлением подается расплавленный полиэтилен из плохо обработанных отходов. Давление, создаваемое экструдером 13, не позволяет пеллетам разрушаться и изменять направление перемещения. Перемещаясь через расплавленный полиэтилен, находящийся в полости 12, пеллеты покрываются слоем полиэтилена. При перемещении пеллет через плиту 9 лишний слой полиэтилена срезается. На выходе из матрицы 11 покрытые тонким слоем пеллеты подрезаются ножом 21, закрепленным гайкой 22.

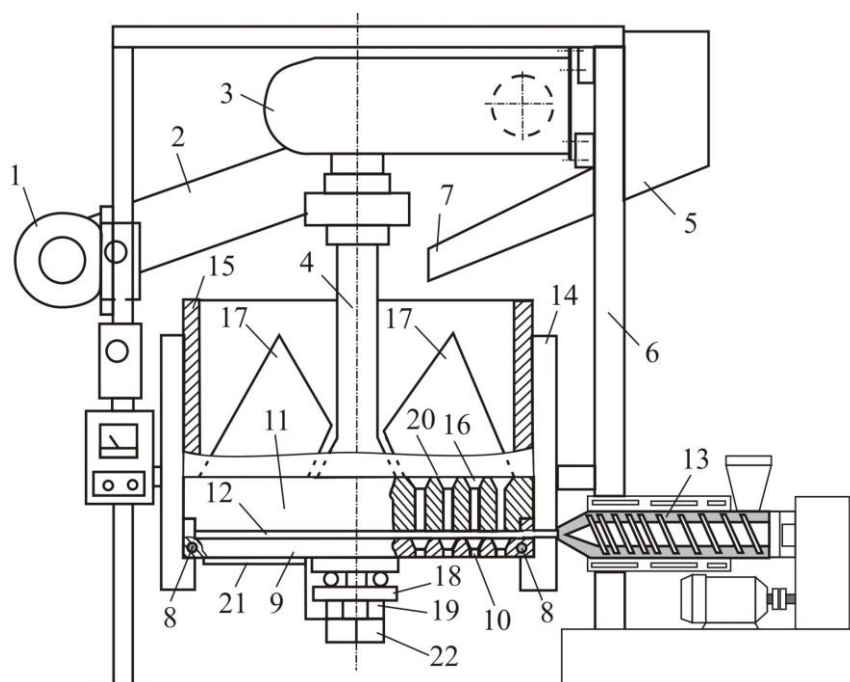


Рис. 1. Пресс-гранулятор для изготовления пеллет покрытых тонкой полиэтиленовой пленкой

Для характеристики механической прочности пеллет приняты специальные показатели истираемости, определяемые на пеллет-тестере [29]. Испытания выполняли согласно стандарту ГОСТР 55110 – 2012 (EN 15210-1) «Твердое биотопливо. Определение механической прочности гранул и брикетов. Часть 1: Пеллеты». Испытательный образец подвергают контролируемому удару путем столкновения пеллет друг с другом и со стенками специальной вращающейся камеры. Прочность рассчитывают исходя из массы образца, оставшегося после истирания и отделения тонких сломанных частиц. В результате испытания максимальное среднее значение механической прочности пеллет из древесины сосны диаметром 6 мм составило – 97,3%, а покрытых тонким слоем полиэтилена – 99,5%.

Оптическим контролем установлена толщина покрытия. Она составила 0,5 мм. Торцы пеллет покрыты полиэтиленом, микротрещины и микропоры заполнены полиэтиленом.

Цельная древесина увеличивает свою влажность на 25% за двое суток, а сыпучая древесина на 28% за одни сутки. Наиболее

интенсивное поглощение наблюдается в интервале от 0 до 12%, и различие в поглощении влаги цельной древесиной и измельченной продолжает быть заметным до влажности 16-17%. В интервале влажности от 18 до 26% динамика поглощения влаги оказывается одинаковой для обоих видов древесины [Использование древесных отходов http://www.promwood.com/byotoplyvo/othody_drova/2610.html]. В отличие от этих видов древесины пеллеты, покрытые полиэтиленом, увеличивают свою влажность на 0,02-0,04 % за 30 суток [12].

Выводы. 1. Рассмотрены методы повышение механической прочности пеллетного топлива из древесных отходов.

2. Усовершенствован способ производства пеллет с высокой механической прочностью из отходов древесины и полиэтилена путем применения модернизированного гранулятора.

3. Получены пеллеты, покрытые слоем полиэтилена толщиной 0,5 мм с механической прочностью 99,5%, гигроскопичностью 0,02-0,04%, за 30 суток. Положительными сторонами этих пеллет является то, что они не будут разрушаться при хранении и транспортировке, при погрузке и выгрузке

сократится эмиссия разных мелкодисперсных твердых частиц в атмосферу, при хранении нет необходимости соблюдать специальные условия, уменьшится выделение ядовитого монооксида углерода во время хранения, при обращении с древесными гранулами не будет выделяться мелкая пыль, которая может привести к взрыву.

4. Полученные пеллеты наиболее эффективно могут быть использованы для получения синтез-газа газификацией.

Список источников

1. Колесникова А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук. – 2013. – № 33. – С. 116-120. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-drevesnyh-othodov-na-predpriyatiyah-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii>.
2. Чижевская Д.Ю. Особенности эксплуатации и сервиса автомобилей, работающих на генераторном газе, полученном при переработке бытовых отходов / Л.А. Губачева, И.В. Макарова, Д.Ю. Чижевская, А.А. Андреев // Технический журнал «АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное Топливо». – 2020. – №11. – С. 515-522.
3. Шевченко Д.Ю. Направление работ по усовершенствованию газогенераторных установок для промышленного транспорта // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – 2010. – Ч. 1. – № 9 (198). – С. 254–261.
4. Зубакин А.С., Киприянов Ф.А. Обзор основных технических средств для получения генераторного газа // Universum: технические науки. – 2017. – №2 (35). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-osnovnyh-tehnicheskikh-sredstv-dlya-polucheniya-generatornogo-gaza>.
5. Сычева Н.А., Хмызов И.А., Соловьева Т.В. Влияние режима гранулирования и состава топливных пеллет на их прочностные свойства // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2016. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhima-granulirovaniya-i-sostava-toplivnyh-pellet-na-ih-prochnostnye-svoystva>.
6. Судакова И.Г. Получение твёрдых биотоплив из растительных отходов (обзор) / И.Г. Судакова, Н.Б. Руденко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2015. – Т. 8. – № 4. – С. 499-513.
7. Передерий С. Больше пеллет – чище атмосфера. ЛесПромИнформ. – 2017. – №2(124). – С. 133-137.
8. Антропов А.П. Новые технологии распределённой энергетики / А.П. Антропов, В.М. Батенин, В.М. Зайченко // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т.53. – №1. – С. 111.
9. Saskia Gauthier, Hildegard Grass, Martin Lory, Thomas Krämer, Michael Thali, Christine Bartsch Lethal Carbon Monoxide Poisoning in Wood Pellet Storerooms—Two Cases and a Review of the Literature // The Annals of Occupational Hygiene. – Vol. 56. – Is. 7. – August 2012. – P. 755-763. URL: <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes047>.
10. Хедлунд Ф.Х., Астад Дж., & Николс Дж. Неотъемлемые опасности, плохая отчетность и ограниченное обучение в секторе энергетики на твердой биомассе: пример колесного погрузчика, воспламенившего древесную пыль, что привело к взрыву со смертельным исходом на предприятии по производству древесных пеллет. // Биомасса и биоэнергия производитель пеллет. – 2014. – С. 450-459. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.039>.
11. Переработка полиэтилена: технология, оборудование, продукция. <https://этна-регионы.рф/utilizaciya/pererabotka-pvd.html>.
12. Молчанов Ю.М. Физические и механические свойства полиэтилена, полипропилена и полиизобутилена [Текст]: Справочник / АН Латв. ССР. Ин-т механики полимеров. – Рига: Зинатне, 1966. – 439 с.
13. Чижевская Д.Ю. Совершенствование автомобильного газогенератора, газифицирующего биомассу и отходы полиэтилена / Л.А. Губачева, Д.Ю. Чижевская, А.А. Андреев, // Технический журнал «АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное Топливо». – 2020. – № 5. – С. 230-237.
14. Фридланд С. В., Тазмеев А. Х., Мифтахов М. Н. Получение синтез-газа плазмохимической переработкой полимерных отходов // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – №6. – С. 10-15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-sintez->

gaza-plazmohimicheskoy-pererabotkoy-polimernykh-othodov.

15. Пат. 2213766 C1 RU, МПК С 10 J 3/18, 3/20, С 10 G 15/12 Способ получения синтез-газа из отходов пластмасс и устройство для его осуществления / Багрянцев Г.И., Ващенко С.П., Лукашов В.П., КИМ Чеол-Гью, ПАК Хьон Сео., патентообладатель Институт теоретической и прикладной механики СО РАН; – № 2002116313/04; заявл. 17.06.2002; опубл. 10.10.2003.

16. Сычева Н.А., Хмызов И.А., Соловьева Т.В. Влияние режима гранулирования и состава топливных пеллет на их прочностные свойства // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2016. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhima-granulirovaniya-i-sostava-toplivnyh-pellet-na-ih-prochnostnye-svoystva>.

17. Микспеллеты и пеллеты из недревесного сырья / С. Передерий // ЛесПромИнформ. – 2017. – №3 (125). – С.170-178.

18. Любов В.К. Совместное сжигание каменного угля с биотопливом / В.К. Любов, А.Е. Ивуть // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – №5(74). – С.16-20.

19. Зайченко В.М. Применение технологии низкотемпературного пиролиза к биотопливу / В.М. Зайченко, Ю.С. Кузьмина, Г.А. Сычев // Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований. – 2016. – С. 196-198.

20. Kleinschmidt C.P. Overview of international development in torrefaction / C.P. Kleinschmidt // Torrefaction Workshop. – 2011. – 9 p.

21. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития. Научный аналитический обзор / С.Г. Митин, Л.С. Орси́к, Н.Т. Сорокин, В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин, Ю.Л. Колчинский, Э.Л. Аронов, Е.П. Ши́лова, Т.А. Казинникова, Ю.Ф. Лачуга, М.Н. Ерохин, А.Ю. Изма́йлов. – М. Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (Правдинский). – 2007. – С. 204.

22. Передерий С. Как получить доход от свалок. Биотопливо из отходов гидролизных заводов ЛесПромИнформ. – 2021. – №3 (157). – С. 109-112.

23. Byoung J.A. Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from Larix kaemferi C. and Liriodendron / J.A. Byoung, C. Hee-sun, M. L. Soo [et. al.] // Renewable Energy. – 2014. – No. 62. – P. 18–23.

24. Pat. UA 95423 (C2) IPC C10L5/48; Y02E50/10; Y02E50/30 Process for preparation of solid fuel and solid fuel / I.Y. Tsyhankov, M.O. Sahalevych; priority 20.10.2010; publication 25.07.2011.

25. Pat. US 8337756 C10L5/44 Solidification processing method and solidification processing apparatus / Yoshikazu Kobayashi; publ. 25.12.2012.

26. Альберг Н.И. Комплексное устойчивое управление отходами. Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность / Н.И. Альберг, С.Е. Санжиева, С. Салхофер. – М.: Издательский дом Академии Естествознания. – 2016. – 308 с.

27. Khitrin K.S., Fuks S.L., Khitrin S.V., et.al. Lignin utilization option and methods // Russian Journal of General Chemistry. – 2012. – Vol. 82. – No 5. – P. 977-984.

28. Пат. 2055463 C1 RU, МПК А 01 F 15/00 Пресс-гранулятор / Харченко Н.Н., Васюкова В.С., Соловьева Е.В., патентообладатель Краснодарский политехнический институт; – № 5058751/15; заявл. 14.08.1992; опубл. 10.03.1996.

29. Передерий С. ЛесПромИнформ. – 2015. – №4 (110). – С.134-137.

References

1. Kolesnikova A. V. Analysis of the formation and use of wood waste at enterprises of the forest industry complex of Russia // Current issues of economic sciences. – 2013. – No. 33. – P. 116-120. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-drevesnyh-othodov-na-predpriyatiyah-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii>.

2. Chizhevskaya D. Yu. Features of operation and maintenance of cars running on generator gas obtained during the processing of household waste / L. A. Gubacheva, I. V. Makarova, D. Yu. Chizhevskaya, A. A. Andreev // Technical journal "AutoGasFilling Complex + Alternative Fuel". – 2020. – No. 11. – P. 515 – 522.

3. Shevchenko D.Yu. Direction of works on improvement of gas generator units for industrial transport // Bulletin of V. Dahl Eastern Ukrainian National University. – 2010. – Part 1. – No. 9 (198). – P. 254–261.

4. Zubakin A.S., Kipriyanov F.A. Review of the main technical means for obtaining generator gas // *Universum: technical sciences.* – 2017. – No. 2 (35). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-osnovnyh-tehnicheskikh-sredstv-dlya-polucheniya-generatornogo-gaza>.
5. Sycheva N.A., Khmyzov I.A., Solovieva T.V. Influence of granulation mode and composition of fuel pellets on their strength properties // *Bulletin of MGUL – Lesnoy Vestnik.* 2016. – No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhima-granulirovaniya-i-sostava-toplivnyh-pellet-na-ih-prochnostnye-svoystva>.
6. Sudakova I.G. Obtaining solid biofuels from plant waste (review) / I.G. Sudakova, N.B. Rudenko // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry.* – 2015. – Vol. 8, No. 4. – P. 499-513.
7. Perederiy S. More pellets - cleaner atmosphere. *LesPromInform.* - No. 2 (124) 2017. – P. 133-137.
8. Antropov A.P. New technologies of distributed energy / A.P. Antropov, V.M. Batenin, V.M. Zaychenko // *High Temperature Thermal Physics.* – 2015. – Vol. 53. – No. 1. – P. 111.
9. Saskia Gauthier, Hildegard Grass, Martin Lory, Thomas Krämer, Michael Thali, Christine Bartsch Lethal Carbon Monoxide Poisoning in Wood Pellet Storerooms—Two Cases and a Review of the Literature *The Annals of Occupational Hygiene*, Volume 56, Issue 7, August 2012, Pages 755–763, <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes047>.
10. Hedlund F. H., Astad J., & Nichols J. Inherent hazards, poor reporting and limited training in the solid biomass energy sector: a case study of a wheel loader igniting wood dust leading to a fatal explosion at a wood pellet plant. *Biomass and Bioenergy Pellet Manufacturer.* 2014. – P. 450-459. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.039>.
11. Polyethylene processing: technology, equipment, products. URL: <https://етна-генеры.рф/uzilizaciya/pererabotka-pvd.html>.
12. Molchanov Yu. M. Physical and mechanical properties of polyethylene, polypropylene and polyisobutylene [Text]: Handbook / Academy of Sciences of the Latvian SSR. Institute of Polymer Mechanics. – Riga: Zinatne, 1966. – 439 p.
13. Chizhevskaya D.Yu. Improvement of an automobile gas generator gasifying biomass and polyethylene waste / L.A. Gubacheva, D.Yu. Chizhevskaya, A.A. Andreev, // *Technical journal "AvtoGazoZapravochny Kompleks + Alternative Fuel"*. – 2020. – No. 5. – P. 230-237.
14. Fridland S. V., Tazmeev A. Kh., Miftakhov M. N. Production of synthesis gas by plasma-chemical processing of polymer waste // *Bulletin of the Kazan Technological University.* – 2006. – No. 6. – P. 10-15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-sintez-gaza-plazmohimicheskoy-pererabotkoy-polimernyh-otodov>.
15. Patent. 2213766 C1 RU, IPC C 10 J 3/18, 3/20, C 10 G 15/12 Method for producing synthesis gas from plastic waste and device for its implementation / Bagryantsev G.I., Vaschenko S.P., Lukashov V.P., KIM Cheol-Gyu, PAK Hyun Seo., patent holder Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS; – No. 2002116313/04; declared 17.06.2002; published 10.10.2003.
16. Sycheva N.A., Khmyzov I.A., Solovieva T.V. Influence of the granulation mode and composition of fuel pellets on their strength properties // *Bulletin of MGUL – Lesnoy Vestnik.* – 2016. – No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhima-granulirovaniya-i-sostava-toplivnyh-pellet-na-ih-prochnostnye-svoystva>.
17. Mixpellets and pellets from non-wood raw materials / S. Perederiy // *LesPromInform.* – 2017. – No. 3 (125). – P. 170-178.
18. Lyubov V.K. Co-combustion of coal with biofuel / V.K. Lyubov, A.E. Ivut // *Bulletin of Cherepovets State University.* - 2016. - No. 5 (74). - P. 16-20.
19. Zaychenko V.M. Application of low-temperature pyrolysis technology to biofuel / V.M. Zaychenko, Yu.S. Kuzmina, G.A. Sychev // *Fundamental and applied problems of mathematics, informatics in modern science: theory and practice of current research.* – 2016. – P. 196-198.
20. Kleinschmidt C.P. Overview of international development in torrefaction / C.P. Kleinschmidt // *Torrefaction Workshop.* – 2011. – 9 p.
21. Bioenergetics: world experience and forecasts pdevelopment. Scientific analytical review. / S.G. Mitin, L.S. Orsik, N.T. Sorokin, V.F. Fedorenko, D.S. Buklagin, Yu.L. Kolchinsky, E.L. Aronov, E.P. Shilova, T.A. Kazinnikova, Yu.F. Lachuga, M.N. Erokhin, A.Yu. Izmailov. –: M. Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex (Pravdinsky). – 2007. – P. 204.
22. Perederiy S. How to Get Income from Landfills. Biofuel from Waste from Hydrolysis Plants *LesPromInform.* – No. 3 (157)2021. – P. 109-112.
23. Byoung, J. A. Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from Larix

kaemferi C. and Liriodendron / J. A. Byoung, C. Hee-sun, M. L. Soo [et. al.] // Renewable Energy. – 2014. – No. 62. – P. 18–23.

24. Pat. UA 95423 (C2) IPC C10L5/48; Y02E50/10; Y02E50/30 Process for preparation of solid fuel and solid fuel / I.Y. Tsyhankov, M.O. Sakhalevich; priority 10/20/2010; publication 07/25/2011.

25. Pat. US 8337756 C10L5/44 Solidification processing method and solidification processing apparatus / Yoshikazu Kobayashi; publ. 25.12.2012.

26. Ahlberg, N.I. Integrated sustainable waste management. Woodworking and pulp and paper industry / N.I. Ahlberg, S.E. Sanzhieva, S. Salhofer.

– Moscow: Publishing house of the Academy of Natural Sciences, 2016. – 308 p.

27. Khitrin K.S., Fuks S.L., Khitrin S.V., et.al. Lignin utilization option and methods // Russian Journal of General Chemistry. – 2012. – Vol. 82. – N5. – P. 977-984.

28. Patent. 2055463 C1 RU, IPC A 01 F 15/00 Granulator / Kharcheno N.N., Vasyukova V.S., Solovieva E.V., patent holder Krasnodar Polytechnic Institute; – No. 5058751/15; declared. 14.08.1992; published. 10.03.1996.

29. Perederiy S. LesPromInform. – No. 4 (110)'2015. – P. 134-137.

Статья поступила в редакцию 25.10.2024

Информация об авторах

Замота Тарас Николаевич, д.техн.н, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118

E-mail: zamota71@gmail.com

Чижевская Дарья Юрьевна, к.т.н., доцент, заместитель директора института транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550

E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Никитин Юрий Николаевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры транспортных технологий Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Корженевская Мария Викторовна, ассистент кафедры автомобильного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Information about the authors

Zamota Taras Nikolaevich, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automobile Transport Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118

E-mail: zamota71@gmail.com

Chizhevskaya Darya Yuryevna, Ph.D. (Eng.), Assoc. Prof., Deputy Director of the Institute of Transport and Logistics of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550

E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Nikitin Yuri Nikolaevich, Ph.D. (Eng.), Assoc. Prof., Department of transport technologies of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Korzhenevskaya Maria Viktorovna, assistant professor, Department of automobile transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Для цитирования:

Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю., Никитин Ю. Н., Корженевская М. В. Совершенствование способа гранулирования пеллетного топлива из отходов древесины и полиэтилена // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 67-77.

For citation:

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu., Nikitin Yu. N., Korzhenevskaya M. V. Improving the method of granulating pellet fuel from wood and polyethylene waste // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1(1). – P. 67-77.

УДК 621.926

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ УГЛЯ В КОЛЕНАХ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Ленич С. В., Прилуцкий И. С.

MODELING THE MOTION OF COAL PARTICLES IN THE ANGEL PIPES OF THE PNEUMATIC TRANSPORT MILLS

Lenich S. V., Priluckiy I. S.

Аннотация. Приведена конструкция и описан принцип действия разработанных пневмотранспортных измельчительных установок, позволяющих совмещать процессы измельчения и пневмотранспортирования сыпучих материалов. Проведено моделирование движения частиц антрацита в криволинейных потоках пневмотранспортных измельчительных установок. Определены траектории движения и скорости частиц в момент удара об отбойные элементы колен пневмотранспортных измельчительных установок.

Ключевые слова: моделирование, измельчение, криволинейный поток, пневмотранспорт, пылеприготовление.

Abstract. The developed device allows to combine the milling process and the pneumatic transport of dry materials. The modeling of coal particles motion in the curvilinear streams of the pneumatic transport mills was done. The trajectories of particles movement and their velocities in the moment of impact at the angle pipes dash elements of pneumatic transport mills were calculated. The character of anthracite particles motion in the angle pipe is determined by turn angle of the angle pipe, flow velocity and sizes of particles. There is a maximum size of anthracite particle $d = 100 \mu\text{m}$, greater than which the trajectory of particle is near to the straight line regardless of the angle pipe configuration and flow velocity. Anthracite particles with $d > 400 \mu\text{m}$ don't change the direction of motion in the angle pipes, their velocities in the moment of impact at the dash elements are roughly equal to the flow velocity.

Key words: modeling, milling, curvilinear stream, pneumatic transport, coal powder processing.

Введение. Запасы угля на Донбассе достаточны для обеспечения энергобезопасности региона и развития энергетики на несколько десятилетий. На большинстве тепловых электростанций преимущественно применяется энергетический уголь марок Т и А. Эффективность использования угля при факельном сжигании зависит от тонкости его помола, что в свою

очередь ведёт к дополнительным затратам энергии в системах пылеприготовления [1].

Одним из эффективных способов тонкого измельчения является удар частиц материала о размольную плиту или друг с другом. Данный способ измельчения присущ мельницам ударного действия (пневматическим, газоструйным, струйно-роторным и др.), основанным на пневматических методах.

К основным конструктивным и технологическим параметрам, влияющим на эффективность измельчения угля в пневматических мельницах, относятся размер частиц, скорость частиц в момент удара и угол атаки. В измельчительных камерах и узлах мельниц (в частности, коленах пневмотранспортных измельчительных установок) наблюдается криволинейный характер движения газа с измельчаемыми частицами.

В связи с этим актуальной становится проблема математического моделирования движения частиц в криволинейных потоках разрабатываемых пневмотранспортных измельчительных устройств.

Исследования последних лет в области рассматриваемой проблемы в большей своей части посвящены движению криволинейных потоков в циклонных и сепараторных устройствах, вихревых и циклонных камерах сгорания, вихревых смесителях и т.д. Вопросы, связанные с движением частиц угля в остроугольных коленах пневмотранспортных трубопроводов, исследователями практически не рассматривались. Необходимость в таком исследовании возникла в связи с изучением закономерностей процесса измельчения материалов в процессе их пневмотранспортирования [2].

Целью исследования является разработка математической модели движения частиц угля в коленах пневмотранспортных измельчительных установок в зависимости от их конструктивных и технологических параметров.

Результаты моделирования могут быть использованы при разработке инженерных методов расчёта основных параметров пневмотранспортных измельчительных установок.

Особенности конструкции пневмотранспортных измельчительных установок. Для создания экономичного способа приготовления угольной пыли может быть использована установка, осуществляющая

измельчение угля в процессе его пневмотранспортирования. Этот способ может быть реализован путем разгона частиц потоком воздуха и удара их об отбойные элементы колен пневмотранспортной измельчительной установки. При этом измельчение частиц материала, которое обычно относят к недостаткам пневмотранспорта, в данном случае играет положительную роль.

В качестве одного из вариантов конструктивного исполнения пневмотранспортной измельчительной установки предложено устройство в виде зигзагообразного измельчительного трубопровода. Устройство защищено Патентом Украины № 44274 [3]. Предложенный способ измельчения может быть реализован путем вставки пневмотранспортной измельчительной установки в линейную часть трубопроводов, которые транспортируют уголь.

На рис. 1 приведена пневмотранспортная измельчительная установка в виде зигзагообразного трубопровода. Исходный материал из загрузочного устройства 1 поступает в разгонную трубу 2, где подхватывается струей сжатого воздуха, выходящего из сопла 3. Частицы разгоняются до необходимой скорости и поступают в измельчительный трубопровод 4, где измельчаются при прохождении через колена 7. Измельчение материала происходит при ударе частиц об отбойные плиты 5. Измельченный продукт выносится воздушным потоком через выводную трубу 6.

Путь непрерывного движения материала в предлагаемом устройстве во много раз больше, чем в существующих пневматических мельницах. Степень измельчения регулируется скоростью потока, количеством колен и величиной угла поворотов зигзагообразной измельчительной трубы. Предлагаемое устройство конструктивно чрезвычайно просто и позволяет совместить процессы пневмотранспортирования и измельчения материала.

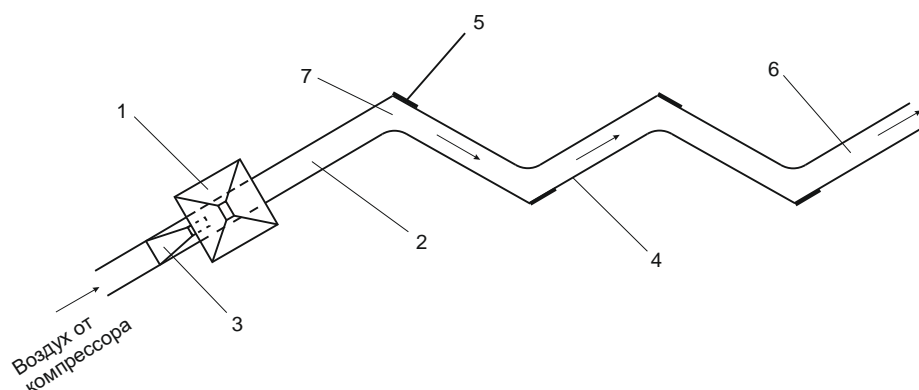


Рис. 1. Пневмотранспортная измельчительная установка в виде зигзагообразного трубопровода (вид сверху): 1 – бункер; 2 – разгонная труба; 3 – сопло; 4 – измельчительный трубопровод; 5 – отбойная плита; 6 – выводная труба; 7 – колено трубопровода

Следующим конструктивным вариантом пневмотранспортной измельчительной установки является вертикальный измельчительный змеевик, изображенный на рис. 2. Это устройство функционирует как самостоятельный измельчитель – без установки в линейную часть трубопроводов. Измельчаемый уголь может пропускаться через сепаратор для обогащения и накапливаться в разгрузочных устройствах (бункере и т.п.). Устройство защищено Патентом Украины № 101529 [4].

Исходный материал из загрузочного устройства 1 поступает в эжектор 2, в который подается сжатый воздух из сопла 3. Частицы измельчаемого материала, подхватываемые струей воздуха (газа), попадают в разгонную трубу 4, где разгоняются до необходимой скорости и поступают в П-образное колено 5 вертикального змеевика.

Измельчение материала происходит в П-образном колене 5 при ударе частиц об отбойную плиту 6. Измельченные частицы материала направляются для последующего измельчения в трубопровод благодаря подаче новой порции воздуха, поступающего из дополнительного сопла 7 для поддува воздуха. Материал опять разгоняется и измельчается в последующем П-образном колене 5. Процесс измельчения длится до получения необходимого размера частиц материала. Готовый продукт выносится воздушным потоком через выводную трубу 8 в разгрузочное устройство.

Выполнение П-образного колена 5 с проставкой, равной диаметру трубопровода ($l \approx D_{TP}$), и закругленными внутренними кромками способствует повороту потока почти без отрыва и с малыми потерями давления. Поэтому коэффициент сопротивления такого П-образного колена 5 будет минимальным.

Конструкция П-образного колена 5 в предлагаемом измельчителе позволяет материалу после измельчения под действием силы тяжести выводиться из зоны удара, что уменьшает проникновение отраженных частиц в набегающий поток. Наличие дополнительных сопел 7 для поддува воздуха в нижней части П-образных колен 5 препятствует завалу материала и увеличивает скорость аэросмеси после каждого поворота. Это приводит к увеличению кинетической энергии частиц при ударе об отбойные плиты 6 и повышению эффективности работы устройства в целом.

Степень измельчения регулируется скоростью потока и количеством П-образных колен змеевика.

При работе пневмотранспортных измельчительных установок в независимости от их конструктивного исполнения преобладающим является ударный способ измельчения. Опыт эксплуатации струйных мельниц показывает, что более 75% материала измельчается благодаря удару об отбойную плиту [5, 6]. Следовательно, отбойные плиты должны выполняться из высокопрочных материалов и с возможностью их замены.

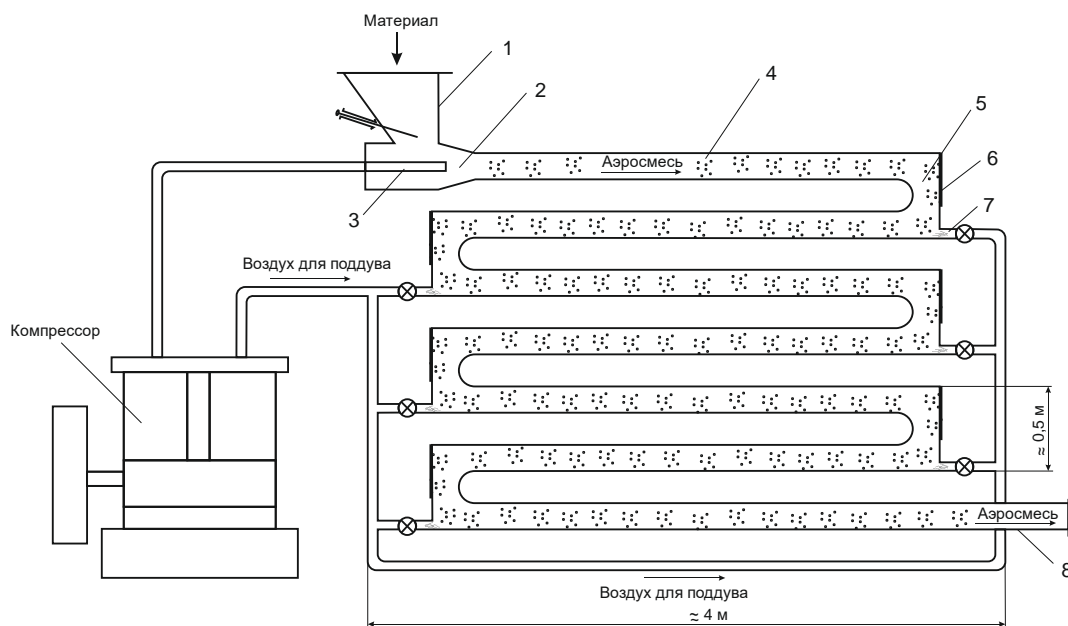


Рис. 2. Пневмотранспортная измельчительная установка в виде вертикального змеевика (общий вид): 1 – бункер; 2 – эжектор; 3 – сопло; 4 – разгонная труба; 5 – П-образное колено; 6 – отбойная плита; 7 – сопло для поддува воздуха; 8 – выводная труба

Удар как динамическая нагрузка приводит к более равномерной дефектности всего объема материала и является наиболее эффективным способом диспергирования при тонком измельчении. Установлено, что при минимальных величинах энергии необходимых для разрушения соударяемых тел, – формы уплотнения и разрушения такие же, как и при разрушении статической нагрузкой [7].

Скорость частиц $V_{\text{ч}}$ в момент удара об отбойную плиту и угол атаки α зависят от характера движения частиц и конфигурации колена трубопровода. Угол атаки α определяется траекторией движения частиц в колене.

Значение абсолютной скорости частиц в колене будет уменьшаться вследствие кривизны линий тока воздушного потока. На характер движения частиц, главным образом, влияют: размер, форма и физико-механические свойства частицы, её расположение в трубопроводе и скорость воздушного потока на входе в колено.

Таким образом, необходима разработка математической модели движения частиц угля в зависимости от конструктивных особенностей колен и технологических

параметров пневмотранспортной измельчительной установки.

Результаты исследования. При эксплуатации пневмотранспортных измельчительных установок в промышленных системах приготовления пылеугольного топлива характерными особенностями движения потока являются большие числа Рейнольдса при таких значениях давления жидкости или числа Маха, для которых движение рабочей среды соответствует развитому турбулентному [8].

В зависимости от количества твердых частиц в потоке различают потоки с малым и большим насыщением и перенасыщенные потоки. При малом насыщении – движение двухфазного потока определяется гидравлическими характеристиками движения жидкости. Это обстоятельство приводит к необходимости моделирования гидродинамических процессов движения однофазной среды при закрученном течении в коленах пневмотранспортных измельчительных установок с использованием точных моделей.

Предположение о том, что жидкость является сплошной средой, делает ненужным рассмотрение ансамблей молекул и позволяет

использовать уравнения движения, полученные Навье и Стоксом. Уравнения движения получены с учетом того, что физические свойства жидкости остаются неизменными, а поле внешних сил отсутствует. Поток – изотермический, то есть уравнение сохранения энергии убирается из системы.

Уравнения Навье-Стокса для однофазной сжимаемой среды задаются в нашем случае из уравнения сохранения массы и момента [9-11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\eta \left(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right) - \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right) + \mathbf{F}, \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

\mathbf{v} – вектор скорости, м/с;

p – давление, Па;

\mathbf{F} – вектор объёмных сил, Н/м³;

T – абсолютная температура, К;

η – динамическая вязкость, Па·с;

\mathbf{I} – единичный диагональный тензор.

Моделирование движения частиц выполнялось с предположением того, что они не влияют на движение основного потока и не сталкиваются между собой. Таким образом, после расчета поля скоростей основного потока определялись характеристики движения частиц с помощью второго закона Ньютона:

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{F}_p \left(t, \mathbf{x}, \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right), \quad (3)$$

где \mathbf{x} – перемещение частицы, м;

m – масса частицы, кг;

\mathbf{F}_p – сумма всех сил, действующих на частицу, Н.

На частицу действуют сила сопротивления, обусловленная разницей скоростей между жидкостью и частицей, и сила гравитации. Эмпирическое выражение для силы сопротивления движению сферических частиц в широком диапазоне чисел Рейнольдса примем в виде:

$$\mathbf{F}_p = \pi \frac{d^2}{4} \rho |\mathbf{v} - \mathbf{v}_q| (\mathbf{v} - \mathbf{v}_q) \left[1,84 \text{Re}_p^{-0,31} + 0,293 \text{Re}_p^{0,06} \right]^{3,45}, \quad (4)$$

где \mathbf{v}_q – скорость частицы, м/с;

d – диаметр частицы, м.

Число Рейнольдса для частицы определяется как:

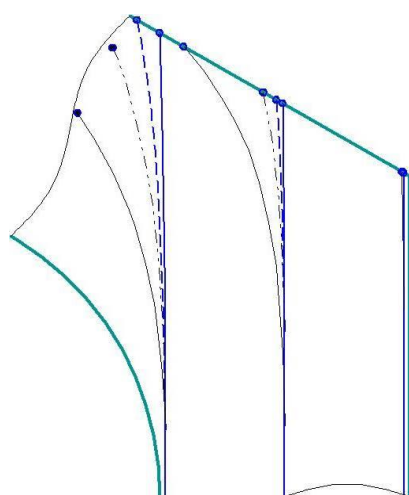
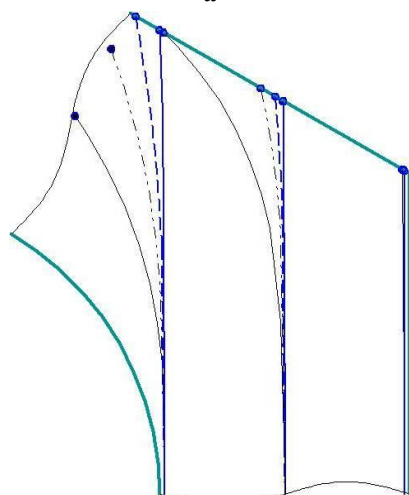
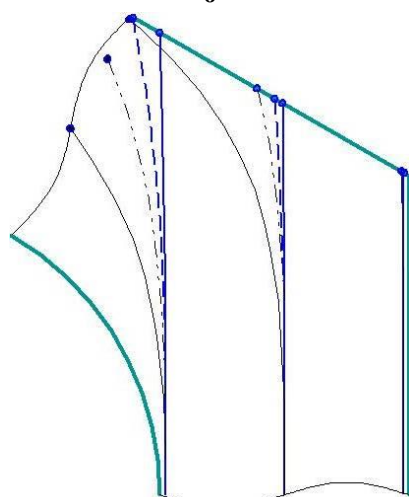
$$\text{Re}_p = \frac{|\mathbf{v} - \mathbf{v}_q| d \rho}{\eta}. \quad (5)$$

Как показывает практика, наиболее оптимальной моделью турбулентности является двухпараметрическая « k - ϵ » модель турбулентности, основанная на уравнивании в каждой точке генерации усредненных потоков энергии турбулентности диссипацией [8, 12].

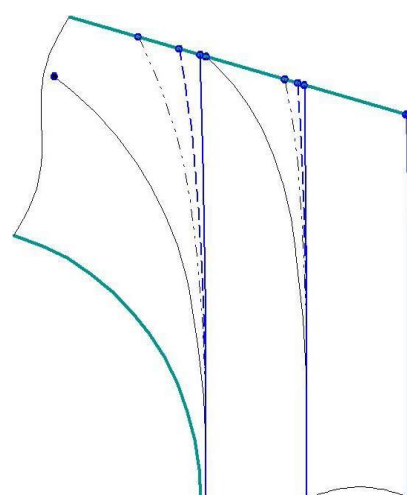
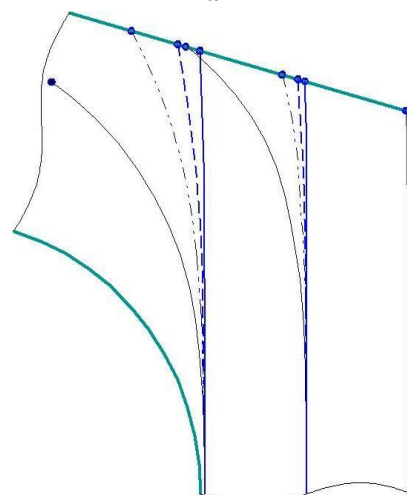
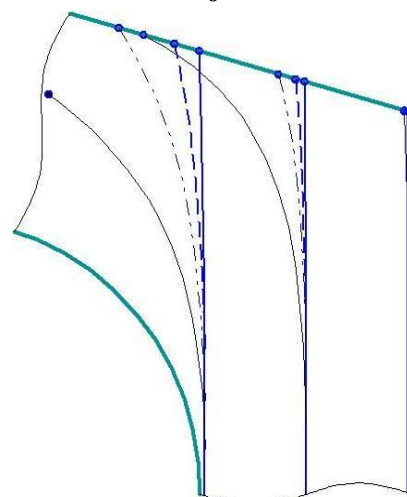
Поскольку приведенная система дифференциальных уравнений является эллиптической, то необходимо установить граничные условия на всех границах расчетной области. Для простоты задачи и программной реализации применим универсальные «жёсткие» граничные условия, позволяющие рассчитать поле течения. На твердых стенках принимается равенство нулю скорости в результате прилипания жидкости к стенкам $u_w = 0$; во входном сечении колена пневмотранспортной измельчительной установки задаются значения скорости движения потока воздуха V_{in} , полученные в результате экспериментальных исследований; в выходном сечении колена принимается равенство нулю статического давления $p_{out} = 0$.

На данный момент существует целый ряд программных продуктов для численного моделирования течений жидкостей и газов. Численное моделирование движения частиц в коленах пневмотранспортной измельчительной установки по приведенным выше формулам осуществлялось в среде программы «Comsol Multiphysics 4.2».

Рассматривались колена с размерами поперечного сечения 50×50 мм, углами поворота $\delta = 60, 75$ и 90° и со скоростями потока на входе $V_{in} = 50, 70$ и 90 м/с. В качестве твердой фазы были взяты частицы антрацита с плотностью $\rho_q = 1700$ кг/м³, размер частиц принят $d = 20, 50, 100$ и 400 мкм. Результаты моделирования траектории движения частиц приведены на рис. 3-5.

**а****б****в**Рис. 3. Траектория частиц в колене $\delta = 60^\circ$:а – $V_{in} = 90$ м/с; б – $V_{in} = 70$ м/с; в – $V_{in} = 50$ м/с

————— $d = 20$ мкм - - - - - $d = 50$ мкм
 - - - - - $d = 100$ мкм ————— $d = 400$ мкм

**а****б****в**Рис. 4. Траектория частиц в колене $\delta = 75^\circ$:а – $V_{in} = 90$ м/с; б – $V_{in} = 70$ м/с; в – $V_{in} = 50$ м/с;

————— $d = 20$ мкм - - - - - $d = 50$ мкм;
 - - - - - $d = 100$ мкм ————— $d = 400$ мкм

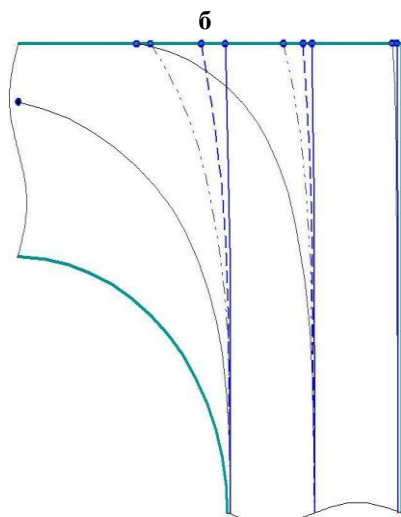
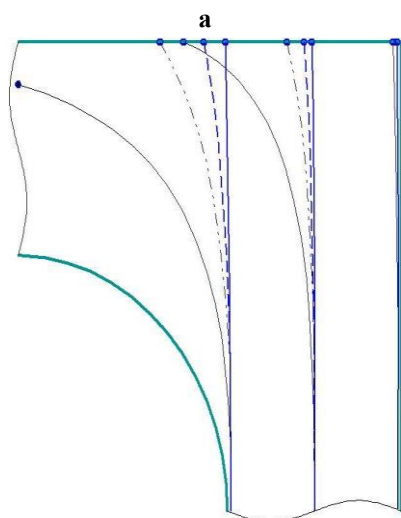
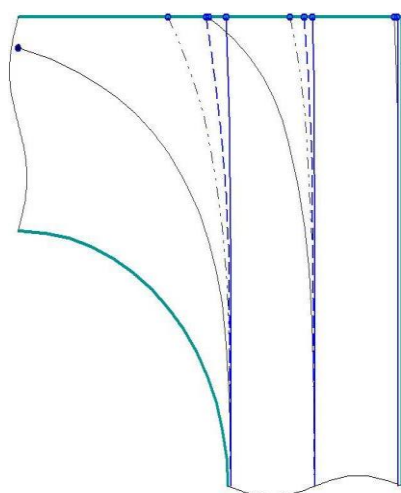


Рис. 5. Траектория частиц в колене $\delta = 90^\circ$:
 а – $V_{in} = 90$ м/с; б – $V_{in} = 70$ м/с; в – $V_{in} = 50$ м/с;
 — $d = 20$ мкм - - - $d = 50$ мкм
 - - - $d = 100$ мкм — $d = 400$ мкм

Как видно из рис. 3-5, частицы размером $d \leq 20$ мкм около внутренней стенки колена и в середине потока увлекаются линиями тока потока и их траектории искривлены. В итоге эти частицы ударяются об отбойный элемент вскользь или выносятся потоком из колена без удара.

Частицы $d \geq 100$ мкм в связи с большей массой и запасом кинетической энергии практически не меняют своей прямолинейной траектории. Угол атаки для таких частиц $\alpha = 90^\circ - \delta$.

Около внешней стенки в связи с малым искривлением линий тока все частицы ударяются об отбойный элемент без искривления траектории.

Рассчитанные траектории частиц хорошо согласуются с исследованиями движения частиц в криволинейных каналах циклонных устройств, проведенными А.И. Пирумовым и Д.С. Стельмахом в ЦНИИПЗ [13].

В момент удара об отбойный элемент положения частиц на рис. 3-5 отмечены точками, также фиксировалось положение частиц $d = 20$ мкм (около внутренней стенки) на вылете из колена. Для каждой из этих точек определялась абсолютная скорость частиц V_{imp} . Уменьшение скорости частиц в момент удара характеризуется относительной скоростью $\bar{U} = V_{imp} / V_{in}$. Зависимость относительной скорости \bar{U} от угла поворота колена δ и скорости потока на входе V_{in} представлено на рис. 6-8.

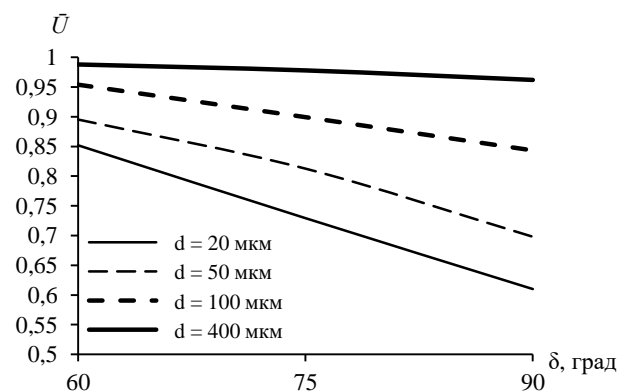
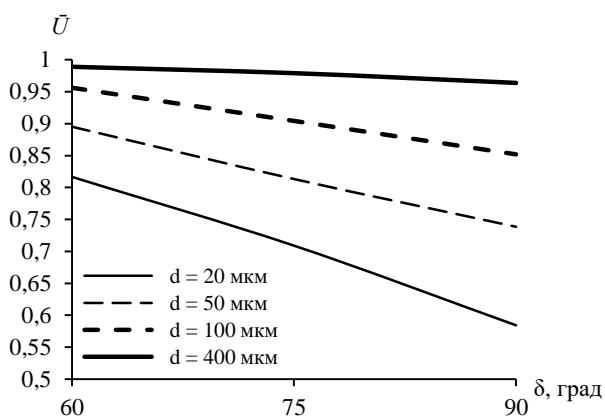
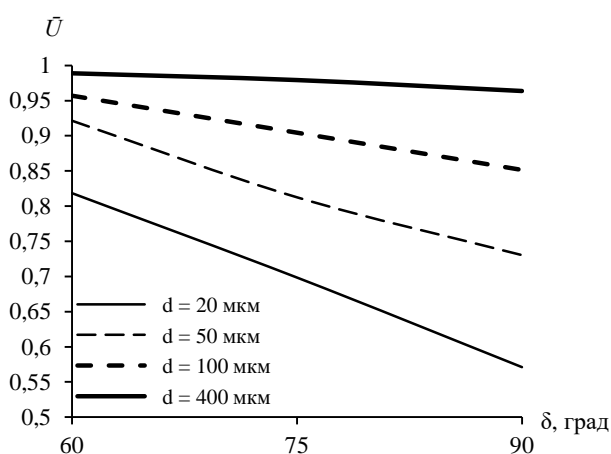


Рис. 6. График зависимости $\bar{U} = f(\delta)$ при $V_{in} = 50$ м/с

Рис. 7. График зависимости $\bar{U} = f(\delta)$ при $V_{in} = 70$ м/сРис. 8. График зависимости $\bar{U} = f(\delta)$ при $V_{in} = 90$ м/с

Как видно из рис. 6-8, с увеличением угла поворота колена δ относительная скорость частиц \bar{U} в момент удара уменьшается. Причем чем больше размер частицы, тем больше относительная скорость \bar{U} её движения. Так, для частиц с размером $d = 100$ мкм \bar{U} составляет 0,85...0,96; для $d = 400$ мкм – $\bar{U} = 0,96...0,99$. Для частиц большего размера – $\bar{U} \rightarrow 1$, что хорошо согласовывается с результатами, полученными другими авторами [14, 15].

Результаты моделирования движения частиц указывают на снижение эффективности измельчения антрацита тонкой фракции ($d < 50$ мкм) в интервале исследуемых скоростей. Частицы с размером $d \leq 20$ мкм выносятся потоком из колена без удара или ударяются об отбойный элемент вскользь и со скоростью, недостаточной для разрушения частицы. То есть после достижения некоторой крупности

частицы антрацита перестают измельчаться и можно ожидать их усреднение по определенному размеру.

В научной работе [16] также отмечается, что при ударном способе измельчения хрупких материалов в достаточно большом диапазоне скоростей разрушения почти неизменной остается доля узкой фракции частиц в области до 0,075-0,08 мм.

Для устойчивого воспламенения и горения угольная пыль из антрацита и тощего угля измельчается до остатка на сите $R_{90} = 6...9\%$. При этом основная масса пыли состоит из угольных частиц с размером 20-90 мкм. Многолетние исследования в области сжигания низкорекреационного твердого топлива показывают, что для эффективного его сжигания особенно важным становится получение пыли не столько с низким значением R_{90} , сколько однородным по фракционному составу [17, 18].

Таким образом, получение равномерной по фракционному составу 20-50 мкм угольной пыли в разработанной пневмотранспортной измельчительной установке будет способствовать более полному выгоранию частиц топлива, уменьшению шлакования топочных и конвекционных поверхностей нагрева и т.п.

Выводы. 1. Характер движения частиц угля в колене определяется углом поворота колена, скоростью движения потока и размером частиц.

2. Существует граничный размер частиц угля $d = 100$ мкм, больше которого траектория частицы вне зависимости от конфигурации колена и скорости потока близка к прямой линии.

3. Частицы угля $d > 400$ мкм не изменяют своего направления движения, их скорость в момент удара об отбойные элементы близка к скорости потока.

4. Полученные результаты моделирования показывают, что применение разработанной конструкции возможно при скоростях и крупности частиц, используемых в пневмотранспортных установках.

Список источников

1. Turushin V., Lenich S. An investigation of the process of anthracite particles destruction in percussion crushing machines // *Teka Kom. Mot. i Energ. Roln.* – OL PAN, 2010, 10B, p. 260-265.
2. Dmitrienko D., Lenich S. Modeling the motion of particles in the pneumatic transport mills // *Teka Kom. of Mot. and Energ. in Agr.* – 2012, Vol. 12, No 3. – P. 19-23.
3. Патент 44274 Україна, МПК (2009) кл. B02C 19/00, B02C 23/06. Подрібноувач / В. О. Турушин, Г. І. Нечаєв, С. В. Лєнич; заявл. 05.05.2009; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
4. Патент 101529 Україна, МПК (2013.01) кл. B02C 19/06, B02C 23/00. Газострумний подрібноувач / В. О. Турушин, С. В. Лєнич; заявл. 23.05.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.
5. Акунов В.И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчёта. – М.: Машиностроение. – 1967. – 264 с.
6. Ходаков Г.С. Физика измельчения. – М.: Наука. – 1972. – 307 с.
7. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Строительство, 1972. – 239 с.
8. Лєнич С.В. Совершенствование транспортной системы пылеприготовления путём измельчения угля при пневмотранспортировании: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Лєнич Сергей Васильевич. – Луганск: ЛГУ им. В. Даля, 2021. – 154 с.
9. G.K. Batchelor. An introduction to fluid dynamics. – Cambridge University Press, 1967.
10. G. Hauke and T.J.R. Hughes. A unified approach to compressible and incompressible flows // *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* – 1994 – vol. 113, pp. 389-395.
11. G. Hauke. Simple stabilizing matrices for the computation of compressible flows in primitive variables // *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* – 2001 – vol. 190, pp. 6881-6893.
12. Slater, S.A. & Young, J.B. The calculation of inertial particle transport in dilute gas-particle flows // *Intl J. Multiphase Flow* 27, 2001. – P. 61-87.
13. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Строй-издат, 1981. – 296 с.
14. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твёрдыми частицами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.
15. Контроль и автоматическое управление пылеподачей на ТЭС / Л.А. Кесова. – К.: Вища шк., 1991. – 142 с.
16. Дмитриева Л.А. Исследование процесса измельчения хрупких материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Дмитриева Любовь Анатольевна. – Иваново: ИГАСУ, 2006. – 165 с.
17. Лебедев А.Н. Подготовка и размол топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1969. – 520 с.
18. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.

References

1. Turushin V., Lenich S. An investigation of the process of anthracite particles destruction in percussion crushing machines // *Teka Kom. Mot. i Energ. Roln.* – OL PAN, 2010, 10B, p. 260-265.
2. Dmitrienko D., Lenich S. Modeling the motion of particles in the pneumatic transport mills // *Teka Kom. of Mot. and Energ. in Agr.* – 2012, Vol. 12, No 3. – P. 19-23.
3. Patent 44274 Ukraïna, MPK (2009) kl. B02C 19/00, B02C 23/06. Podribnjuvach / V. O. Turushin, G. I. Nechayev, S. V. Lenich; zayavl. 05.05.2009; opubl. 25.09.2009, Bjul. № 18.
4. Patent 101529 Ukraïna, MPK (2013.01) kl. B02C 19/06, B02C 23/00. Gazostruminnij podribnjuvach / V.O. Turu-shin, S.V. Lenich; zayavl. 23.05.2011; opubl. 10.04.2013, Bjul. № 7.
5. Akunov V.I. Strujnye mel'nicy. Jelementy teorii i raschjota. – M.: Mashinostroenie. – 1967. – 264 p.
6. Hodakov G.S. Fizika izmel'chenija. – M.: Nauka. – 1972. – 307 p.
7. Hodakov G.S. Tonkoe izmel'chenie stroitel'nyh mate-rialov. – M.: Stroitel'stvo, 1972. – 239 p.
8. Lenich S.V. Sovershenstvovanie transportnoj sistemy pyleprigotovlenija putjom izmel'chenija uglja pri pnevmotransportirovanii: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.22.01 / Lenich Sergej Vasil'evich. – Lugansk: LGU im. V. Dalja, 2021. – 154 p.
9. G.K. Batchelor. An introduction to fluid dynamics. – Cambridge University Press, 1967.
10. G. Hauke and T.J.R. Hughes. A unified approach to com-pressible and incompressible flows // *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* – 1994 – vol. 113, pp. 389-395.

11. G. Hauke. Simple stabilizing matrices for the computation of compressible flows in primitive variables // *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* – 2001 – vol. 190, pp. 6881-6893.

12. Slater, S.A. & Young, J.B. The calculation of inertial par-ticle transport in dilute gas-particle flows // *Intl J. Multi-phase Flow* 27, 2001. – P. 61-87.

13. Pirumov A.I. *Obespylivanie vozduha.* – M.: Strojizdat, 1981. – 296 p.

14. Varaksin A.Ju. *Turbulentnye techenija gaza s tvjordymi chasticami.* – M.: FIZMATLIT, 2003. – 192 p.

15. *Kontrol' i avtomaticheskoe upravlenie pylepodachej na TJeS* / L.A. Kesova. – K.: Vishha shk., 1991. – 142 p.

16. Dmitrieva L.A. *Issledovanie processa izmel'chenija hrupkih materialov: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.02.13* / Dmitrieva Ljubov' Anatol'evna. – Ivanovo: IGASU, 2006. – 165 p.

17. Lebedev A.N. *Podgotovka i razmol topliva na jelek-trostancijah.* – M.: Jenergija, 1969. – 520 p.

18. Levit G.T. *Pyleprigotovlenie na teplovyh jelektro-stancijah.* – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 384 p.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024

Информация об авторах

Ленич Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортные технологии» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 7101-0408, AuthorID: 1240916
E-mail: mouselenich@yandex.ru

Прилуцкий Иван Сергеевич, студент группы ТЛ-531м института «Транспорт и логистика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: Bmwpsn2001@gmail.com

Information about the authors

Lenich Sergey Vasil'evich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department "Transport technologies" Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
SPIN-код: 7101-0408, AuthorID: 1240916
E-mail: mouselenich@yandex.ru

Priluckiy Ivan Sergeevich, student of the group TL-531m of the Institute "Transport and Logistics" Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: Bmwpsn2001@gmail.com

Для цитирования:

Ленич С. В., Прилуцкий И. С. Моделирование движения частиц угля в коленях пневмотранспортных измельчительных установок // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 78-87.

For citation:

Lenich S. V., Priluckiy I. S. Modeling the motion of coal particles in the angel pipes of the pneumatic transport mills // *Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences.* – 2024. – № 1(1). – P. 78-87.

УДК 656.025

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕНТРОВ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В УЛИЧНО-ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Чижевская Д. Ю., Ветерцовский В. Н., Синчишен А. А.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING TRAFFIC MANAGEMENT CENTERS IN URBAN STREET CONDITIONS

Chizhevskaya D. Y., Vettsovsky V. N., Sinchishen A. A.

Аннотация. В статье проведен анализ применения центров организации дорожного движения (ЦОДД) в снижении количества заторов и повышении безопасности на дорогах за счет уменьшения ДТП. Оценены ключевые показатели, такие как среднее время поездок, уровень аварийности и рентабельность ЦОДД, на примере крупных мегаполисов Москвы, Казани и Екатеринбурга. Представлены результаты сокращения задержек и снижения ДТП. Рассчитана экономическая эффективность применения ЦОДД. Обоснована эффективность интеграции ЦОДД с интеллектуальными транспортными системами.

Ключевые слова: центры организации дорожного движения, городской транспорт, снижение заторов, безопасность дорожного движения, интеллектуальные транспортные системы, эффективность.

Abstract. The article analyzes the use of traffic management centers (data centers) in reducing congestion and improving road safety by reducing accidents. The key indicators are estimated: average travel time, accident rate and profitability of data centers, using the example of large megacities of Moscow, Kazan and Yekaterinburg. The results of reducing delays and reducing accidents are presented. The economic efficiency of the data center application is calculated. The efficiency of data center integration with intelligent transport systems is substantiated.

Key words: traffic management centers, urban transport, congestion reduction, road safety, intelligent transport systems, efficiency.

В целях улучшения условий движения транспорта на улично-дорожной сети города, а также оптимизации режима светофорных объектов в настоящее время ведется исследование работы с автоматизированной системой управления дорожным движением, включающей в себя управляемые дорожные знаки, динамические информационные табло, датчики транспортных потоков, видеокамеры, адаптивные светофоры и другие технические средства сбора и обработки данных. Так на

примере московского центра организации дорожного движения АСУДД ТТК интегрируется в общегородскую систему управления движением «СТАРТ».

Создано московское ЦОДД в соответствии с постановлением Правительства Москвы № 1129 от 07.12.99 «О создании центра организации дорожного движения», постановлением Правительства Москвы от 14.06.05 № 438-ПП «О мерах по улучшению эксплуатации и содержания технических

средств организации дорожного движения в городе Москве» и Постановлением Правительства Москвы от 28.02.06 № 131-ПП «Об улучшении условий эксплуатации и повышении надёжности работы светофорных объектов в городе Москве», постановлением Правительства Москвы от 04.07.06г. № 470-ПП «Об обеспечении хозяйственно-производственной деятельности Государственного учреждения города Москвы – Центра организации дорожного движения Правительства Москвы».

Таким образом, применение автоматизированных систем управления дорожным движением, внедрение интеллектуальных систем в условиях растущего количества транспортных средств является основным направлением обеспечения функционирования транспортного комплекса города [1].

Логическим развитием АСУДД является создание интеллектуальной транспортной системы (ИТС), которая позволит увеличить пропускную способность городской транспортной системы; моделировать и оценивать влияние на транспортную систему города новых транспортных объектов, объектов жилищного и делового строительства, схем организации движения, а также выработать наиболее эффективные решения при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Опыт ЦОДД в таких городах, как Казань, Екатеринбург, а также в многих крупных

мегаполисах мира показывает, что внедрение интеллектуальной транспортной системы позволяет решать задачи по увеличению пропускной способности улично-дорожной сети; перераспределению транспортных потоков с загруженных магистралей на магистрали с более низкой интенсивностью движения; увеличению средних скоростей движения; улучшению экологической обстановки и снижению негативных последствий на окружающую среду от автомобильного транспорта; информированию участников движения об условиях движения транспорта на улично-дорожной сети города.

Центр организации дорожного движения (ЦОДД) – это подведомственная организация департамента транспорта, которая занимается планированием, подготовкой, координацией управления транспортными потоками и организацией улично-дорожной сети, а также обеспечением безопасности дорожного движения. К средствам сбора и обработки информации о дорожном движении можно отнести, например, адаптивные светофоры и системы видеомониторинга. В действительности ЦОДД может быть оснащена различными устройствами, что во многом зависит от финансирования проекта.

Адаптивные светофоры – это светофорные объекты, которые самостоятельно мониторят дорожную ситуацию и адаптируются на основании поступающих к ним данных.

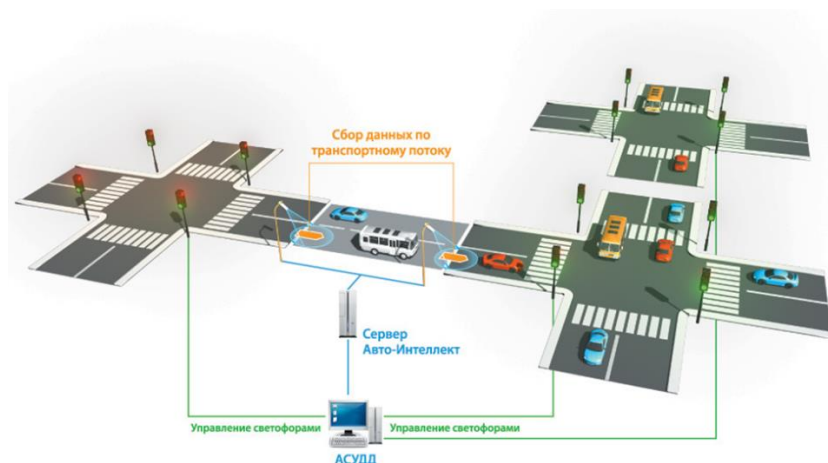


Рис. 1. Принцип работы адаптивных светофоров

На рис. 1 изображена работа адаптивного светофора. Информацию о транспортном потоке светофоры получают с помощью индукционных петель или датчиков, вмонтированных в дорожное полотно на перекрёстке. Это оборудование позволяет определять не только плотность потока, но и тип автомобиля, подъезжающего к перекрёстку, в том числе выделять из потока общественный транспорт [2].

Системы видеомониторинга – это совокупность технических средств и организационных решений, направленных на создание гибкой и доступной системы видеоконтроля, видеозаписи. Они фиксируют происходящее в реальном времени и передают изображение на монитор или на сервер для хранения.



Рис. 2. Работа систем видеомониторинга в режиме реального времени

Принцип работы систем видеомониторинга подразумевает визуальный контроль заданной области пространства при помощи одной или нескольких видеокамер. А также они позволяют сохранять и просматривать цифровые видеоданные, а также постоянно оценивать состояние контролируемой территории, выделяя охранные события, заключающиеся в тех или иных изменениях наблюдаемой обстановки.

Благодаря полученным данным от адаптивных светофоров и систем видеомониторинга ЦОДД обладает возможностью организации и координации транспорта, а именно:

- моделирование городских транспортных и пассажирских потоков;

- оценка существующих транспортных потоков, схем и стратегий организации дорожного движения [3];

- разработка рекомендаций по повышению эффективности и безопасности организации дорожного движения;

- сбор данных о дорожном движении, включая параметры транспортных и пассажирских потоков, дорожных условий, действующей организации дорожного движения, статистику ДТП, данные по парковкам и местам временного отстоя транспорта [3].

Немаловажным фактором является нахождение в ситуационном центре ЦОДД представителей всех транспортных ведомств и ГИБДД, что позволяет в режиме онлайн отражать ситуацию на всех столичных

магистралях и предпринимать оперативные меры в случае образования заторов в движении.

Принцип работы центра организации дорожного движения заключается в следующем: датчики и камеры собирают данные о трафике; аналитическая система

обрабатывает информацию и корректирует работу светофоров, перенаправляет потоки; при необходимости операторы ЦОДД вмешиваются в критических ситуациях (ДТП, ремонт дорог).

Характеристики ЦОДД в заданных городах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики центров организации дорожного движения

Параметр	Название города		
	Москва	Казань	Екатеринбург
Охват территории	80% дорожной сети	50% центральных улиц	35% магистралей
Ключевые технологии	Яндекс.Трафик, ИИ-камеры	Нейросетевое прогнозирование	Координация транспорта
Количество устройств	20 тыс. камер, 3 тыс. светофоров	5 тыс. камер, 800 светофоров	2 тыс. камер, 400 светофоров
Бюджет	480 млн руб.	220 млн руб.	180 млн руб.

В качестве исходных значений для расчетов используются данные о ДТП и расходе топлива из отчетов Минтранса и городских администраций, также время поездки рассчитано на основе данных Яндекс.Карт и GPS-трекеров общественного транспорта.

Определение возможности использования центров организации дорожного движения в рассматриваемых городах (Москва, Казань, Екатеринбург) рассчитывается по формулам.

Снижение времени поездки:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{до}} - T_{\text{после}}}{T_{\text{до}}} \times 100\%. \quad (1)$$

Сокращение ДТП:

$$\Delta A = \frac{A_{\text{до}} - A_{\text{после}}}{A_{\text{до}}} \times 100\%. \quad (2)$$

Экономическая эффективность:

$$\Xi = \frac{(S_{\text{дтп}} + S_{\text{топливо}}) - C}{C} \times 100\%. \quad (3)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов возможности внедрения ЦОДД

Город	Показатель	До внедрения	После внедрения	Δ (%)
Москва	Среднее время поездки (мин/км)	4,2	3,1	26
	Количество ДТП (год)	12540	10659	15
	Экономическая эффективность (%)	-	408	408
Казань	Среднее время поездки (мин/км)	3,8	3,1	18
	Количество ДТП (год)	2310	1894	18
	Экономическая эффективность (%)	-	18	18
Екатеринбург	Среднее время поездки (мин/км)	3,5	3,0	14
	Количество ДТП (год)	1850	1665	10
	Экономическая эффективность (%)	-	7	7

В результате исследования внедрение центров организации дорожного движения в Москве, Казани и Екатеринбурге

продemonстрировало значительное улучшение основных транспортных показателей, а именно:

1. Снижение заторов. В Москве среднее время поездки сократилось на 26%

(с 4.2 до 3.1 мин/км), а пиковая нагрузка на магистралях уменьшилась на 27% (с 850 до 620 автомобилей/час). Это достигнуто за счет адаптивных светофоров с алгоритмом «зеленой волны» на 40 магистралях и интеграции с Яндекс Картами, что позволило перенаправлять 15% трафика в реальном времени. В Казани время поездки сократилось на 18% (с 3.8 до 3.1 мин/км), а пиковая нагрузка – на 19% благодаря нейросетевому прогнозированию заторов. В Екатеринбурге оптимизация маршрутов общественного транспорта снизила среднее время поездки на 14% (с 3.5 до 3.0 мин/км).

2. Сокращение аварийности. Количество ДТП в Москве уменьшилось на 15% (с 12,540 до 10,659 случаев в год), включая снижение количества летальных исходов на 17% (с 210 до 175). В Казани количество аварийных ситуаций сократилась на 18% (с 2,310 до 1,894), а смертельных случаев – на 22% во многом благодаря автоматическим камерам, которые сократили время реакции служб до 2-3 минут. В Екатеринбурге внедрение ЦОДД привело к снижению ДТП на 10% (с 1,850 до 1,665), а также к уменьшению смертельных случаев на 10%.

3. Экономическая эффективность. Рентабельность (ROI) внедрения ЦОДД за один год составила 408% для Москвы, где экономия от снижения ДТП достигла 940.5 млн руб., а от сокращения расхода топлива – 1.5 млрд руб. В Казани ROI равен 18% (экономия 408 млн руб.), а в Екатеринбурге — 7% (192.5 млн руб.), что объясняется меньшим охватом дорожной сети (35% против 80% в Москве).

Также выявлены такие недостатки:

- высокая стоимость ЦОДД (до 480 млн руб. для Москвы);
- зависимость от ИТ-инфраструктуры. Пример: в Екатеринбурге сбой связи вызвал простой системы на 5 часов;
- дефицит квалифицированных кадров. Только 30% операторов в Казани прошли спецподготовку.

Выводы. Эффективность ЦОДД напрямую зависит от масштаба внедрения и технологической оснащенности. Москва, с

охватом 80% дорожной сети и интеграцией ИИ, показала экономическую эффективность 408%, тогда как Екатеринбург, сфокусированный на общественном транспорте, – лишь 7%. Однако даже минимальные меры (снижение заторов на 14%) подтверждают целесообразность ЦОДД для городов любого размера.

Центры организации дорожного движения доказали способность решать ключевые проблемы городского транспорта: заторы, аварийность, экономические потери. Для эффективности ЦОДД необходима адаптация технологий под экономические возможности и инфраструктуру определенных городов, а также государственная поддержка в рамках нацпроектов.

Список источников

1. Государственное казенное учреждение города Москвы Центр организации дорожного движения Правительства Москвы // Московский транспорт: [сайт]. – URL: <https://old.gucodd.ru/index.php/about/zadachi>.
2. «Умный» светофор. Чем он может помочь автомобилисту // ЯндексДзен: [сайт]. – URL: <https://dzen.ru/a/XbGham0pwQCt1IVa>.
3. Об учреждении Государственное казенное учреждение города Москвы Центр организации дорожного движения Правительства Москвы // Московский транспорт: [сайт]. – URL: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/17183.

References

1. State budgetary institution of the city of Moscow, the Center for traffic management of the Government of Moscow // Moscow transport: [site]. – URL: <https://old.gucodd.ru/index.php/about/zadachi>.
2. "Smart" traffic light. How it can help a motorist // Yandex Zen: [site]. – URL: <https://dzen.ru/a/XbGham0pwQCt1IVa>.
3. About the institution State budgetary institution of the city of Moscow, the Center for traffic management of the Government of Moscow // Moscow transport: [site]. – URL: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/17183.

Статья поступила в редакцию 28.11.2025

Информация об авторах

Чижевская Дарья Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильного транспорта» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 5817-4530, AuthorID: 1251550

E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Ветерцовский Владислав Николаевич, ассистент кафедры «Транспортные технологии» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: vladvetertsovsky@yandex.ru

Синчишен Алексей Александрович, магистр кафедры «Транспортные технологии» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: AleshenkaSin@yandex.ru

Information about the authors

Chizhevskaya Darya Yuryevna, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Automobile Transport Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

SPIN-code: 5817-4530, AuthorID: 1251550

E-mail: shevchenkodu@mail.ru

Vetertsovsky Vladislav Nikolaevich, Assistant of the Department of Transport Technologies Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

E-mail: vladvetertsovsky@yandex.ru

Sinchishen Aleksey Aleksandrovich, Master of the Department of Transport Technologies Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

E-mail: AleshenkaSin@yandex.ru

Для цитирования:

Чижевская Д. Ю., Ветерцовский В. Н., Синчишен А. А. Исследование возможности применения центров организации дорожного движения в улично-городских условиях // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 88-93.

For citation:

Chizhevskaya D.Y., Vettsovsky V.N., Sinchishen A.A. Investigation of the possibility of using traffic management centers in urban street conditions // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1 (1). – P. 88-93.

БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА

УДК 622.81

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТРАБОТКИ ШАХТОПЛАСТОВ И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ УГЛЕНОСНОЙ ТОЛЩИ

Павленко А. Т., Красногрудов А. В., Малкин В. Ю.

INTENSITY OF MINE FORMATION DEVELOPMENT AND GAS EMISSION FROM THE MINED COAL BEARING STRATA

Pavlenko A. T., Krasnogradov A. V., Malkin V. Y.

Аннотация. Разработана теоретическая схема выделения газа из эксплуатируемого угольного пласта очистными выработками.

В ходе разработки теоретической схемы было сделано несколько предположений, справедливость которых была проверена на основе экспериментальных данных, полученных в условиях четырех шахт на пятнадцати участках выработок.

Установлено, что относительное газовыделение на единицу площади разрабатываемого пространства остается достаточно постоянной величиной для некоторых горно-геологических условий, если общее количество газа отнести к площади, определяющей активное движение горных пород по движущемуся очистному забою. Это позволяет более эффективно использовать ранее полученные результаты определения категорической опасности шахт по относительному газовыделению на тонну добычи угля в части улучшения прогноза выхода газа из угольных пластов в процессе добычи.

Ключевые слова: газовыделения, угленородная толща, отработка пластов, подрабатываемая порода, очистные выработки.

Abstract. A theoretical scheme of gas release from the coalbed under production by treatment workings has been developed.

During the development of the theoretical scheme, several assumptions were made, the validity of which was verified on the basis of experimental data obtained in the conditions of four mines at fifteen excavation sites.

It is established that the relative gas release per unit area of the developed space remains a fairly constant value for some mining and geological conditions, if the total amount of gas is attributed to the area that determines the active movement of rocks over a moving treatment face. This allows you to use the previously obtained results of determining the categorical danger of mines by relative gas release per ton of coal production in terms of improving the forecast of gas release from the coalbed under production more efficiently.

Key words: gas emissions, coal-rock strata, strata mining, undermined rock, production workings.

Введение. В современных угольных шахтах основным источником газовой выделения являются подрабатываемая очистными выработками углепородная толща.

Связь интенсивности газовой выделения с активностью сдвижения подработанных пород установлена несколько десятилетий назад [1, 2]. Наиболее высокие уровни газовой выделения связаны с осадками основной кровли [3] и развитием процессов сдвижения пород в направлении к земной поверхности при удалении очистного забоя от разрезной выработки. Метановыделение в горные выработки возможно только из зоны сдвижения пород с разрывом их сплошности. В дегазационные скважины метановыделение может происходить также из полостей расслоения на контактах слоев пород с разными прочностными свойствами [4].

Параллельно с влиянием сдвижения подрабатываемых пород установлено явление снижения удельного дебита метана в очистную выработку при повышении интенсивности отработки пологих угольных пластов [5].

Под интенсивностью отработки пластов подразумевается уровень добычи угля и соответствующее ему подвигание очистного забоя. Для безопасной отработки газоносных угольных пластов необходимо знание механизма формирования метановыделения из подрабатываемой углепородной толщи. До настоящего времени практически отсутствуют научно-исследовательские работы, в которых совместно рассматриваются интенсивность отработки угольного пласта (уровень добычи угля или скорость подвигания забоя), развитие очистных работ и газовой выделения из подрабатываемых источников. Исследования в этом направлении являются весьма актуальными.

Цель подраздела. Разработать схему влияния очистных выработок на образование зон активного сдвижения подрабатываемой углепородной толщи и возможного интенсивного выделения из них метана.

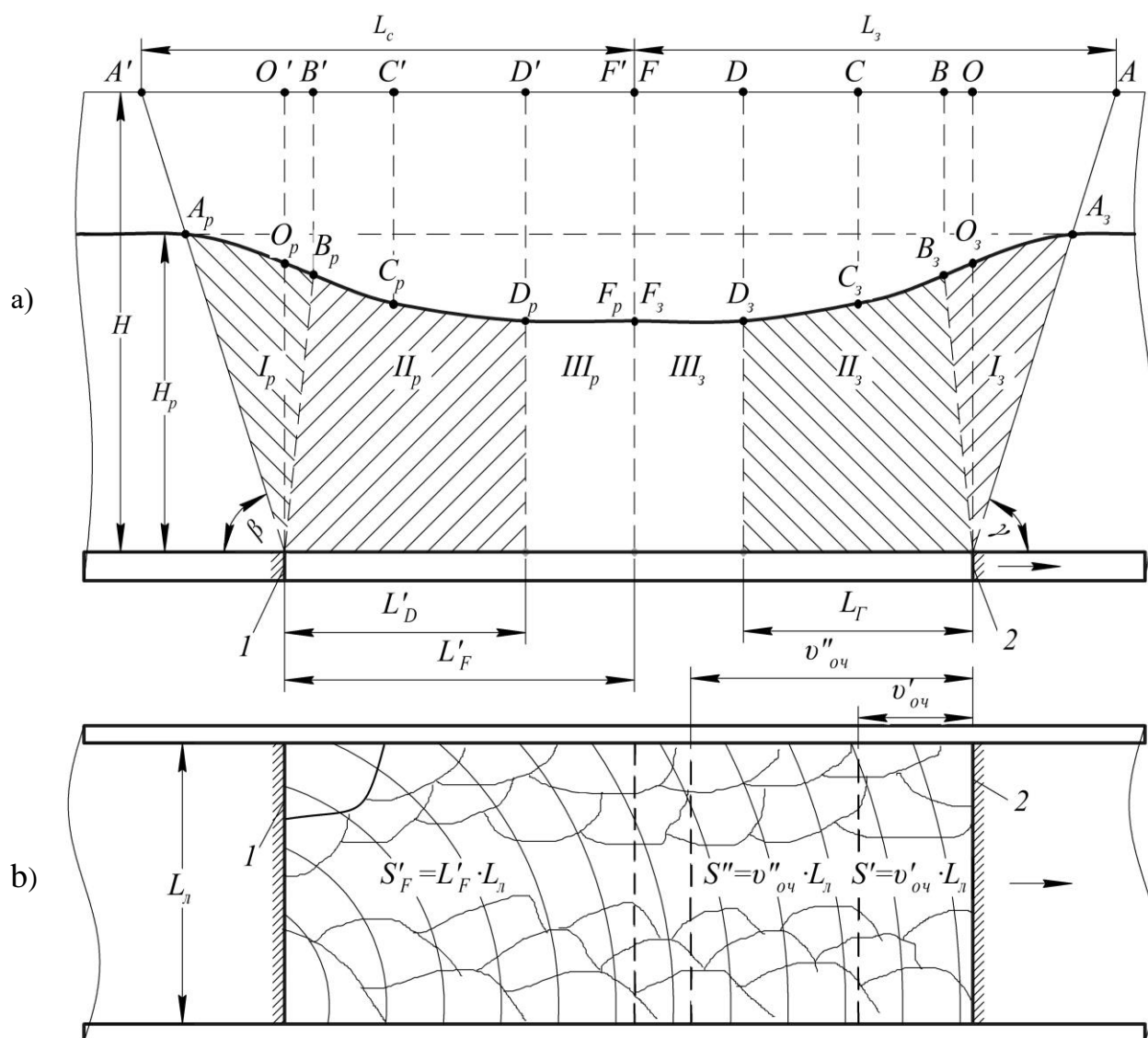
Установить факторы, определяющие газовой выделения относительного его выделения с единицы площади выработанного пространства.

Идея. Предполагается, что количество выделяющегося газа зависит как от скорости подвигания очистного забоя ($V_{оч}$), так и интенсивности сдвижения над ним пород и степени развития очистных работ на выемочном участке.

Материалы и методы. Методика предусматривает рассмотрение экспериментальных данных о метановыделении применительно к разработанной схеме влияния очистных выработок на образование зон интенсивного сдвижения пород и газовой выделения из подрабатываемой углепородной толщи.

Схема расположения зон метановыделения в подрабатываемой углепородной толще разработана согласно образованию мульды сдвижения на земной поверхности [3] и степени развития очистных работ на выемочном участке (рис. 1).

Согласно этой схеме на дневной поверхности под влиянием очистных работ образуется мульда сдвижения, которая делится на две полумульды. Одна из них стационарная длиной L_c образуется над разрезной выработкой (1). Вторая – динамическая длиной L_d , она формируется по мере подвигания очистного забоя (2). Эти полумульды согласно методикам [3, 6, 7] можно разделить на отдельные периоды их образования с помощью характерных точек. Участок $A'B'$ полумульды земной поверхности (на схеме условно показан отрезок прямой $A'B'$) соответствует начальному периоду сдвижения земной поверхности под влиянием движущегося очистного забоя. Наиболее активно сдвижение земной поверхности происходит на участке кривой B_p , D_p , а в точке C_p достигается максимальная скорость оседания.



1, 2 – соответственно обнаженные поверхности пласта разрезной выработки и очистного забоя; 3 – земная поверхность; L_c , L_o – размеры, соответственно стационарная и динамическая полумульды; A , O , B , C , D , F и A' , O' , B' , C' , D' , F' – характерные точки оседания земной поверхности динамической и стационарной полумульды; A_p , B_p , C_p , D_p , F_p и A_3 , B_3 , C_3 , D_3 , F_3 – характерные точки оседания слоя подработанных пород на границе (H_p) зоны с разрывом сплошности, соответственно над разрезной выработкой и очистным забоем; H – глубина ведения очистных работ; I_3 , II_3 , III_3 и I_p , II_p , III_p – зоны возможного газовыделения соответственно над очистным забоем и разрезной выработкой; β , γ – граничные углы влияния очистной выработки на земную поверхность; L'_D – расстояние между разрезной выработкой и очистным забоем, при котором происходит активное газовыделение; L'_F – расстояние, на котором прекращается газовыделение со стороны разрезной печи, вследствие уплотнения пород; L_r – расстояние от очистного забоя, на котором происходит активное газовыделение из подработанной углепородной толщи над очистным забоем; L_l – длина лавы; S' , S'' – площади выработанного пространства, соответственно при подвигании очистного забоя на расстояние $v'_{оч}$ и $v''_{оч}$; \rightarrow – направление подвигания очистного забоя.

Рис. 1. Схема расположения зон газовыделения в подрабатываемой углепородной толще согласно образованию мульды сдвижения на земной поверхности(а) и степени развития очистных работ(б) на выемочном участке

В точке D_p происходит окончание активной стадии и осуществляется переход к затуханию процессов сдвижения земной поверхности. В точке F достигается максимум оседания и дальнейшее подвигание очистного забоя уже практически не оказывает влияние на процессы активного сдвижения подработанных пород и земной поверхности.

Подобным образом по интенсивности, происходит сдвижение подрабатываемых пород над очистным забоем в углепородной толще. По аналогии с земной поверхностью в ней образуется полумульда оседания с характерными точками A_3 , B_3 , C_3 , D_3 и F_3 . Незначительное газовыделение из толщи пород возможно из зоны I_3 , размеры которой определяются граничным углом γ и положением точки B_3 в подрабатываемом массиве. Точка B_3 расположена на удалении H_p от разрабатываемого пласта, которое определяет границу зоны сдвижения пород с разрывом их сплошности. При удалении очистного забоя от разрезной выработки H_p достигает некоторого значения, которое остаётся постоянным по мере дальнейшей отработки выемочного столба [8]. Наиболее благоприятные условия для интенсивного газовыделения появляются в зоне (Π_3) активного сдвижения пород. Размеры этой зоны определяются участком кривой $B_3 - C_3 - D_3$ и параметром H_p . Раздельное определение газовыделения из зон I_3 и Π_3 экспериментальным путем в шахтных условиях, практически невозможно по техническим возможностям современной измерительной техники. На основании газовых съёмок в горных выработках и замеров в дегазационных системах можно установить суммарное газовыделение из зон I_3 и Π_3 , пренебрегая метановыделением из зоны Π_3 . Наиболее точным и доступным показателем, характеризующим размеры этих зон, является площадь выработанного пространства S_G . Её можно определить путём произведения параметра L_G и длины лавы L_n . Значение параметра L_G определяется проекциями точек D и D_3 . Для угольных шахт Донбасса параметр L_G

ориентировочно равен 0,466 от глубины (H) ведения горных работ [3]. Исходя из приведенной схемы (рис. 1) следует, что весь выделившийся газ из подрабатываемой толщи (I_v) при подвигании очистного забоя ориентировочно можно отнести к размеру выработанного пространства $S_G = L_n \cdot L_G$.

В производственных условиях значение параметра L_G , как правило, не совпадает с месячной скоростью подвигания очистного забоя U_{oc} . В случае, если $U_{oc} < L_G$, то при определении удельного газовыделения из соотношения $\frac{I_v}{S'}$ этот показатель будет

завышаться. Газовыделение I_v по факту относится к площади выработанного пространства размером $L_n \cdot L_G$, а его относят, в ряде случаев, к $S' = U'_{oc} \cdot L_n$.

Иногда значения U''_{oc} крайне редко могут превышать параметр L_G , тогда $S'' = U''_{oc} \cdot L_n$ будет превышать площадь $S_G = L_n \cdot L_G$ и удельное газовыделение с единицы площади выработанного пространства будет заниженным.

Можно предположить, что по аналогичной схеме газовыделение происходит над разрезной выработкой из зон I_p и Π_p . Их размеры также определяются положением характерных точек A_p , B_p , C_p , D_p и F_p в подработанной толще и величиной параметра H_p .

При удалении очистного забоя от разрезной выработки на расстояние L'_D , в значительной степени дегазированной, является зона Π_p , так как она подвергалась наиболее интенсивному сдвижению пород. Некоторое газовыделение возможно из зоны I_p , в которой сдвижения пород были незначительными.

При удалении очистного забоя от разрезной выработки на расстояние более L'_F дегазированными в значительной степени являются зоны Π_p и Π_3 . Породы в этих зонах, перед их уплотнением, последовательно прошли все стадии по интенсивности их

сдвижения и, очевидно, по активности газовыделения из подработанных источников.

Результаты и обсуждения. В процессе разработки схемы (рис. 1) было сделано несколько допущений, которые необходимо проверить и подтвердить их обоснованность экспериментальными результатами. К ним относится предположение о схожести процессов газовыделения из подрабатываемой углепородной толщи при удалении очистных забоев от разрезных печей в начальный период эксплуатации выемочных участков на расстояние L'_D (при осадке основной кровли в зоне Π_p) и метановыделения над очистным забоем, определяемой границами зоны Π_3 и площадью выработанного пространства S_G , рассчитываемой с использованием параметра L_G . К анализу привлекли результаты наблюдений за развитием очистных работ и газовыделением на пятнадцати выемочных участках четырёх шахт. Для этих объектов предварительно, учитывая глубину (H) ведения очистных работ, определили [3] параметр L_G . Для условий шахты им. А.Ф. Засядько [9] (16-я восточная лава пласта m_3) для глубины $H = 1195$ м значение L_G равно 547 м. В условиях шахты «Суходольская - Восточная» при эксплуатации участков 12-й бис и 24-й восточных лав пласта i_3 глубина соответственно составляла 965 и 1016 м, а им соответствовали значения L_G равные 450 и 474 м. Шахтой им. Д.Ф. Мельникова выемочный участок 1-й северной лавы пласта l_6 отрабатывался на глубине 852 м, для которой параметр L_G составлял 397 м. Шахтой им. газеты «Известия» отрабатывался антрацитовый пласт l_2^e на глубине 300 м, а расчётное значение параметра L_G составляло 140 м.

Для каждого выемочного участка предварительно установлены месячные подвигания очистных забоев и экспериментально определено количество газа, выделявшееся за этот период времени. После этого последовательно подбирали подвигание

очистных забоев (L_{oc}) за некоторый период времени (один или несколько месяцев), начиная с момента работы лав таким образом, чтобы $L_{oc} \approx L_G$. Затем для подобранных значений L_{oc} находили площади выработанных пространств $S_G = L_{oc} \cdot L_G$, которые соответствовали газовыделению I_v при подвигании очистных забоев на расстояние L_{oc} . Учитывали также период работы лав (t) при подвигании забоев на расстояние L_{oc} , среднее газовыделение за месяц и удельное метановыделение $\frac{I_v}{S}$, относящееся к m^2 выработанного пространства при подвигании очистных забоев на расстояние L_{oc} .

При подвигании очистных забоев в начальный период эксплуатации выемочных участков на расстояние $L_{oc} \approx L_G = L'_D$ (рис. 1) в большинстве случаев показатели количества газа (I_v), среднее его количество (\bar{I}_1), выделившееся за один месяц, а также удельное газовыделение с единицы площади выработанного пространства ($\frac{I_v}{S_G}$) были

меньше по сравнению с последующими их значениями при подвигании очистных забоев на расстояние L_{oc} . Объясняется это тем, что интенсивное газовыделение из подрабатываемой углепородной толщи начинается не сразу после ввода лав в эксплуатацию, а происходит после осадки основной кровли. Например, в условиях шахты им. газеты «Известия» осадка основной кровли происходила при удалении очистных забоев от разрезных выработок на расстояние 80÷120 м [3]. При этом пиковые значения метановыделения при подвигании очистных забоев на отрезке L'_D (рис. 1а), расположенному ближе к разрезной выработке, были несколько выше по сравнению с газовыделением при последующих их подвиганиях на величину L_G . Общее же количество газа I_v , выделившееся при прохождении очистными забоями отрезков L_G выемочных столбов, удалённых от разрезных печей, превышало, как правило, этот

показатель при эксплуатации лав вблизи разрезных выработок. Такое соотношение показателей по выделению газа на участках L'_D и L_T указывает на разное протекание процессов сдвижения пород и газовыделения при нахождении очистных забоев в разных частях выемочных столбов.

Более детально рассмотрели случаи, при отработке выемочных столбов на участках L'_D и L_T , когда показатели I_v , \bar{I}_1 и $\frac{I_v}{S_T}$ были количественно близки между собой.

Шахтой им. Д.Ф. Мельникова при эксплуатации 1-й северной лавы пласта 1₆ отрезок столба $L'_D=L_{оч}=408$ м вблизи разрезной печи отрабатывался двенадцать месяцев, а последующий отрезок $L_T=409$ м после осадки основной кровли - девять месяцев. В эти периоды выделилось примерно одинаковое количество метана, соответственно 2,8 и 2,7 млн. м³. В данном случае, при примерно одинаковых площадях выработанных пространств (89760 и 89980 м²), выделилось практически одинаковое количество газа за разные промежутки времени отработки части выемочного столба на отрезках L'_D и L_T . Это свидетельствует, что количество выделившегося метана из зоны активного сдвижения подработанных пород зависит от времени дегазации углепородной толщи. Влияние фактора времени на все показатели газовыделения (I_v , \bar{I}_1 и $\frac{I_v}{S_T}$) подтверждается

экспериментальными результатами, полученными при доработке выемочного столба 1-й северной лавы длиной 392 м на протяжении тридцати месяцев. За этот период выделилось 5,3 млн. м³ газа, вследствие этого увеличился и показатель $\frac{I_v}{S_T}$ с 30,0 до

61,5 м³/м² метана. Количество метана, выделившееся в течение одного месяца, оставалось практически без изменения. После остановки очистного забоя ($S_T=0$) за восемь

месяцев выделилось 0,5 млн. м³ метана. Показатель $\frac{I_v}{S_T}$ необходимо определять

согласно схемы (рис. 1) из соотношения $\frac{I_v}{L_T \cdot L_a} = \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{397 \cdot 220} = 5,7 \text{ м}^3/\text{м}^2$. После остановки

очистного забоя отсутствует его подвигание, что вызвало снижение удельного газовыделения, отнесённое к единице площади выработанного пространства с 61,5 до 5,7 м³/м². В данном случае если количество выделившегося газа относить к площади, соответствующей месячному подвиганию очистного забоя ($S_v=0$), то показатель $\frac{I_v}{S_v}$

стремится к бесконечности и он не имеет практического значения. Аналогичная ошибка допускается методикой нормативных документов при определении категорийной опасности шахт, когда количество выделившегося газа относят к добыче угля за месяц. При её отсутствии газообильность шахты стремится, якобы, к бесконечности. Абсолютное газовыделение после остановки очистного забоя зависит от зон расположения источников в подработанной углепородной толще, которые уже не связаны с добычей угля.

На участке 8-й западной лавы пласта 1₂ шахты им. газеты «Известия» часть выемочного столба $L'_D=L_{оч}=151$ м отрабатывалась три месяца, а последующая – $L_T=131$ м один месяц. За время эксплуатации выемочного участка в соответствующие периоды времени выделилось 1,4 и 1,2 млн. м³ метана. Показатели \bar{I}_1 и $\frac{I_v}{S_T}$ в

соответствующие периоды были равны 0,5 и 1,2 млн м³ и 43,1 и 42,6 м³/м². В данном случае при одинаковом показателе $\frac{I_v}{S_T}$ существенно

отличалось среднее количество газа, выделившееся в течение одного месяца. Такое соотношение параметров в данном случае можно объяснить не полным развитием процессов сдвижения пород на начальной

стадии отработки пласта при $L_{оч}=151\text{м}$. После остановки лавы за два месяца выделилось 0,5 млн м^3 газа. Для этого случая показатель $\frac{I_v}{S_{\Gamma}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{140 \cdot 215} = 16,6 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Это указывает на

снижение удельного газовыделения с единицы площади выработанного пространства при отсутствии добычи угля в течение некоторого промежутка времени.

После остановки 9-й западной лавы за четыре месяца выделилось 0,3 млн. м^3 метана, а удельное газовыделение за этот период составило 8,6 $\text{м}^3/\text{м}^2$. Это подтверждает справедливость того, что при расчёте удельного газовыделения с единицы площади выработанного пространства, количество выделившегося газа I_v необходимо относить к площади S_{Γ} , определяющей активную зону сдвижения пород.

Если скорость подвигания очистного забоя ($V_{оч}$) примерно равна расчётному значению размера зоны активного сдвижения пород (L_{Γ}) (рис. 1), то можно предположить, что значения удельного метановыделения, отнесённое к единице площади выработанного пространства ($\frac{I_v}{S_v}$ и $\frac{I_v}{S_{\Gamma}}$), будут незначительно отличаться

между собой. Близость параметров $\frac{I_v}{S_v}$ и $\frac{I_v}{S_{\Gamma}}$ в

этом случае косвенно указывает на достоверность определения L_{Γ} расчётным способом.

Из рассмотренных выемочных участков, отрабатывающих разные пласты, только в условиях шахты им. газеты «Известия» для отдельных выемочных участков, в некоторых случаях, скорость подвигания очистных забоев ($V_{оч}$) была близкой к показателю $L_{\Gamma} = 140\text{м}$. Точность определения L_{Γ} составляет около 20%. Значение L_{Γ} в этом случае равно $140 \pm 28\text{м}$ и должно находиться в диапазоне 112÷168м. Для шести выемочных участков, на которых имелись случаи примерного равенства $L_{\Gamma} \approx V_{оч}$, сделали выборки по скорости подвигания их

очистных забоев в указанном интервале (112÷168 м) и соответствующее им количества выделившегося газа ($I_{v_{оч}}$) и площади ($S_{v_{оч}}$ и S_{Γ}) выработанных пространств. Графики экспериментально определённых значений $\frac{I_{v_{оч}}}{S_{v_{оч}}}$

и $\frac{I_{v_{оч}}}{S_{\Gamma}}$ практически совпали с биссектрисой (1)

координатной сетки (рис. 2). Об этом свидетельствует близость коэффициента регрессии к единице, усредняющей прямой (2) и высокое значение коэффициента корреляции ($r=0,97$). Установленные факты свидетельствуют, что для достоверного определения удельного газовыделения с единицы площади выработанного пространства, необходимо учитывать зоны активного сдвижения подработанных пород.

Выводы. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования газовыделения из подрабатываемой углепородной толщи очистными выработками позволили сделать следующие выводы:

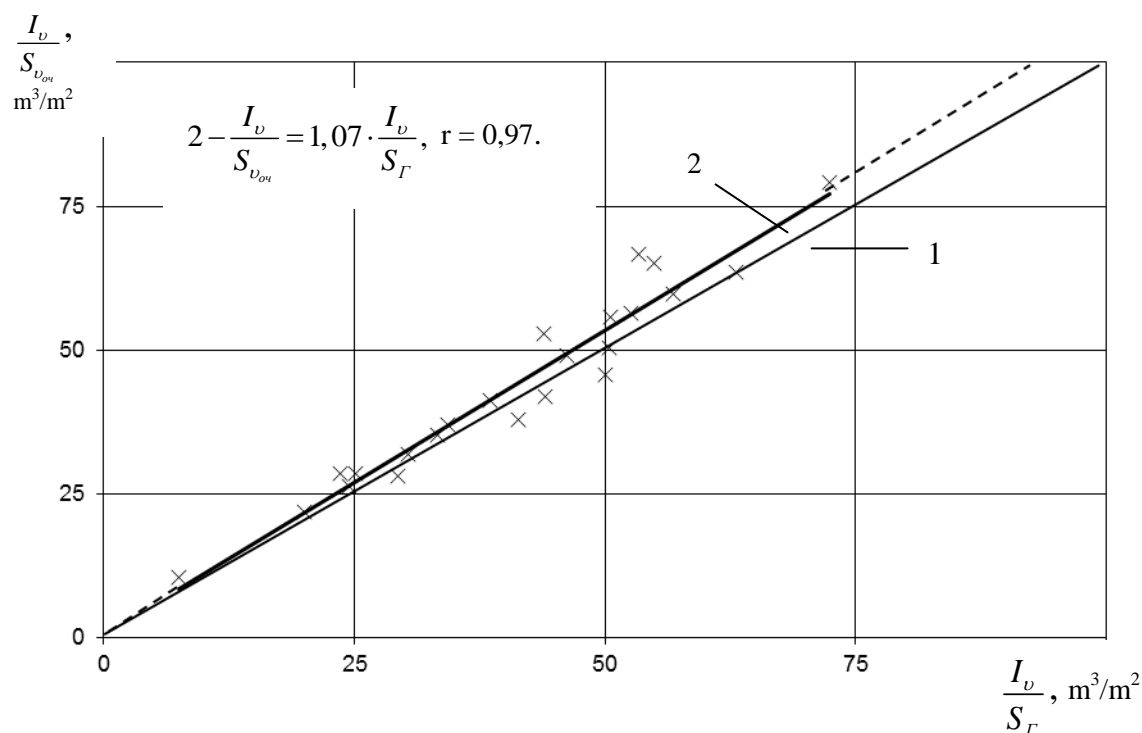
- разработанная теоретическая схема совместного образования зон активного сдвижения подрабатываемой углепородной толщи и интенсивного газовыделения позволила на основании экспериментальных данных установить часть площади выработанного пространства, которое определяет количество метана, выделяющегося из источников;

- установлены в условиях четырёх шахт на 15 выемочных участках отличительные особенности удельного газовыделения, с единицы площади выработанного пространства, которые определяются развитием очистных работ и скоростью подвигания очистного забоя;

- главными факторами, определяющими удельное газовыделение, являются площадь части выработанного пространства, оказывающее влияние на активные стадии сдвижения пород и период времени, необходимый для образования этой площади выработанного пространства;

- полученные научные выводы позволяют более эффективно использовать полученные ранее результаты установления категоричности шахт их газовой опасности по относительному

газовыделению на тонну добычи угля в части усовершенствования прогноза газовыделения из подрабатываемой углепородной толщи.



1 — биссектриса координатной сетки; 2 — усредняющая прямая; × — экспериментальные данные; r — коэффициент корреляции.

Рис. 2. График соотношения удельных газовыделений с единицы площади выработанного пространства, определённые соответственно по месячному подвиганию очистных

забоев ($\frac{I_v}{S_{v_{оч}}}$) и зоне активного сдвижения пород ($\frac{I_v}{S_{Г}}$) при отработке пласта l_2^6

шахтой им. газеты «Известия»

Список источников

1. Морев А.М., Евсеев И.М. Дегазация сближенных пластов. – М.: Недра, 1975. – 168с.
2. Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах / А.Т. Айруни. – М.: Недра, 1981. – 335с.
3. Филатьев М.В., Антощенко Н.И., Дубовик А.И. Геомеханические процессы сдвижения подработанных пород и обоснование методики прогноза газовыделения в угольных шахтах: Монография. Лисичанск: ДонГТУ. – 2017. – 298 с.
4. Савенко Л.В., Озеркин М.И. Дегазация спутников угольных пластов. – К.: Государственное издательство технической литературы УССР. – 1963. – 130с.
5. Открытие № 411. Явление снижения удельного дебита метана в очистную выработку

из углепородного массива при повышении интенсивности отработки пологих угольных пластов/ М. А. Ильяшов, С. И. Скипочка, А. В. Агафонов [и др.]. НА-515, заявл. 08.09.2010. Приоритет. 2017 и 2019.

6. Кулибаба С.Б. Временные параметры интенсивной стадии процесса сдвижения земной поверхности / С.Б. Кулибаба, М.Д. Рожко // Научные труды Укр НИИ НАН. – №9 (часть 1). – 2011. – С. 173-179.

7. Гавриленко Ю.Н. Прогнозирование сдвижений земной поверхности во времени / Ю.Н. Гавриленко // Уголь Украины. – 2011. – №6. – С. 45-49.

8. Лобков М.И. Основные положения методики прогноза ожидаемых динамических сдвижений точек земной поверхности по

простиранию лавы при отработке пологих и наклонных угольных пластов: автореферат диссертации на присвоение научной степени доктора технических наук: спец. 05.15.02. «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» / М.И. Лобков. – Донецк. – 2012. – 36 с.

9. Бокий В.В. Перспектива извлечения метана из техногенных скоплений / В.В. Бокий, О.И. Касимов // Уголь Украины. – 2005. – №5. – С. 17-21.

10. Безопасная отработка газоносных угольных пластов с учетом геомеханических процессов сдвижения подработанных пород: Монография / Антощенко Н.И. и др. Алчевск: ДонГТУ. – 2014. – 339с.

11. НПАОП 10.01-1.01-10. Правила безопасности в угольных шахтах. Киев. – 2010. – 430 с.

12. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт / Янко С.В. и др. К.: Основа. – 1994. – 311с.

13. Филатьев М.В., Филатьева Э.Н., Дубовик А.И. Инженерная геомеханика при отработке угольных пластов: Монография. Лисичанск: ДонГТУ. – 2017. – 250 с.

References

1. Morev A.M., Evseev I.M. Degassing of Close Layers. Moscow, Nedra Publ., 1975. 168 p. (In Russian)

2. Airuni A.T. Theory and Practice of Combating Mine Gases At large Depths. Moscow, Nedra Publ., 1981. – 335 p.

3. Filatiev M.V., Antoshchenko N.I., Dubovik A.I. Geomechanical processes of movement of undermined rocks and justification of the methodology for forecasting gas extraction in coal mines: Monograph. Lisichansk: DonSTU, 2017. 298 p. (In Russian)

4. Savenko L.V., Ozerkin M.I. Degassing of coal seam satellites. – Kyiv: State Publishing House

of Technical Literature of the Ukrainian SSR. 1963. 130 p. (In Russian)

5. Opening No411. The phenomenon of reducing the specific flow rate of methane in the workings from the coal-rock massif with an increase in the intensity of mining of shallow coal seams / M. A. Ilyashov, S. I. Skipochka, A. V. Agafonov [i dr.]. NA-515, declared. 08.09.2010. Priority. 2017 and 2019.

6. Kulibaba S.B., Rozhko M.D. Scientific Works of Ukr NIM NAS. - No9 (part 1). – 2011. – pp. 173-179.

7. Gavrilenko Yu.N. Prediction of Earth's Surface Movements in Time. – 2011. - №6. – pp. 45-49.

8. Lobkov M.I. Basic provisions of the methodology for predicting the expected dynamic displacements of points of the earth's surface along the strike of lava during the development of shallow and inclined coal seams: abstract of the dissertation for the assignment of the scientific degree of Doctor of Technical Sciences: spec. 05.15.02. "Underground development of mineral deposits" / M.I. Lobkov. – Donetsk. – 2012. – 36 p.

9. Boki V.V., Kasimov O.I. Prospect of methane extraction from technogenic clusters // Coal of Ukraine. – 2005. - №5. – pp. 17-21.

10. Safe development of gas-bearing coal seams taking into account geomechanical processes of the movement of mined rocks: Monograph / Antoshchenko N.I. et al. Alchevsk: DonSTU, 2014. 339 p. (In Russian)

11. NPAOP 10.01-1.01-10. Safety rules in coal mines. Kiev. 2010. 430 p. (In Russian)

12. Coal Mine Ventilation Design Guide / Yanko S.V. et al. K.: Osнова, 1994. 311 p. (In Russian)

13. Filatiev M.V., Filatieva E.N., Dubovik A.I. Engineering geomechanics in the development of coal seams: Monograph. Lisichansk: DonSTU, 2017. 250 p. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 10.11.2024

Информация об авторах

Павленко Александр Тимофеевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института гражданской защиты Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 3018-5709, AuthorID: 1251201
E-mail: pavlenko1901@yandex.ru

Красногрудов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Пожарная безопасность» Института гражданской защиты Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: krasnogradov@mail.ru

Малкин Владимир Юрьевич, доктор экономических наук, профессор, директор Института гражданской защиты Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 6138-5873, AuthorID: 1281803
E-mail: malkvu@mail.ru

Information about the authors

Pavlenko Aleksander, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of the Institute of Civil Protection Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
SPIN-код: 3018-5709, AuthorID: 1251201
E-mail: pavlenko1901@yandex.ru

Krasnogradov Aleksander, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Fire Safety Institute of Civil Protection Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: krasnogradov@mail.ru

Malkin Volodymyr, Doctor of Economics, Professor, Director of the Institute of Civil Protection of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
SPIN-код: 6138-5873, AuthorID: 1281803
E-mail: malkvu@mail.ru

Для цитирования:

Павленко А. Т., Красногрудов А. В., Малкин В. Ю. Интенсивность отработки шахтопластов и газовыделение из подрабатываемой угленосной толщи // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 94-103.

For citation:

Pavlenko A. T., Krasnogradov A. V., Malkin V. Y. Intensity of mine formation development and gas emission from the mined coal bearing strata // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1(1). – P. 94-103.

УДК 622.8:553.068.7

О СВЯЗИ ОБЩЕЙ ПОРИСТОСТИ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ С МЕТАМОРФИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ ШАХТОПЛАСТОВ

Филатьев М. В., Филатьева Е. Н., Голдованский А. В.

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE TOTAL POROSITY OF FOSSIL COALS AND THE METAMORPHIC TRANSFORMATIONS OF MINE SEAMS

Filatiev M. V., Filatieva E. N., Goldovanskiy A. V.

Аннотация. Исследование основано на сравнительном анализе соответствия расчетных значений общей пористости для каждого шахтопласта согласно эмпирическому уравнению их значениям, установленным стандартными методами. Тесноту корреляционной связи с выходом летучих веществ для рассматриваемой совокупности шахтопластов определили путем статистической обработки методом наименьших квадратов значений общей пористости, установленной общепринятыми стандартными методами.

Установлен уровень соответствия расчетных значений общей пористости углей, согласно эмпирическому уравнению, их экспериментальным значениям, определённым стандартными методами, а также определены показатели тесноты корреляционной зависимости общей пористости от степени метаморфических преобразований угольных шахтопластов. Общая пористость ископаемых углей является строго индивидуальной характеристикой конкретного шахтопласта, в незначительной степени зависящей от выхода летучих веществ. Усредняющие эмпирические зависимости от этого показателя дают лишь некоторое представление о направленности изменения общей пористости ископаемых углей при метаморфических преобразованиях шахтопластов. Доказано практическое отсутствие корреляционной зависимости общей пористости ископаемых углей от метаморфических преобразований шахтопластов при оценке влияния этих процессов с использованием показателя выхода летучих веществ. Полученные результаты исследований позволяют разработать предложения по усовершенствованию нормативной базы в части прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ.

Ключевые слова: уголь, пористость, стандартный метод, шахтопласты, метаморфизм, горные работы, безопасность, нормативная база, усовершенствование.

Abstract. The study is based on a comparative analysis of the correspondence between the calculated values of total porosity for each coal seam according to the empirical equation and their values established by standard methods. The tightness of the correlation with the yield of volatile substances for the considered set of coal seams was determined by statistical processing using the least squares method of the total porosity values established by generally accepted standard methods. The level of correspondence between the calculated values of total porosity of coals according to the empirical equation and their experimental values determined by standard methods was established, and the indices of the tightness of the correlation dependence of total porosity on the degree of metamorphic transformations of coal seams were determined. The total porosity of fossil coals is a strictly individual characteristic of a specific coal seam, which depends to an insignificant extent on the yield of volatile substances. The averaging empirical dependencies on this indicator give only some idea of the direction of change in the total porosity of fossil coals during metamorphic transformations of

coal seams. The practical absence of correlation dependence of total porosity of fossil coals on metamorphic transformations of mine seams has been proven when assessing the influence of these processes using the volatile matter yield index. The obtained research results allow developing proposals for improving the regulatory framework in terms of forecasting hazardous properties of mine seams during mining operations.

Key words: coal, porosity, standard method, coal mines, metamorphism, mining, safety, regulatory framework, improvement.

Введение. Пористость определяет физические свойства горных пород, их прочность, скорость распространения упругих волн, сжимаемость, электрические и другие параметры. В нефтяной геологии методы промысловой геофизики основаны на использовании зависимостей между этими параметрами [1].

Изучение пористой структуры различных ископаемых углей и установление взаимосвязи ее с другими характеристиками или особенностями углей, их свойствами необходимо для рационального использования углей, оптимизации процессов их переработки, а также для раскрытия механизма газовыделения из угольных пластов и разработки методов борьбы с внезапными выбросами [2]. Природа возникновения внезапных выбросов угля и газа до настоящего времени, в полной мере, не раскрыта. В связи с этим научно-исследовательские работы, направленные на решение этой проблемы являются актуальными для всех угледобывающих стран мира.

Пористость углей, структура пористой системы и ее удельная поверхность определяет фильтрационные, диффузионные и сорбционные процессы в условиях естественного залегания углей и при их превращениях под воздействием различных физических и химических факторов [2]. В частном случае к таким факторам относятся процессы метаморфических преобразований угольных шахтопластов. Под влиянием этих процессов возможно изменение соотношения между видами пористости. Различают три вида пористости: общую (физическую), открытую и эффективную. Общая пористость включает объем сообщающихся и изолированных пор. К открытой пористости относится объем

сообщающихся между собой пор, которые заполняются жидким или газообразным флюидом при насыщении породы в вакууме. Открытая пористость меньше общей пористости на объем изолированных пор. Эффективная пористость характеризует часть объема, которая занята подвижным флюидом при полном насыщении порового пространства этим флюидом. Она меньше открытой пористости на объем связанных (остаточных) флюидов [1].

Все виды твердого топлива обладают пористой структурой. Действительная плотность образца (d_r^d) всегда оказывается больше, чем кажущаяся (d_a^r). Их разность, относится к величине действительной плотности и выражается в процентах, характеризует [2, 3] общую пористость (P_r) угля:

$$P_r = \frac{d_r^d - d_a^r}{d_r^d} \cdot 100, \% \quad (1)$$

По такой же зависимости для совокупности из 590 шахтопластов было рассчитано значение P_r согласно данным каталога коллекторских свойств каменных углей и антрацитов [4]. Для этой совокупности шахтопластов значения d_r^d и d_a^r были определены экспериментально согласно ГОСТу 2160-82, требования которого аналогичны стандарту [5]. Для второй совокупности из 186 шахтопластов значения P_r были рассчитаны по уравнению 1, но с использованием расчетных значений d_r^d и d_a^r согласно эмпирическим зависимостям. Показатели тесноты корреляционной связи для этих зависимостей в каталоге [4] не приведены.

Общий объем пор $P_{r(p)}$ в абсолютном измерении для разгруженного от горного давления угля согласно [4] определялся с использованием значений действительной (d_r^d) и кажущейся (d_a^r) плотности по уравнению:

$$P_{r(p)} = \frac{d_r^d - d_a^r}{d_r^d \cdot d_a^r}, \text{ см}^3/\text{г}. \quad (2)$$

При определении $P_{r(p)}$ по уравнению (2) для совокупности из 590 шахтопластов использовались экспериментальные значения d_r^d и d_a^r , установленные стандартным способом согласно требованиям [5]. Для второй совокупности из 186 шахтопластов их значения были рассчитаны согласно эмпирическим уравнениям [4].

Кроме этого значения $P'_{r(p)}$ параллельно рассчитывались, очевидно с целью контроля точности расчетов, согласно эмпирическому уравнению (3) в зависимости от выхода летучих веществ при термическом разложении углей без доступа воздуха (V^{daf}):

$$P'_{r(p)} = 0,114 - 0,006V^{\text{daf}} + 0,00013(V^{\text{daf}})^2, \text{ см}^3/\text{г}.$$

Степень соответствия расчетных значений $P'_{r(p)}$ согласно эмпирическому уравнению (3) их экспериментальным определениям стандартными методами не устанавливалась. Показатель V^{daf} длительный период времени был единственным показателем метаморфических преобразований пластов при установлении потребительских качеств углей [6]. Он остается одним из основных критериев в современной классификации углей по генетическим и технологическим параметрам [7], а также является главным показателем метаморфизма при установлении склонности пластов к проявлению газодинамических явлений [8]. По указанным причинам показатель V^{daf} изучен, по сравнению с другими критериями, в большей степени и его значения приведены в каталоге [4]. Это позволяет,

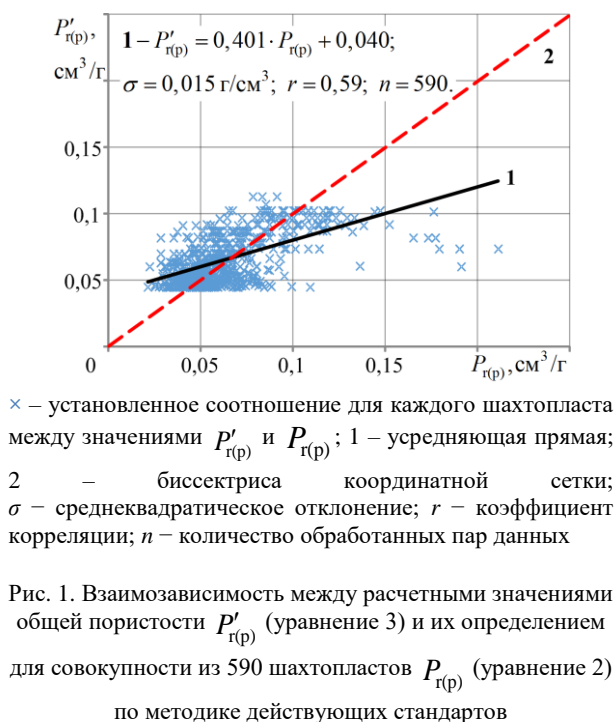
используя значения V^{daf} , оценить степень влияния метаморфических преобразований шахтопластов на изменение общей пористости углей.

Цель – установить уровень соответствия расчетных значений общей пористости углей (по эмпирическому уравнению 3) их экспериментальным определением стандартными методами, а также определить показатели тесноты корреляционной зависимости общей пористости от степени метаморфических преобразований.

Методика основана на сравнительном анализе соответствия расчетных значений общей пористости $P'_{r(p)}$ для каждого шахтопласта из 590 совокупностей согласно эмпирическому уравнению 3 их значениям $P_{r(p)}$, установленным стандартными методами с применением уравнения 2. Для рассматриваемой совокупности из 590 шахтопластов тесноту корреляционной связи с выходом летучих веществ V^{daf} определили путем статистической обработки методом наименьших квадратов значений общей пористости, рассчитанной с использованием экспериментальных значений действительной (d_r^d) (3) и кажущейся (d_a^r) плотности соответственно по уравнениям 1 и 2.

Результаты. График сравнения расчетных значений общей пористости $P'_{r(p)}$ согласно эмпирическому уравнению 3 с их определением стандартными методами $P_{r(p)}$ по уравнению (2) показал существенные отличия в рассматриваемых соотношениях (рис. 1).

В рассматриваемом случае отсутствует наличие высокой корреляционной взаимозависимости ($r=0,59$). Наличие максимальных удалений точек по отношению к биссектрисе координатной сетки при $P_{r(p)} > 0,15 \text{ см}^3/\text{г}$ (2), определяющей равенство $P'_{r(p)}$ и $P_{r(p)}$, свидетельствует о недостаточной точности определения общей пористости $P'_{r(p)}$ с использованием эмпирического уравнения 3.

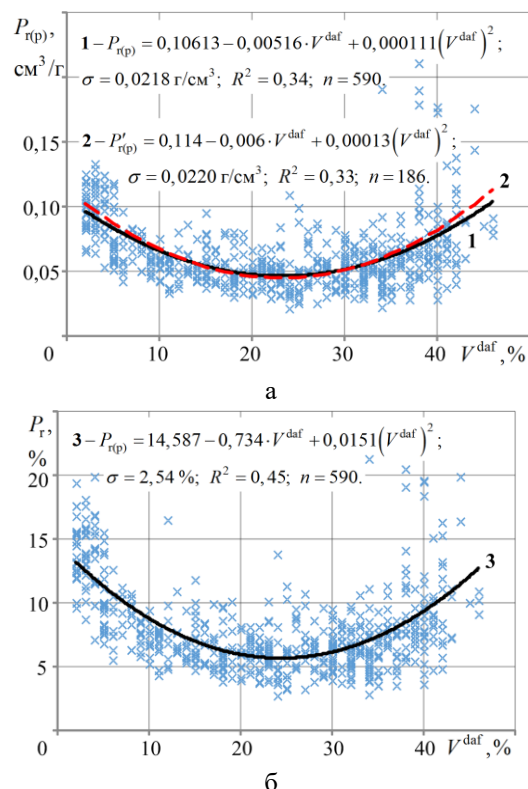


Направленность изменения общей пористости углей ($P_{r(p)}$, уравнение 1 и $P'_{r(p)}$ уравнение 2) при метаморфических преобразованиях для совокупности из 590 шахтопластов иллюстрируется графиками их зависимостей от выхода летучих веществ (V^{daf}) (рис. 2).

Полином степени второго порядка (рис. 2, а, кривая 1) характеризует довольно низкую, практически отсутствующую, корреляционную связь общей пористости с выходом летучих веществ. Показатели тесноты этой связи (R^2 и σ) для рассматриваемой совокупности из 590 шахтопластов соответственно равны 0,34 и 0,0218 г/см³. Примерно такими же корреляционными показателями ($R^2=0,33$ и $\sigma=0,0220$ см³/г), по отношению к совокупности из 590 шахтопластов, характеризуется кривая 2 (рис. 2, а).

Эта кривая соответствует эмпирическому уравнению 3, которое было использовано для расчета общего объема пор для совокупности из 186 шахтопластов при составлении каталога [4]. Практически одинаковые корреляционные показатели для кривых 1 и 2 (рис. 2, а) свидетельствуют, что использование усредненных расчетных значений $P'_{r(p)}$ согласно

уравнению 3, не повлияло на общую точность определения $P_{r(p)}$ согласно уравнению 2. В уравнении 2 использованы значения действительной (d_r^d) и кажущейся (d_a^r) плотности, которые определены согласно стандарту [5] с заранее установленной их точностью.



× – значения общей пористости $P_{r(p)}$ (а) и P_r (б), определенные соответственно согласно уравнениям 2 и 1 с использованием действительной (d_r^d) и кажущейся (d_a^r) плотностей; 1 – эмпирическая усредняющая кривая полинома степени второго порядка, полученная методом наименьших квадратов для совокупности из 590 шахтопластов; 2 – усредняющая кривая расчетных значений общей плотности ($P'_{r(p)}$) для совокупности из 186 шахтопластов (согласно уравнению 3); 3 – эмпирическая усредняющая кривая полинома степени второго порядка, полученная методом наименьших квадратов для совокупности из 590 шахтопластов; σ – среднее квадратическое отклонение; R^2 – коэффициенты детерминации; n – количество обработанных пар данных

Рис. 2. Зависимости значений общей пористости углей ($P_{r(p)}$ и P_r), определенные по методикам общепринятых стандартов для совокупности из 590 шахтопластов от выхода летучих веществ (V^{daf})

Имеющиеся индивидуальные отклонения значений общей пористости для многих шахтопластов ($P_{г(р)}$) от усредняющих кривых 1, 2 (рис. 2, а) и незначительные коэффициенты детерминации (соответственно 0,34 и 0,33), указывают на существенное влияние других, кроме V^{daf} , факторов.

Общая пористость (P_r), выраженная в процентах согласно уравнению 1, несколько в большей степени зависит от показателя V^{daf} . Об этом свидетельствует более высокое значение коэффициента детерминации (0,45) для полинома степени второго порядка (рис. 2, б, кривая 3). Наряду с этим, незначительное различие в величинах коэффициентов детерминации при определении $P_{г(р)}$ и P_r , не противоречит выводу о значительном влиянии, кроме выхода летучих веществ, других факторов.

Выводы. На основании полученных результатов следует, что общая пористость ископаемых углей является строго индивидуальной характеристикой конкретного шахтопласта, в незначительной степени зависящей от выхода летучих веществ. Усредняющие эмпирические зависимости от этого показателя дают лишь некоторое представление о направленности изменения общей пористости ископаемых углей при метаморфических преобразованиях шахтопластов.

Список источников

1. Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.А. Козловский; ред. кол.: М.И. Агошков, Н.К. Байбаков, А.С. Бондарев и др. Москва: Советская энциклопедия. Т. 4. Ортин – Социосфера. – 1989. – 623 с
2. Еремин И.В., Лебедев В.В., Цикарев Д.А. Петрография и физические свойства углей. Москва: Недра, 1980. – 263 с.
3. Августевич И.В., Сидорук Е.И., Броновец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей. Москва: «Реклама мастер», 2019. – 576 с.
4. Каталог коллекторских свойств каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-

Волынского бассейнов. МакНИИ. Макеевка-Донбасс. – 1985. – 48 с.

5. ГОСТ 2160- 2015 (ISO 5072:2013) Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности. Москва: Стандартинформ, 2016. – 11 с.

6. Геолого-углехимическая карта Донецкого бассейна / ДонУГИ. Вып. VIII. Москва: Углетехиздат, 1954. – 430 с.

7. ГОСТ 25543-2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. Издание официальное. Москва: Стандартинформ. – 2014. – 19 с.

8. Правила ведения горных работ на пластах, подверженных газодинамическим явлениям: СОУ 10.1.00174088.011-2005. – [Действует с 2005-12-01] / А.М. Брюханов, А.В. Агафонов, А.В. Анциферов [и др.] – Официальное издание – Киев: Минуглепром Украины, 2005. 224 с. (Нормативный документ Минуглепрома Украины. Стандарт).

References

1. Mining Encyclopedia / Editor-in-chief E.A. Kozlovsky; ed. by M.I. Agoshkov, N.K. Baibakov, A.S. Bondarev et al. Moscow: Soviet Encyclopedia. T. 4. Ortin – Sociosphere. – 1989. – 623 s.
2. Eremin I.V., Lebedev V.V., Tsikarev D.A. Petrography and physical properties of coals. Moscow: Nedra, 1980. – 263 s.
3. Avgushevich I.V., Sidoruk E.I., Bronovets T. M. Standard methods of coal testing. Classifications of coals. Moscow: "Reklama master", 2019. – 576 s.
4. Catalog of collector properties of hard coal and anthracites of Donetsk and Lviv-Volyn basins. MacNII. Makeyevka-Donbass. 1985. 48 s.
5. GOST 2160- 2015 (ISO 5072:2013) Solid mineral fuels. Determination of real and apparent density. Moscow: Standardinform, 2016. 11 s.
6. Geological and coal-chemical map of the Donetsk basin / DonUGI. Vyp. VIII. Moscow: Ugletekhizdat, 1954. – 430 s.
7. GOST 25543-2013. Lignite, stone and anthracite coals. Classification by genetic and technological parameters. Edition official. Moscow: Standardinform. 2014. – 19 s.
8. Rules for mining operations in formations subject to gas-dynamic phenomena: RU

10.1.00174088.011-2005. – [Effective as of 2005-12-01] / О.М. Bryukhanov, O.V. Agafonov, A.V. Antsiferov [et al. 224 p. (Normative document

of the Ministry of Coal Industry of Ukraine. Standard).

Статья поступила в редакцию 22.10.2024

Информация об авторах

Филатьев Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 7888-9864, AuthorID: 1273715
E-mail: Mfilatjev@gmail.com

Филатьева Эльвира Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
E-mail: Elafilatyeva@gmail.com

Голдованский Алексей Вячеславович, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 3388-3760, AuthorID: 1282502
E-mail: igztaktika@mail.ru

Information about the authors

Filatiev Mikhail, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the of the Department of «Technosphere Safety» Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
SPIN-код: 7888-9864, AuthorID: 1273715
E-mail: Mfilatjev@gmail.com

Filatieva Elvira, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of «Fire Safety» Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
E-mail: Elafilatyeva@gmail.com

Goldovanskiy Aleksei, senior lecturer of the Department of «Fire Safety» Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.
SPIN-код: 3388-3760, AuthorID: 1282502
E-mail: igztaktika@mail.ru

Для цитирования:

Филатьев М. В., Филатьева Е. Н., Голдованский А. В. О связи общей пористости ископаемых углей с метаморфическими преобразованиями шахтопластов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2024. – № 1(1). – С. 104-109.

For citation:

Filatiev M. V., Filatieva E. N., Goldovanskiy A. V. On the relationship between the total porosity of fossil coals and the metamorphic transformations of mine seams // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2024. – № 1 (1). – P. 104-109.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 631.354:621.43:62-24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРИРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Замота Т.Н., Бондарец О.А.

MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL AND MECHANICAL RUNNING-IN OF GEAR GEARS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Zamota T.N., Bondarets O.A.

Аннотация. Эффективность применения метода электрохимико-механической приработки для устранения макрогеометрических отклонений сопряжений узлов и агрегатов машин и повышения их долговечности выявлена благодаря проведенным экспериментальным исследованиям особенностей процессов. Это дало возможность значительно улучшить эксплуатационные характеристики трущихся поверхностей основных сопряжений узлов и агрегатов автомобилей. Интерес вызывают теоретические исследования, направленные на раскрытие механизма формообразования трущихся поверхностей деталей основных сопряжений в различных режимах трения, когда в результате этапов развития процессов приработки происходит износ и сьем материала деталей сопряжений, чему и посвящена данная работа.

Ключевые слова: приработка; пятно контакта; зацепление; угол перекоса; электрохимико-механическая приработка.

Abstract. The effectiveness of using the electrochemical and mechanical run-in method to eliminate macrogeometric deviations in the coupling of machine components and assemblies and increase their durability has been revealed due to experimental studies of the process features. This made it possible to significantly improve the performance characteristics of the friction surfaces of the main interfaces of components and assemblies of cars. Of interest are theoretical studies aimed at revealing the mechanism of shaping the friction surfaces of the parts of the main joints in various friction modes, when, as a result of the stages of development of the running-in processes, wear and tear of the material of the parts of the joints occurs, which is the subject of this work.

Key words: running-in; contact spot; engagement; skew angle; electrochemical-mechanical runnig-in.

Введение. В настоящее время все большее значение приобретает проблема повышения долговечности машин после их ремонта. Детали, подаваемые на сборку, обладают пониженной точностью и искаженной геометрией рабочих поверхностей за счет изнашивания в процессе эксплуатации, а также в результате несовершенства технологического процесса восстановления и ремонта. Кроме того, запасные части, поступающие на ремонтное производство, также могут иметь низкую точность. Значительная часть деталей узлов и агрегатов пригодна к повторному использованию, причем большинство из них не требует восстановления. В виду сложной формы и тяжелых условий работы по контурным нагрузкам, а также специфическому виду взаимодействия (по эвольвенте) зубчатых зацеплений научный и практический интерес представляют процессы их совместной доводки. Сложность приработки зубчатых зацеплений состоит в малой площади пятна контакта, кратковременности взаимодействия и повышенной износостойкости контактирующих поверхностей.

Анализ литературных источников. Электрохимико-механическая приработка (ЭХМП) является одним из направлений в доводке и сокращении времени обкатки [1]. При ЭХМП деталям механизма придается рабочее движение, трущиеся поверхности разделяются электролитом и между деталями пропускается переменный электрический ток. За счет совместного электрохимико-механического воздействия происходит быстрое приспособливание одной поверхности к другой. Наиболее эффективным фактором ЭХМП является электрохимический [1, 2].

Приработка зубчатых зацеплений – это сложный и энергозатратный процесс. Типичную кривую изнашивания трущихся поверхностей зубьев можно разбить на три основных участка: приработочный износ, установившийся износ и катастрофический износ. Участок приработки имеет продолжительность 40...1600 часов при величине приработочного износа от 3 до 23 мкм. Период установившегося изнашивания

имеет протяженность 25...70 тыс. часов. Он характеризуется постоянной шероховатостью рабочих поверхностей зубьев, неизменными величинами коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Участок катастрофического изнашивания по длительности самый короткий 40...110 часов, величина же изнашивания может достигать 500 мкм и более [2].

Выявлено, что влияние различных факторов на сопряжения деталей позволяет формировать плосковершинный рельеф шероховатости поверхностей. При этом механическое активирование способствует травлению вершин выступов, а наличие поверхностных пленок и процесса газообразования – уменьшает растравливание впадин рельефа поверхности детали [2].

Известно, что макрогеометрия сопряжений деталей значительно отличается от правильной геометрии и шероховатость их рабочих поверхностей после механической обработки зачастую не соответствует оптимальным значениям и нарушается их эквидистантность. Это приводит к повышенным удельным давлениям в зоне контакта, непосредственному контактированию металлических поверхностей и, как следствие этого, к задирам, схватываниям и повышенному изнашиванию прирабатываемых поверхностей. В этих условиях только высокоэффективные методы и способы приработки способны компенсировать отклонения трущихся поверхностей основных сопряжений деталей [3, 4, 5].

Поэтому необходимы изыскания возможностей применения метода для управления геометрией рабочих поверхностей зубьев шестерен и уменьшения продолжительности их приработки.

Поэтому **целью данной работы** является разработка модели протекания процесса приработки контактирующих поверхностей зубьев при ЭХМП.

Результаты исследования. Вышеуказанные недостатки для зубчатого зацепления приводят к перекосу рабочих поверхностей зубьев (рис. 1).

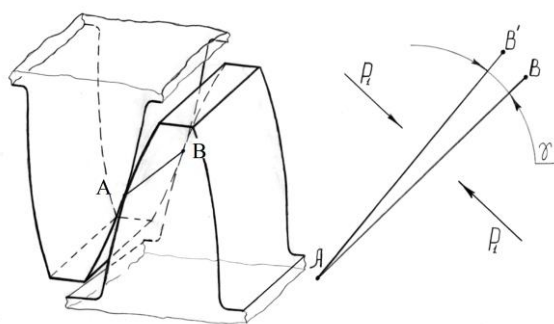


Рис. 1. Схема контакта зубьев шестерен при перекосе:

АВ – линия контакта, γ – угол перекоса, P_1 – нагрузка на зубья

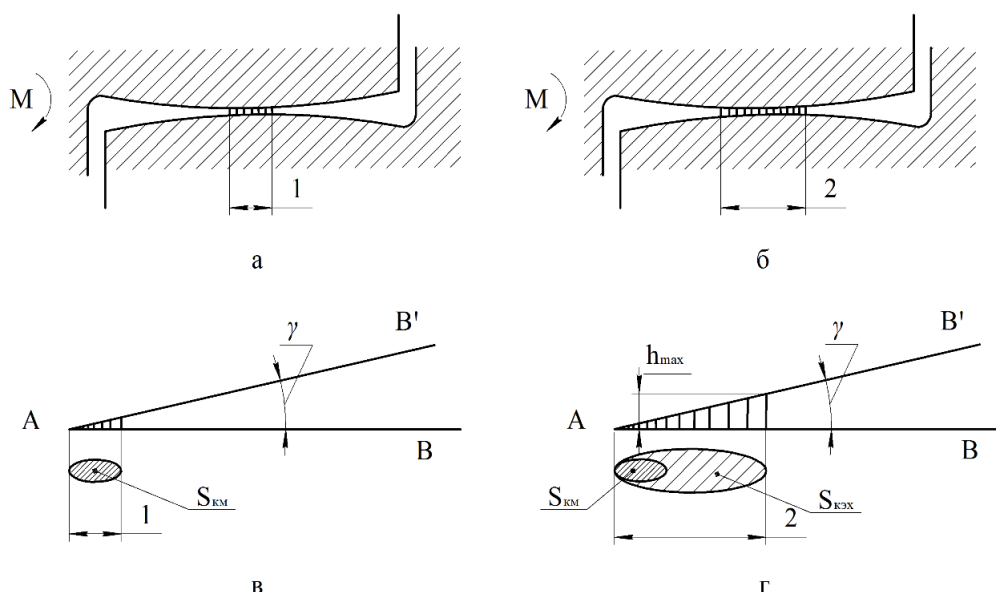
Для компенсации неточностей формы деталей и погрешностей сборки узлов и агрегатов машин подвергают обкатке, при которой происходит приработка трущихся поверхностей. Наиболее эффективным приемом ускорения приработки и повышением показателей долговечности является

использование совмещенных процессов воздействия на прирабатываемые поверхности.

Процессы способов метода проходят в среде электролитов, которые влияют на эффективность протекания и существенно зависят от режимов трения в прирабатываемых сопряжениях деталей и скорости электрохимических реакций.

Можно выделить, что при перекосе двух поверхностей контактирование реализуется по малой фактической площади с большими удельными давлениями. Согласно [7], нагрузки в любом сопряжении деталей в процессе приработки должны соответствовать контактным нагрузкам, что особенно важно для начального момента контакта в сопряжении.

Схемы образования фактического и электрохимического пятен контакта представлены на рис. 2.



1 – пятно фактического механического контакта; 2 – пятно электрохимического контакта; $S_{км}$ – площадь пятна механического контакта; $S_{кэх}$ – площадь пятна электрохимического контакта; h_{max} – максимальный слой электролита, при котором протекает электрохимическая реакция; γ – угол перекоса

Рис. 2. Схемы образования фактического (а) (механическая приработка) и электрохимического (б) (электрохимическая приработка) пятен контакта и соответствующих перекосов (в, г)

Известно, что при приработке сопряжений деталей площадь фактического контакта приближается к номинальной площади контакта и формируется шероховатость близкая к равновесной. Чтобы обеспечить это, необходимо применить такой способ, который

позволял бы реализовать указанное быстро, эффективно и с минимально – возможным приработочным износом.

Площадь пятна контакта при использовании предлагаемого метода составит:

$$S_{\text{к.эхм}} = S_{\text{к.м}} + S_{\text{к.эх}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{к.эхм}}$ – пятно контакта образованное электрохимико-механической приработкой;

$S_{\text{к.м}}$ – пятно контакта, образованное механической приработкой;

$S_{\text{к.эх}}$ – пятно контакта, образованное электрохимической приработкой.

При обычном способе приработки снятие припуска, образованного перекосом рабочих поверхностей, будет сопряжено со значительными трудностями, т.к. поверхность зубьев обладает повышенной износостойкостью и приработка путем повышения контактного давления и скорости взаимного скольжения недопустима, поскольку это может привести к появлению задиров [9]. Применение ЭХМП [8] позволяет целенаправленно изменить геометрию рабочих поверхностей сопряженных деталей и приспособить их друг под друга после сборки сопряжений.

При электрохимико-механической приработке (ЭХМП) деталей сопряжения будут протекать два взаимодополняющих процесса, приводящих к снятию приработочного припуска с поверхностей деталей: электрохимическое травление и механическая депассивация поверхности.

Интенсивность съема металла с прирабатываемой поверхности будет пропорциональна силе тока, протекающего через конкретную точку. Определяющими же для протекания электрохимической реакции являются сопротивления, непосредственно связанные с зазором: сопротивление минимального слоя электролита – $R_{\text{эл}}$, сопротивление слоя электролита вне зоны непосредственного контакта – $R_{\text{эл}} \cdot h/h_{\text{min}}$ и сопротивление пассивационной пленки $R_{\text{пл}}$.

Толщина слоя электролита между трущимися поверхностями в зоне непосредственного контакта равна $h_i = h_{\text{min}}$, а вне этой зоны – $h_i = h$ (рис. 3).

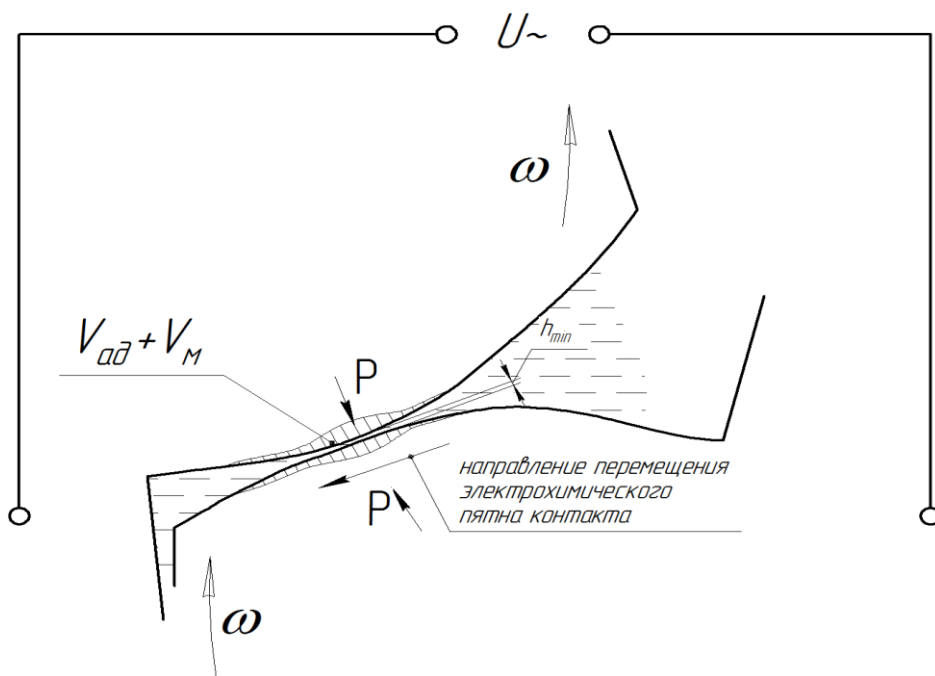


Рис. 3. Перемещение электрохимического пятна контакта по поверхности зуба

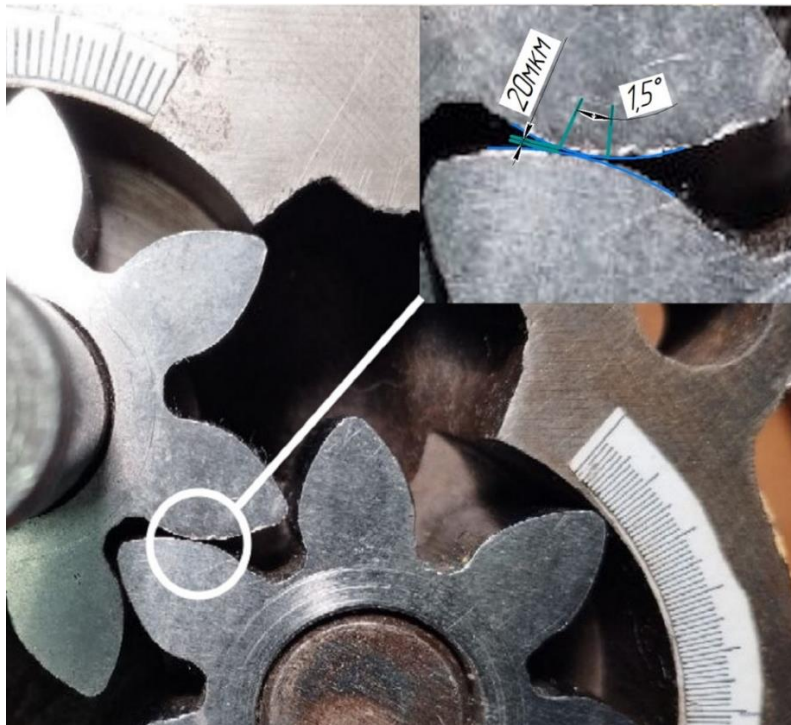


Рис. 4. Изучение процесса контактирования зубьев на лабораторной установке: в верхней части фотографии – контакт в полюсе зацепления, находящимся на пересечении линии зацепления с межосевой линией

Анодное травление в каждой конкретной точке происходит с определенной скоростью обратно пропорциональной величине межэлектродного зазора h . В начальный момент времени точка поверхности детали с макрогеометрическим отклонением находится на зазоре $h_i = h_{min}$ и имеет скорость травления V_a . Составим дифференциальное уравнение изменения линейного износа по времени. Обозначим межэлектродный зазор через $h = h(t)$ - расстояние точки от начала отсчета в момент времени t , тогда в зоне непосредственного контакта $h(0) = h_{min}$. Согласно условию, изменение величины h от времени описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{h}, \quad (4)$$

$$\text{где } k = 0,5 \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \phi_a + \phi_k), \quad (5)$$

0,5 – коэффициент, учитывающий анодный полупериод переменного тока, при котором происходит травление одной из деталей

сопряжения; U – рабочее напряжение; ϕ_a – анодный потенциал; ϕ_k – катодный потенциал; η_a – анодный выход по току; χ – удельная электропроводимость электролита; ρ – плотность материала; ε – электрохимический эквивалент материала анода.

Проведя математические вычисления получим зависимость изменения зазора в каждой конкретной точке в зависимости от времени выразится следующим выражением:

$$h = \sqrt{h_i^2 + 2kt} = \sqrt{h_i^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \phi_a + \phi_k) \cdot t}, \quad (6)$$

Учитывая то, что толщина смазочного слоя в зоне непосредственного контакта постоянна при неизменных условиях, получим:

$$h = \sqrt{h_{min}^2 + 2kt} = \sqrt{h_{min}^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \phi_a + \phi_k) \cdot t}, \quad (7)$$

Изменение зазора h_i в прирабатываемой зоне в определенный момент времени определим для масляного насоса грузового

автомобиля со следующими параметрами $z_1=z_2=7$; $m=4,75$; $d=42,1\text{мм}$; ширина – 38мм ; диаметр начальной окружности $d_n=33,25\text{мм}$, просчитаем параметры для лабораторной установки. Имеем $\rho_{1min} = 8,1356\text{мм}$, а $\rho_{1max} = 16,5956\text{ мм}$, а $\rho_{2max} = 16,5953\text{мм}$ и $\rho_{2min} = 8,1356\text{ мм}$.

$$h = \rho_1 \left(1 - \cos\left(\arcsin \frac{\rho_2 \cdot \sin \varphi_2}{\rho_1}\right) \right) + \rho_2 (1 - \cos \varphi_2)$$

По заданным условиям можно записать следующее

$$h_i = h_{min} + \delta(\varphi_2), \quad (8)$$

где δ – величина зазора (рис. 1), зависящая от координаты x ($\delta=f(x)$).

На схеме, представленной на рис. 4, увеличение зазора вне зоны непосредственного контакта имеет нелинейный характер, поэтому

$$\delta = f(\varphi_2), \quad (9)$$

где φ – полярная координата в зоне непосредственного контакта.

Для случая, когда наблюдается начало контакта прирабатываемых боковых поверхностей зубьев (рис. 3, верхняя кривая) увеличение зазора при удалении от зоны непосредственного контакта происходит более интенсивно, чем в полюсе зацепления (рис. 3, нижняя кривая) [8].

В результате проведенных экспериментальных исследований было определено, что первоначальный контакт в линию, при наличии даже небольшого перекоса, резко сокращает первоначальную площадь пятна контакта (рис. 6,а) и значительно ухудшает условия приработки.

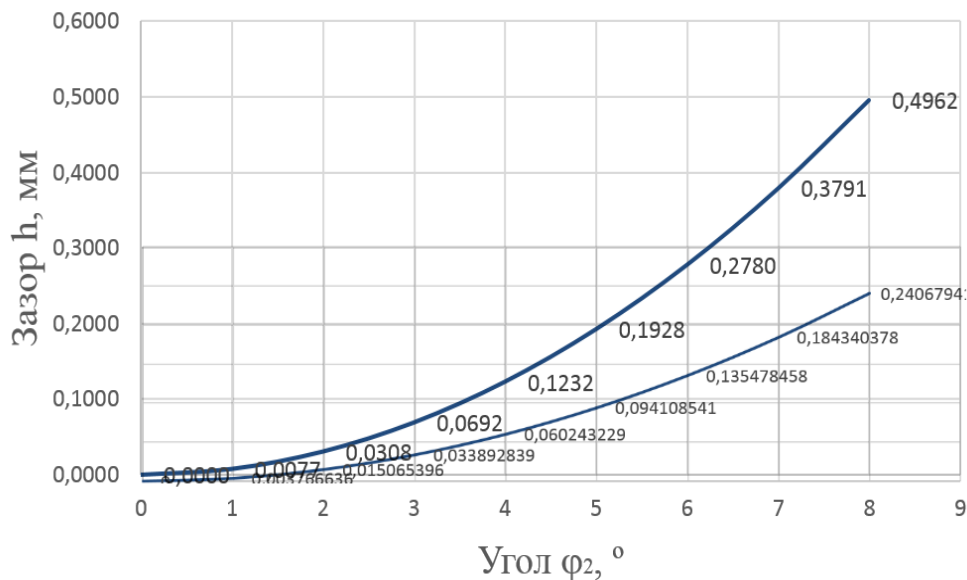


Рис. 5. Изменение зазора h_i зубьев на лабораторной установке: верхняя кривая – начало контакта прирабатываемых боковых поверхностей зубьев; нижняя кривая – контакт в полюсе зацепления, находящимся на пересечении линии зацепления с межосевой линией

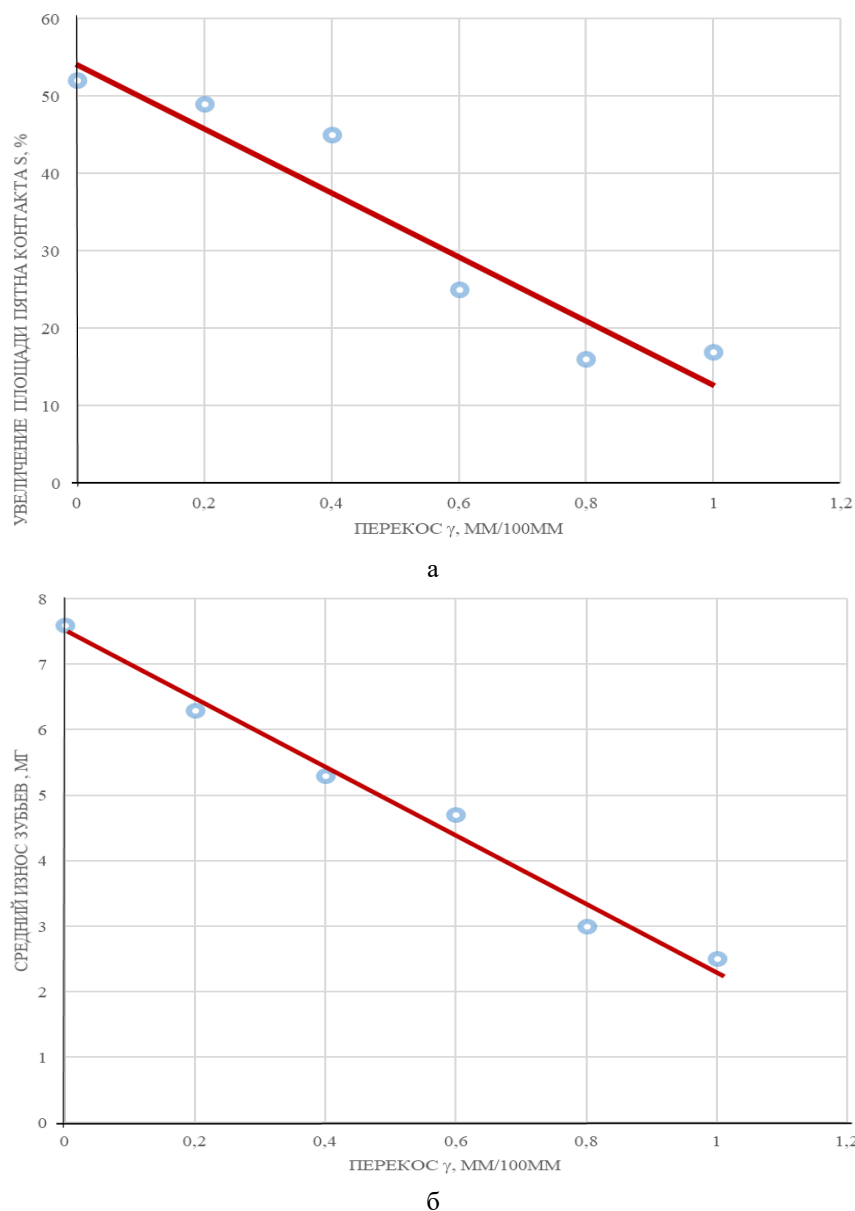


Рис. 6. Влияние перекоса осей зубчатого зацепления на увеличение площади пятна контакта зубьев (а) и массового износа шестерен (б) при ЭХМП

Кроме того, выявлено, что при значительных перекосах поверхностей зубьев шестерен процесс приработки затруднен, поскольку с увеличением перекоса осей шестерен интенсивность увеличения площади пятна контакта на зубьях уменьшается. Выявлено что при нулевом перекосе увеличение площади пятна контакта составило 53,2%, а при перекосе 1 мм / 100 мм длины – это увеличение не превышало 13,6%.

Существенного износа зубьев шестерен и увеличение площади пятна контакта без подачи переменного тока на сопряжения

зафиксировано не было. Это говорит о том, что механического фактора изнашивания при отсутствии нагружения зубьев в установке недостаточно. Механический износ данного сопряжения затруднен высокой контактной прочностью сопряженных поверхностей. Эти изменения обусловлены электрохимическими и механическими факторами, которые являются преобладающими в выбранных условиях.

Зависимость износа зубьев шестерен в процессе приработки от величины перекоса свидетельствует об эффективности процесса. Она снижается при увеличении перекоса, но

при перекосах до 3 раз, превышающих допустимые значения – способ эффективен (рис. 6, б).

Результаты приведенных исследований дают возможность утверждать, что способ приработки зубчатых зацеплений может при минимальной контактной нагрузке обеспечивает развитие площади пятна контакта. Электрохимическая составляющая процесса приработки при этом является наиболее эффективной, поскольку она протекает между трущимися поверхностями, разделенными слоем электролита.

Выводы

1. Теоретически разработана модель увеличения зазора при приработке зубчатых зацеплений, которая позволила связать основные факторы процесса.

2. Результаты экспериментальных исследований приработки зубчатых зацеплений выявили следующее:

– электрохимико-механическая приработка может быть применена для доводки зубчатых зацеплений, как эффективный метод исправления геометрии рабочих поверхностей сопряженных деталей;

– в зубчатых зацеплениях, имеющих перекося осей шестерен в пределах допустимых, применение приработки позволяет увеличить площадь пятна контакта на 53,2% от начального;

– эффективно процесс приработки протекает при перекосах зубчатых поверхностей до 3...4 раз превышающих допустимые значения по ТУ.

Список литературы

1. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей: монография. – Луганск: Элтон-2, 2011. – 204 с.
2. Замота Т.Н. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: монография // Т.Н. Замота, В.В. Аулин. – Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015. – 303 с.
3. Naik L.R.; Jain N.K.; Sharma A.K. Investigation on precision finishing of spur gears by electrochemical honing. In Proceedings of the 2nd

International and 23rd AIMTDR Conference, IIT Madras, India, 2008; 509–514.

4. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro-Chemical Mechanical Planarization (Ecmp) for Future Generation Device Technology. IEEE, 2004. – Pp.233-235.

5. Yuan– Long Chen, Shu– Min Zhu, Shuo– Jen Lee and other. The technology combined electrochemical mechanical polishing. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – Pp.203-205.

6. Shuo-Jen Lee, Yu-Ming Lee, Ming-Feng Du. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – Pp.280-286.

7. Замота Т.Н., Бондарец О.А. Развитие площади пятна контакта при макроприработке зубчатых зацеплений // Вестник ЛГУ им. В. Даля №7 (37) 2020. – С.54-60.

8. Замота Т.Н., Бондарец О.А.. Теоретическая модель процесса приработки эвольвентных поверхностей при ЭХМП зубчатых передач // Вестник ЛГУ им. В. Даля, №7 (61), 2022. - С. 53-58.

9. Кузьменко А.Г. Дослідження зносоконтактної взаємодії змащених поверхонь тертя: монографія / А.Г. Кузьменко, О.В. Диха.. – Хмельницький: ХНУ, 2005. – 183 с.

10. Замота Т.Н. Физико-химические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения / Т.Н. Замота // Проблемы трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2011., № 2. – С. 26...30.

References

1. Alekseev V.P. Electrochemical and mechanical macroprocessing of parts / V.P. Alekseev // Monograph. – Lugansk: Elton-2, 2011. – 204 p.
2. Zamota T.N. Control of the processes of running-in of the main interfaces of machine parts during manufacture and repair: Monograph // T.N. Zamota, V.V. Aulin.- Kirovograd: publisher Lysenko V.F.; 2015. - 303 p.
3. Naik L.R.; Jain, N.K.; Sharma, A.K. Investigation on precision finishing of spur gears by

electrochemical honing. In Proceedings of the 2nd International and 23rd AIMTDR Conference, IIT Madras, India, 2008; 509–514.

4. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrouti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro-Chemical Mechanical Planarization (Ecmp) for Future Generation Device Technology. IEEE, 2004. – Pp.233– 235.

5. Yuan– Long Chen, Shu– Min Zhu, Shuo– Jen Lee and other. The technology combined electrochemical mechanical polishing. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – Pp.203– 205.

6. Shuo– Jen Lee, Yu– Ming Lee, Ming– Feng Du. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – pp.280– 286.

7. Zamotay T. N., Bondarets O. A. development of the area of contact spot during macro-development of toothed hooks // Vestnik LSU im. V. Dahl No. 7 (37) 2020. – С.54-60.

8. Zamota T. N., Bondarets O. A.. Theoretical model of the process of working out evolvent surfaces in the ECMP of gears // Vestnik LSU im. V. Dahl, №7 (61) 2022. – С. 53-58.

9. Kuzmenko A. G., Dikha A.V. investigation of the wear and contact interaction of lubricated friction surfaces. Monograph-Khmelnitsky: KHNU, 2005. – 183 P.

10. Zamota T. N. Fiziko-khimicheskie osnovy protsessyа makropriabotki ploskikh oberezhnosti trenii [Fiziko-khimicheskie osnovy protsessyа makropriabotki ploskikh oberezhnosti trenii]. problemy tribologii [problems of tribology]. International scientific journal. – Khmelnytsky National University. – 2011., No. 2, – pp. 26-30.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024

Информация об авторах

Замота Тарас Николаевич, д-р.техн.н, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118

E-mail: zamota71@gmail.com

Бондарец Олег Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Information about the authors

Zamota Taras Nikolaevich, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automobile Transport of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

SPIN-код: 4443-7346, AuthorID: 1176118

E-mail: zamota71@gmail.com

Bondarets Oleg, senior Lecturer at the Department of "Automobile Transport" of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk.

Для цитирования:

Замота Т. Н., Чижевская Д. Ю. Электрохимико-механическая приработка ресурсопределяющих цилиндрических сопряжений деталей машин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Серия Технические науки. – 2025. – № 1(2). – С. 110-118.

For citation:

Zamota T. N., Chizhevskaya D. Yu. Electrochemical and mechanical running-in of resource-defining cylindrical mating of machine parts // Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Series Technical Sciences. – 2025. – № 1 (2). – P. 110-118.

**ВЕСТНИК ЛУГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»
№ 1 (1) 2024**

Серия Технические науки

Лит.редактор

Минина Я.В.

Рудник Ю.В.

Технический редактор

Коломиец-Кириллова Е.А.

Подписано в печати 25.02.2025.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Условных печатных стр. 10,11. Тираж 100 экз. Изд. № 01507.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
Луганского государственного университета
имени Владимира Даля

Адрес издательства: 291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20,а.

Тел.: 7(959) 138-34-80

E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com

https://izdat.daluniver.ru/