

Вестник

**Липецкого государственного
технического университета
(Вестник ЛГТУ)**

16+

**№ 4(57)
2024**

ISSN 3034-3275

ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета
(Вестник ЛГТУ)

№ 4 (57) 2024.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Регистрационный номер средства массовой информации Эл № ФС77-87639.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,

информационных технологий и массовых коммуникаций

(Роскомнадзор) 25.06.2024 г.

ISSN 3034-3275

ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета
(Вестник ЛГТУ)

№ 4 (57) 2024.

Научно-технический журнал

Регистрационный номер Эл № ФС77-87639 .

Главный редактор

д-р техн. наук, проф.

Шмырин Анатолий Михайлович

Зам. главного редактора

д-р техн. наук, доц.

Ризаева Юлия Николаевна

Редакционная коллегия:

**Информатика, вычислительная техника
и управление**

д-р техн. наук, проф. Погодаев А.К. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Сараев П.В. (Россия)

д-р физ.-мат. наук, проф. Пеньков В.Б. (Россия)

Машиностроение

д-р техн. наук, проф. Козлов А.М. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Мазур И.П. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Сосенушкин Е.Н.

(Россия)

д-р техн. наук, проф. Хейфец М.Л. (Беларусь)

Металлургия

д-р техн. наук, проф. Кнапински М. (Польша)

д-р техн. наук, проф. Коршиков В.Д. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Михайлов Е. (Болгария)

д-р техн. наук, проф. Найзабеков А.Б. (Казахстан)

Транспорт и логистика

д-р техн. наук, проф. Клявин В.Э. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Ли Р.И. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Ляпин С.А. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Ризаева Ю.Н. (Россия)

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Учредитель: © ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30. Адрес электронной почты редакции: vm@stu.lipetsk.ru

**ВЕСТНИК ЛИПЕЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА (ВЕСТНИК ЛГТУ)**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

**COMPUTER SCIENCES, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

СТР.

5 **А.А. Каниугин**
Технологические и тепловые
процессы на предприятиях
по производству сахара

A.A. Kaniugin
Technological and thermal processes
at sugar production enterprises

10 **Д.А. Подлесных, С.И. Шарапов**
Алгоритмы контроля и
прогнозирования интенсивности
выбросов поля атмосферного
радишума

D.A. Podlesnykh, S.I. Sharapov
Algorithms for controlling and forecasting
the intensity of atmospheric radio noise
field emissions

ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА

TRANSPORT AND LOGISTICS

14 **Б.Н. Казьмин, М.Д. Юров**
Особенности применения
четырёхзвенного планетарного
механизма в приводе вала отбора
мощности колёсного трактора

B.N. Kaz'min, M.D. Yurov
Features of the application of the four-
link planetary mechanism in the drive of
the power take-off shaft of a wheeled
tractor

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE-BUILDING

23 **В.В. Неверов, П.Н. Клевцов,
С.В. Лебедев**
Исследование свариваемости
сталей с содержанием углерода
более 0,4 % аустенитными
материалами

**V.V. Neverov, P.N. Klevtsov,
S.V. Lebedev**
Investigation of the weldability of steels
with a carbon content over 0.4 % with
austenitic materials

30 **А.В. Суханов**
Кинематический расчёт
цилиндрического редуктора с
раздвоенной быстроходной
ступенью

A.V. Sukhanov
Kinematic calculation of a cylindrical
reducer with a double high-speed stage

МЕТАЛЛУРГИЯ

METALLURGY

38 **В.Н. Титов, И.В. Куприянова,
Т.В. Кравченко**
Влияние температуры дутья на
показатели работы доменной печи

**V.N. Titov, I.V. Kupriyanova,
T.V. Kravchenko**
Influence of blast temperature on blast
furnace performance indicators

- 44** **К.Н. Плешивцев,**
А.Н. Роготовский, Е.Н. Тюленев,
О.Ю. Шешуков, А.А. Метелкин
Удаление углерода
в циркуляционном вакууматоре
при пониженном давлении
- К.N. Pleshivtsev,**
A.N. Rogotovskiy, E.N. Tyulenev,
O.Yu. Sheshukov, A.A. Metelkin
Carbon removal at reduced pressure in
an RH degasser
- 49** К сведению авторов
- 50** Пример оформления статьи для
публикации в журнале

А.А. КАНЮГИН

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ САХАРА**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: Технологические процессы производства сахара являются наиболее энергозатратными в пищевой промышленности. Большое количество тепловых и массообменных процессов протекает на всем этапе производства данной продукции. Описание и моделирование технологических процессов сахарного производства производится в совокупности с процессами тепломассообмена. Тепловой режим и технологический режим можно представить в виде двух систем, которые тесно связаны между собой. В данной статье укрупненная технологическая схема в масштабе отделений предприятия формализуется в виде двух окрестностных структур (орграфов с переменными в вершинах и дугах) на одном и том же множестве узлов (отделений). Первая, «линейная» окрестностная структура, соответствует укрупненной технологической схеме без учета тепловых процессов. Вторая, «лучевая» окрестностная структура, описывает тепловые процессы. Целью данного подхода является формирование окрестностной системы, в которой технологическая часть, не связанная непосредственно с процессами тепломассообмена, максимально сокращена, что упрощает решение задачи управления тепловым режимом сахарного производства на основе окрестностной модели.

Ключевые слова: тепловые процессы, окрестностная структура, окрестностная система.

A.A. KANIUGIN

**TECHNOLOGICAL AND THERMAL PROCESSES AT SUGAR PRODUCTION
ENTERPRISES**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: Technological processes of sugar production are the most energy-consuming in the food industry. A large number of thermal and mass-exchange processes take place throughout the production of this product. Technological processes of sugar production are described and modelled together with heat and mass transfer processes. The thermal regime and the technological regime can be represented as two systems closely related to each other. In this paper, an enlarged technological scheme on an enterprise section scale is formalized as two neighborhood structures (orgraphs with vertexes in nodes and arcs) on the same set of nodes (sections). The first, “linear”, neighborhood structure corresponds to an enlarged technological scheme without any account of thermal processes. The second, “ray”, neighborhood structure describes thermal processes. The purpose of this approach is to form a neighborhood system in which the technological part with no direct relation to heat and mass transfer processes is maximally reduced, which simplifies the solution of the problem of controlling the thermal regime of sugar production on the basis of the neighborhood model.

Key words: thermal processes, neighborhood structure, neighborhood system.

ВВЕДЕНИЕ

Для построения системы технологического процесса в масштабе отделений необходимо понимать общую структуру предприятия по производству сахара-песка. Любое производство состоит из $x_1, x_2 \dots x_i$ отделений (цехов) с определенными связями между собой и внутри себя, которые воздействуют на технологическую среду. На примере сахарного завода можно выделить основное (технологическое) производство и вспомогательное производство (табл.).

Таблица

Отделения сахарного производства

Обозн.	Наименование отделения
x_1	Свекломоечное отделение
x_2	Диффузионное отделение
x_3	Отделение сокоочистки
x_4	Выпарная станция
x_5	Кристаллизационное отделение
x_6	Отделение сушки и упаковки продукции
x_7	ТЭЦ
x_8	Конденсатное хозяйство
x_9	Известково-обжигательное отделение

В данной таблице x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , считаются основными технологическими станциями, x_7 и x_9 – вспомогательными отделениями, x_8 – принимается как отдельная вспомогательная станция для дальнейшего упрощения построения системы. Связи между отделениями и внутри отделений представляют собой направленное воздействие на количественное или качественное изменение технологической или иной среды как объекта производства. В данном масштабе не затрагивается конкретное технологическое оборудование исходя из условий масштаба построения системы. Такая система дает принципиальное представление протекания процессов на производстве, целью которой является преодоление психологической инерции в поиске новых путей по рационализации производства. В данном случае представление протекания

тепловых процессов с целью поиска путей рационализации потребления топливно-энергетические ресурсы (ТЭР).

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ

Каждое отделение выполняет свою функцию с целью получения технологического продукта требуемых характеристик. При этом инструментом в достижении заданной цели является воздействие на технологический продукт. Это воздействие может быть химическим, механическим, биологическим, тепловым или комбинированным. Источники этого воздействия могут быть разные. Рассмотрим технологический процесс получения сахара-песка.

Основными воздействиями между отделениями сахарного завода являются химическое, механическое и тепловое. Технологическое производство обеспечивает получение готового продукта с помощью использования этих воздействий в комплексе. Существуют основные технологические среды, которые обрабатываются, перемещаются, фильтруются; и вспомогательные среды, которые оказывают воздействие на основные путем нагрева или смешения. Например, нагрев паром сиропа, или разбавление сиропа конденсатом или паром, выпаривание воды из сиропа [1]. Воздействие может протекать в виде теплообменного процесса или в виде теплообменного процесса.

Проведем отдельное описание системы с точки зрения протекания процессов между каждым отделением. На рис.1 изображена схема основных и вспомогательных станций с двумя типами протекающих процессов: основные технологические процессы и тепловые процессы. Согласно схеме видно, что основные технологические процессы протекают «линейно», от станции к станции, в то время как тепловые процессы и массообменные процессы имеют «лучевую» структуру течения из нескольких источников. Таким образом, весь технологический процесс можно описать как

$$X \left\{ \begin{array}{l} x_{1-2}, x_{2-3}, x_{3-4}, x_{4-5}, x_{5-6}, \\ x_{3-9}, x_{9-3}, x_{2-2} \end{array} \right\}.$$

Весь тепловой процесс, соответственно:

$$X' \left\{ \begin{array}{l} x'_{4-2}, x'_{4-3}, x'_{4-4}, x'_{4-5}, x'_{4-6}, \\ x'_{4-8}, x'_{4-9}, x'_{5-3}, x'_{5-5}, x'_{6-4}, \\ x'_{8-1}, x'_{8-2}, x'_{8-3}, x'_{8-5}, x'_{8-6}, x'_{9-9} \end{array} \right\}.$$

На первый взгляд может показаться, что технологический процесс X имеет меньше воздействий и значительно проще, чем протекание X' . Но это не так.

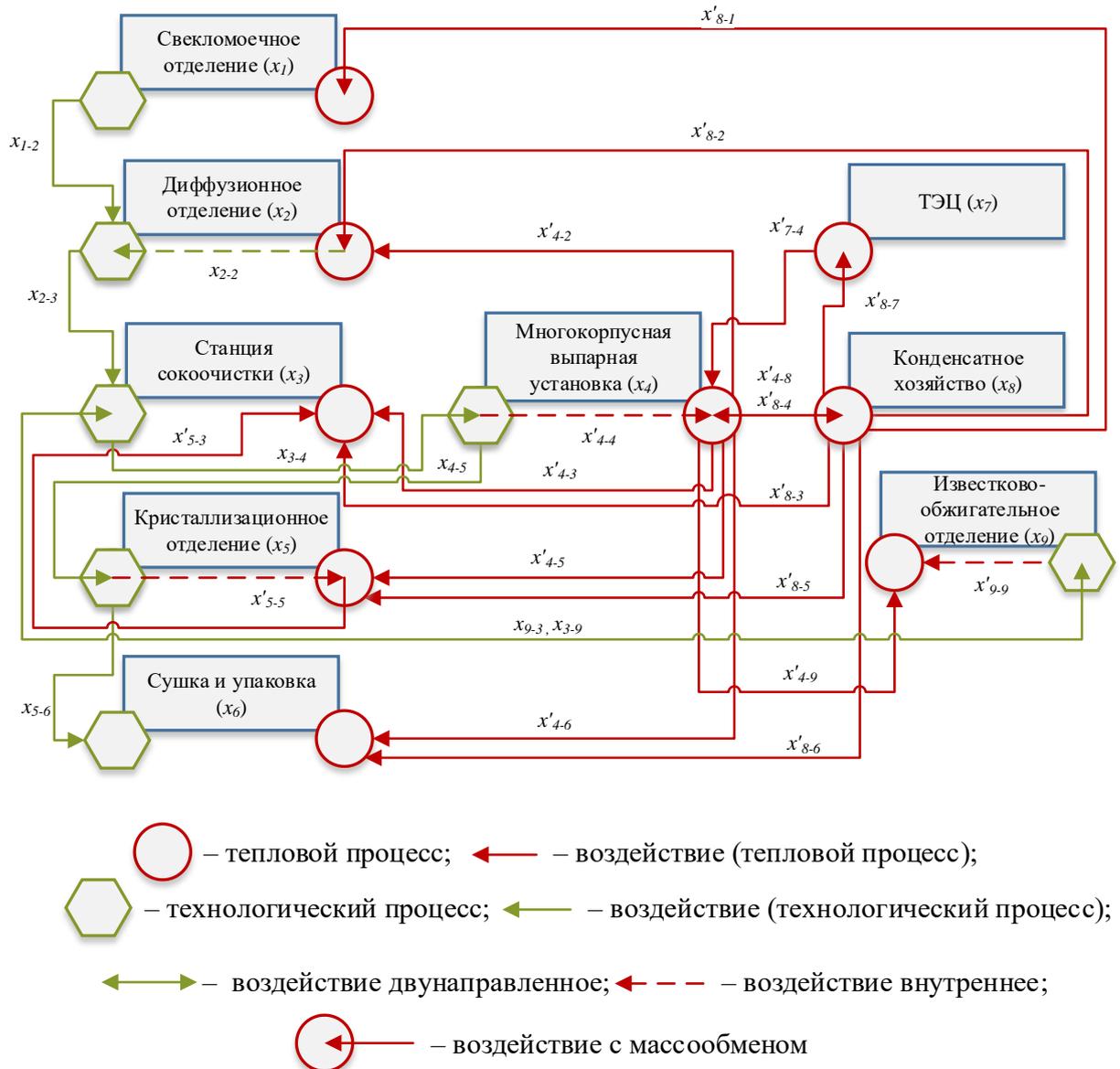


Рис. 1. Схема процессов основных и вспомогательных станций сахарного завода

Поэтому множество технологических воздействий не отражается в данном масштабе в отличие от тепловых и массообменных процессов. В этом и заключается основное преимущество упрощения системы до уровня отделений.

Еще одна особенность данной системы заключается в том, что отделение x_8 (конденсатное хозяйство) было выделено в отдельную станцию (узел). Фактически конденсатное хозяйство является частью

каждого отделения основного производства [1]. Данное допущение сделано не только с целью упрощения системы. Конденсатное хозяйство оказывает большое воздействие на каждую из основных станций, что хорошо видно по количеству связей

$x'_{8-1}, x'_{8-2}, x'_{8-3}, x'_{8-5}, x'_{8-6}$. Помимо этого, роль конденсатного хозяйства как отдельной станции на производстве

становится все более значимой с внедрением схем по экономии ТЭР [2].

ПОСТРОЕНИЕ ОКРЕСТНОСТНОЙ СИСТЕМЫ

Построим окрестностную структуру в виде ориентированного графа.

Узлами графа будут являться отделения, а связи представляют собой воздействия на данные узлы [3]. На рис. 2 показана окрестностная структура технологического процесса производства сахара-песка в виде ориентированного графа.

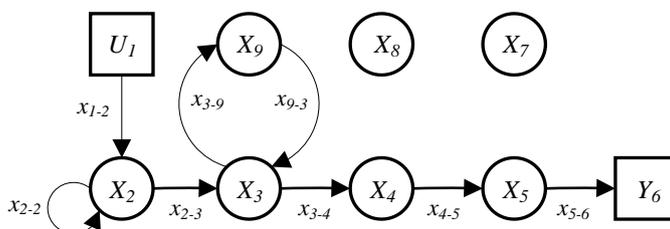


Рис.2. Окрестностная модель технологического процесса производства сахара-песка

В данной окрестностной системе представленные связи

$x_{1-2}, x_{2-3}, x_{3-4}, x_{4-5}, x_{5-6}, x_{3-9}, x_{9-3}$ являются воздействием на основной технологический поток между отделениями (химическое, механическое).

Связь в виде петли x_{2-2} является воздействием массобменного характера, которое происходит внутри отделения. Это не означает, что отсутствие петель в других узлах говорит о том, что в отделениях отсутствуют технологические процессы, которые протекают в границе отделения. Данная петля показывает, что существует воздействие на технологический поток в данном узле из системы, не связанной с технологическим потоком, а именно из системы, которая описывает тепловые процессы. Например,

в диффузионном отделении x_2 происходит процесс экстракции сахарозы из сырья в питательную воду, которая является аммиачным конденсатом [2]. Данный конденсат поступает x'_{8-2} из конденсатного хозяйства x_8 и в диффузионном отделении превращается в основной технологический продукт x_{2-2} , при этом x'_{8-2} описывает не только приток конденсата в x_2 , но и другие тепловые процессы в виде нагрева стружки и диффузионного сока. Таким образом весьма тесно связанные процессы общей системы можно разделить на отдельные.

На рис. 3 показана окрестностная структура теплового процесса производства сахара-песка в виде ориентированного графа [3,4].

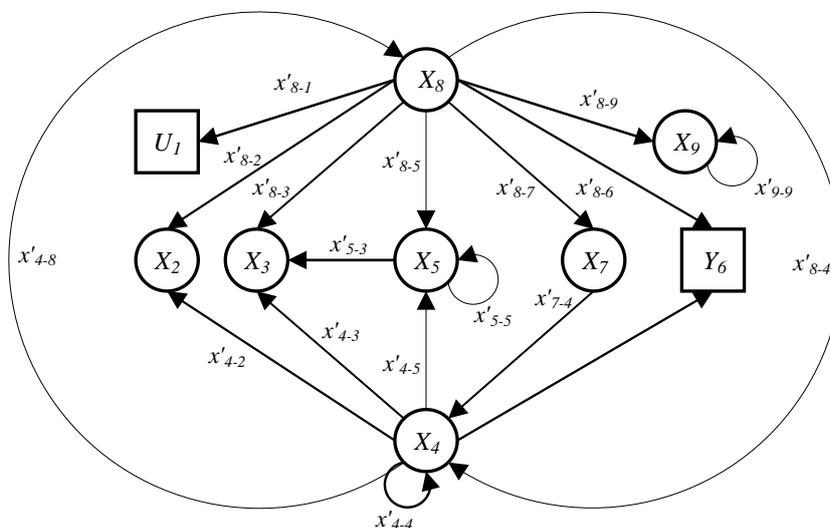


Рис.3. Окрестностная модель теплового процесса производства сахара-песка

Аналогичным образом построены связи между узлами по тепловым воздействиям. Следует уточнить, что под тепловым воздействием учитывается также и массообмен, так как эти процессы происходят в совокупности. В данной системе наглядно видны воздействия в виде петель в узлах x_4, x_5, x_9 . Данные петли означают обратное воздействие в данном отделении на тепловые процессы в виде переноса вещества и тепловой энергии из технологического потока. Например, испарение влаги из сахаросодержащего утфеля x'_{5-5} в продуктовом отделении x'_5 , и использование ее в виде пара для нагрева x'_{5-3} диффузионного сока в отделении сокоочистки x'_3 . Стоит также отметить, что необходимо четко понимать, какое из данных типов воздействий является целенаправленным, а какое сопутствующим в результате другого воздействия. Сопутствующие воздействия могут сильно усложнить систему, при этом не оказывая влияния на нее в целом, так как являются частью другого целенаправленного

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Силин, П.М.** Технология сахара / П.М. Силин. – Москва : Пищевая промышленность, 1967. – 625 с. – Текст : непосредственный.
2. **Штангеев, К.О.** Рационализация теплоиспользования в свеклосахарной промышленности / К.О. Штангеев. – Москва : МГУПП–Пищепромэнерго-наладка, 2005. – 68 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Канюгин Андрей Артурович
аспирант кафедры высшей математики,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
kanyginandrey@yandex.ru

воздействия. Именно такие связи могут быть раскрыты, выделены и исключены при построении окрестностной системы в масштабе оборудования каждого отделения и в масштабе функциональных узлов технологического оборудования отделения.

ВЫВОДЫ

Построение окрестностных систем двух типов для производства сахара-песка позволило наглядно продемонстрировать возможность разделения основных и вспомогательных процессов, которые всегда протекают в комплексе. В данном случае такой подход позволяет структурировать взаимосвязи между отделениями в каждой системе отдельно. Это позволит упростить построение расширенной модели в масштабе технологического оборудования каждого отделения, следовательно, упрощает поиск путей по рационализации использования ТЭР и управлению тепловым режимом сахарного производства.

3. **Блюмин, С.Л.** Окрестностные системы / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин. – Липецк : ЛЭГИ, 2005. – 132 с. – Текст : непосредственный.
4. **Мишачев, Н.М.** Дискретные системы и окрестностные структуры / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин. – Текст : непосредственный // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – Тамбов. – 2018. – Т. 23. – № 123. – С. 473–478.

Information about the authors:

Kaniugin Andrey Arturovich
Postgraduate student of the Department
of Higher Mathematics,
Lipetsk State Technical University.
398055, Russia, Lipetsk,
Moskovskaya st., 30.
kanyginandrey@yandex.ru

Д.А. ПОДЛЕСНЫХ, С.И. ШАРАПОВ

АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫБРОСОВ ПОЛЯ АТМОСФЕРНОГО РАДИОШУМА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассматривается исследовательский комплекс контроля и прогнозирования выбросов поля грозовых радиопомех. Предложены алгоритмы контроля и прогнозирования выбросов поля атмосферного радиошума. Сравниваются измеренные и прогнозируемые параметры выбросов поля.

Ключевые слова: атмосферные перенапряжения, атмосферерики, грозовые радиоимпульсы, статистические характеристики, алгоритм, распределения среднего числа выбросов.

D.A. PODLESNYKH, S.I. SHARAPOV

ALGORITHMS FOR CONTROLLING AND FORECASTING THE INTENSITY OF ATMOSPHERIC RADIO NOISE FIELD EMISSIONS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article describes a system of controlling and forecasting lightning radio noises field emissions. Algorithms for controlling and forecasting the intensity of the field emissions are proposed. The measured and forecasted parameters of the lightning radio noise field emissions are compared.

Keywords: atmospheric overvoltage, atmospheric, lightning radio pulses, statistical characteristics, algorithm, distribution of the average number of emissions.

ВВЕДЕНИЕ

Системы радиосвязи, передачи электроэнергии, электронные приборы чувствительны к флуктуациям внешних электромагнитных полей, одним из источников которых являются грозовые разряды. Воздействие возникающих атмосферных помех или атмосферериков приводит к сбоям в работе указанных систем. Для обеспечения их устойчивого функционирования необходимо иметь информацию о распределении амплитуд и количестве выбросов электромагнитного поля, воздействующих на объекты электроэнергетики и связи [1].

В данной статье показаны некоторые алгоритмы, используемые для контроля и прогнозирования выбросов поля атмосферериков на основе анализа распределения числа выбросов огибающей естественных электромагнитных полей грозовых разрядов.

Блок-схема исследовательского комплекса контроля и прогнозирования выбросов электромагнитных полей атмосферериков проведена на рис. 1 и описана ранее в [2].



Рис. 1. Блок-схема исследовательского комплекса

Сигналы управления - светлые стрелки;

Передача данных - темные стрелки.

Исследовательский комплекс включает в себя:

а) измерительный блок, передающий данные на блок регистрации; с вертикальной штыревой антенной, с предварительным усилителем и переключающим реле, управляемым блоком управления;

б) калибровочный блок, представляющий собой генератор нормального шума с мощностью, заданной блоком управления;

в) регистрирующий блок, в котором блоком управления задаются частота приема, полоса пропускания и коэффициент усиления, состоящий из узкополосного приемника и многоканального регистратора, получающего

данные с измерительного блока через фильтр низких частот;

г) блок управления, функционирующий по приведенному ниже алгоритму на рис.2.

Блок управления на выходе выводит информацию о статистических характеристиках атмосферного радишума, а именно распределения среднего числа выбросов $N(E>E_0)$, распределения вероятностей амплитуды $P(E>E_0)$ атмосфериков, а также среднеквадратичное, среднее и среднее логарифмическое $E_{ср.кв.}$, $E_{ср.}$ и $E_{ср.лог.}$ значения напряженности поля атмосферного радишума.

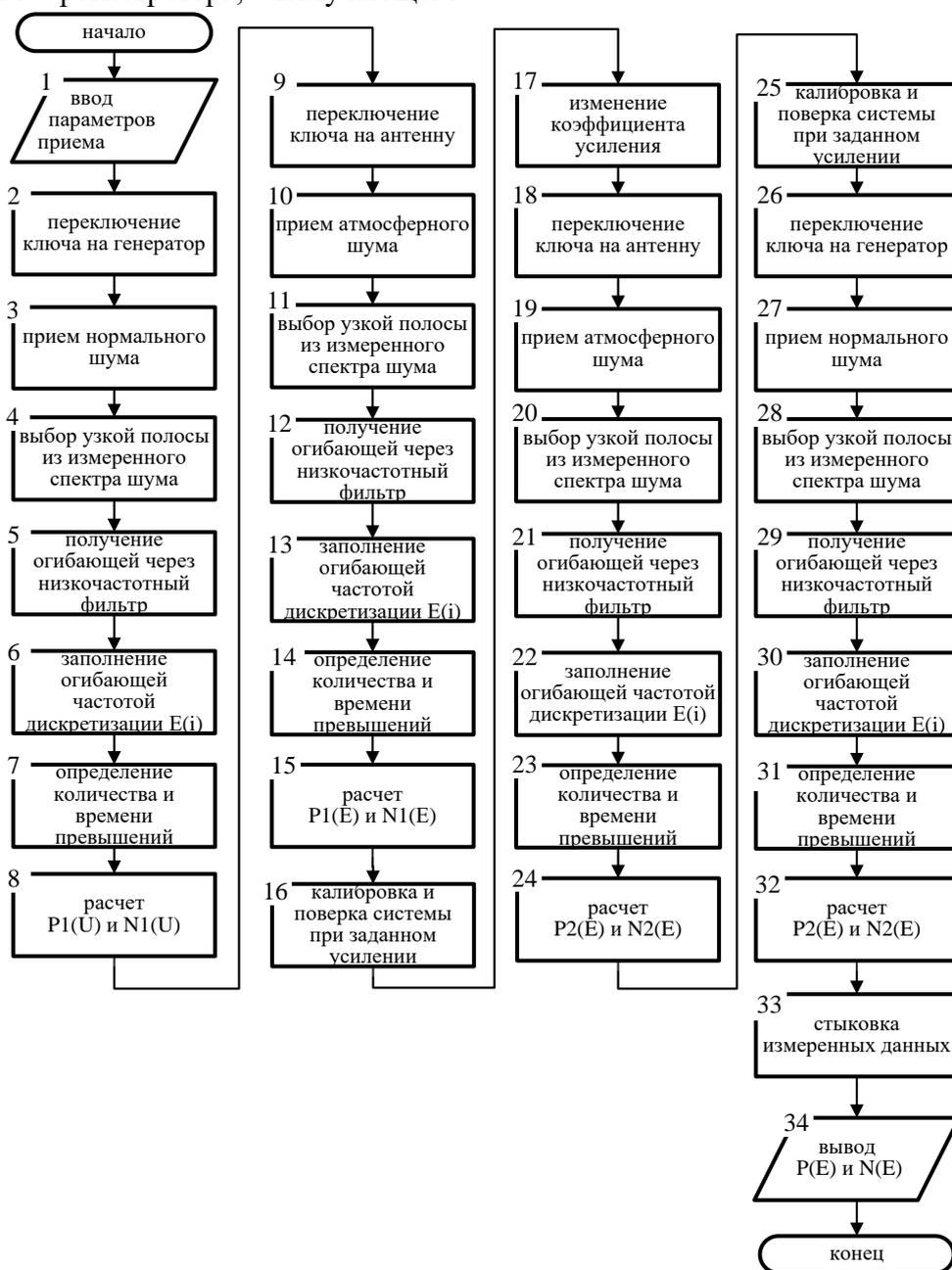


Рис. 2. Алгоритм проведения измерений и обработки результатов

Данный измерительный комплекс соответствует требованиям [3], необходимым для сравнения полученных данных с измерениями других международных измерительных систем, что позволяет использовать этот комплекс для расчета прогнозируемого распределения среднего числа выбросов в местах, удаленных от измерительного комплекса и места проведения эксперимента, и сравнения с измеренными данными, как показано ниже.

Измерения и расчет прогнозируемых значений параметров атмосферного радишума производились для г. Липецка на частоте измерения 9,8 кГц в полосе пропускания 0,2 кГц. На рис. 3. представлено сравнение распределения среднего числа выбросов, полученного по результатам измерений (точки), с рассчитанным по данным [3] (сплошная и пунктирные линии).

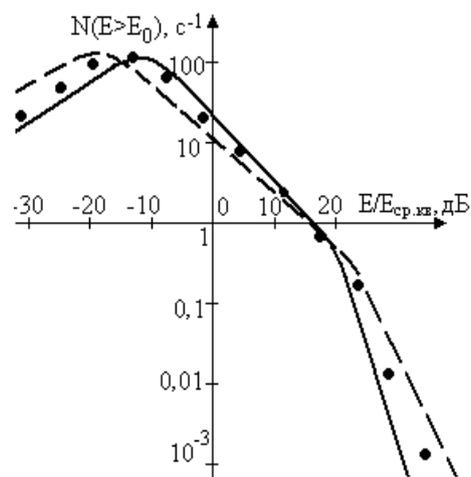


Рис. 3. Распределение среднего числа выбросов атмосферного радишума
ВЫВОД

Прогнозируемое среднеквадратичное значение напряжённости $E_{\text{ср.кв.}}$ лежит в диапазоне $170,0 \div 104,8$ мкВ/м, а измеренное равно 128,3 мкВ/м, что соответствует прогнозируемому диапазону значений. Результаты сравнения прогнозируемых и измеренных значений распределения среднего числа выбросов атмосферного радишума удовлетворительные (рис. 3). Это показывает возможность прогнозирования параметров распределения среднего числа выбросов атмосферного радишума, используя разработанные алгоритмы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ГОСТ 30585-98.** Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний = Electromagnetic compatibility of technical equipment. Resistant to lightning strikes. Technical requirements and test methods. – Москва : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск. 2005. – 29 с. – Текст : непосредственный.

2. **Подлесных, Д.А.** Информационно-измерительная система контроля

интенсивности потока импульсов атмосферных радиопомех : диссертация на соискание степени кандидата технических наук (05.11.16) / Д.А. Подлесных. – Липецк : ЛГТУ, 2008. – 135 с. – Текст : непосредственный.

3. International Radio Consultative Committee (CCIR), World distribution and characteristics of atmospheric radio noise: Report 322 / Int. Telecommun. Union. - Geneva, Switz., 1964. – 62 p. – Text : immediate.

Сведения об авторах:

Подлесных Дмитрий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
кафедры физики и биомедицинской
техники,

Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

im99pda@mail.ru

Шарапов Сергей Иванович

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики и биомедицинской
техники,

Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

Information about the authors:

Podlesnykh Dmitry Alekseevich,

Candidate of Technical Sciences , Associate
Professor of the Department of Physics and
Biomedical Engineering,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

im99pda@mail.ru

Sharapov Sergey Ivanovich,

Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor of the Department
of Physics and Biomedical Engineering,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

DOI 10.53015/30343275_2024_4_14
УДК 631.371

Б.Н. КАЗЬМИН, М.Д. ЮРОВ

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧЕТЫРЁХЗВЕННОГО ПЛАНЕТАРНОГО
МЕХАНИЗМА В ПРИВОДЕ ВАЛА ОТБОРА МОЩНОСТИ КОЛЁСНОГО
ТРАКТОРА**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассмотрена возможность использования четырёхзвенного планетарного механизма для получения многоскоростного привода вала отбора мощности колёсного трактора.

Ключевые слова: колёсный трактор, рабочее оборудование, привод вала отбора мощности.

B.N. KAZ'MIN, M.D. YUROV

**FEATURES OF THE APPLICATION OF THE FOUR-LINK PLANETARY MECHANISM
IN THE DRIVE OF THE POWER TAKE-OFF SHAFT OF A WHEELED TRACTOR**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article considers the possibility of using a four-link planetary mechanism to obtain a multi-speed drive of the power take-off shaft of a wheeled tractor .

Keywords: wheeled tractor, working equipment, power take-off shaft drive.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашей стране сложилась довольно сложная экономическая ситуация, поэтому тракторостроительная промышленность также оказалась в нелёгком положении. Основными потребителями продукции тракторных заводов в недавнем прошлом являлись крупные сельскохозяйственные предприятия – колхозы и совхозы, осуществляющие массовую закупку тракторов. Однако в последнее время эти хозяйства оказались не в состоянии осуществлять крупные закупки тракторов. Фермерские хозяйства в связи с их небольшими размерами и ограниченными финансовыми возможностями также не в состоянии приобрести тракторы в больших количествах.

Тракторостроительной промышленности необходимо учитывать потребности рынка и ориентировать свою продукцию на удовлетворение большинства запросов потребителей. Это означает, что необходимо создание и совершенствование универсальных тракторов, способных выполнять широкий спектр сельскохозяйственных работ. Ещё одним важнейшим направлением развития тракторной техники является оснащение тракторов различными устройствами и приспособлениями, позволяющими максимально эффективно использовать тракторный агрегат, обеспечивать более высокие эксплуатационные показатели, облегчающие труд механизатора.

Интенсивное развитие агропромыш-

ленного комплекса на основе внедрения высокоэффективных технологий невозможно без создания высокопроизводительных, надёжных и экономичных машинно-тракторных агрегатов с широким комплексом современных многооперационных орудий.

ТЕОРИЯ/РАСЧЕТ

В настоящее время существует несколько способов передачи мощности от двигателя трактора к активным рабочим органам машин. Разделяются они по виду энергоносителя, посредством которого происходит передача мощности между трактором и агрегатом на механические системы отбора мощности или валы отбора мощности (ВОМ); гидравлические системы отбора мощности (ГСОМ); электросистемы отбора мощности; пневмосистемы отбора мощности.

На современном этапе ВОМ совершенствуются и развиваются по следующим направлениям [1]:

- а) обеспечение стабильности частоты вращения независимого ВОМ 540 ± 15 и 1000 ± 25 мин⁻¹ при номинальной частоте вращения двигателя n_n от 0,6...0,8 от номинальной частоты вращения двигателя;
- б) совмещение независимого и синхронного ВОМ для обеспечения агрегатирования трактора с комплексными сельскохозяйственными машинами, требующими привода рабочих органов;
- в) повышение КПД ВОМ за счет уменьшения числа зубчатых пар в зацеплении, потерь в включениях фрикционных элементов;
- г) снижение материалоемкости при одновременном обеспечении надёжности путем выбора рациональных схем его конструкции.

Анализ конструкций задних ВОМ тракторов основных зарубежных фирм показывает, что двухскоростной привод применяется в основном на тракторах с

мощностью на ВОМ 36,8...110 кВт. Для тракторов меньшей мощности используется односкоростной привод, позволяющий передать всю мощность двигателя. Для тракторов с мощностью на ВОМ более 110 кВт используется односкоростной привод с частотой вращения 1000 мин⁻¹, так как применение на данных тракторах привода 540 мин⁻¹, передающего только незначительную часть мощности двигателя, нецелесообразно с экономической точки зрения [2].

Для привода большинства сельскохозяйственных машин, агрегируемых с трактором, техническими требованиями предписываются постоянная частота вращения ВОМ, что обусловлено постоянной работой двигателя на номинальных или близких к номинальным частотам вращения, характеризующихся повышенным расходом топлива. В то же время мощность, затрачиваемая на привод многих сельскохозяйственных машин и агрегатов при выполнении ими ряда операций незначительна, и ее возможно получить на частичных режимах работы двигателя. Однако переход на эти режимы связан с уменьшением частоты вращения коленчатого вала двигателя и ВОМ трактора, что приводит к нарушению нормальной работы сельхозмашин, рассчитанных на стандартную частоту вращения ВОМ.

С целью повышения топливной экономичности тракторы, оснащённые двигателями постоянной мощности, могут эксплуатироваться в так называемом экономичном режиме, т.е. при пониженной частоте вращения коленчатого вала. Частота вращения хвостовика ВОМ в этом случае должна соответствовать указанным выше величинам, что обеспечивается встраиванием в привод ВОМ соответствующих редукторов с передаточным числом, компенсирующим снижение частоты вращения двигателя.

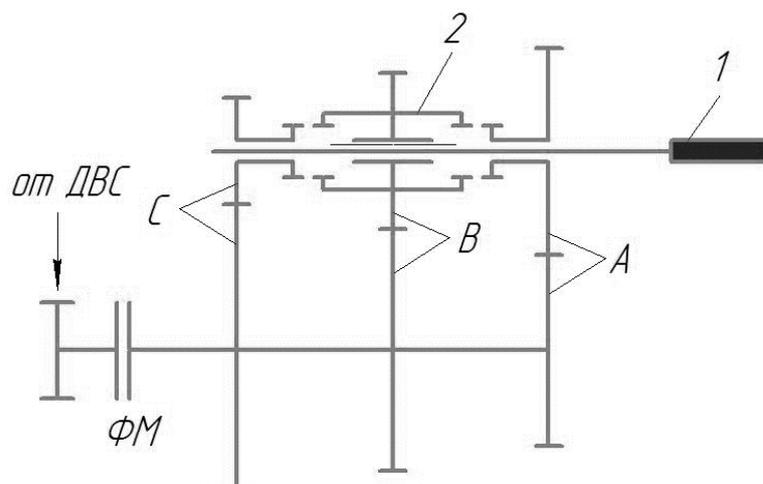


Рис. 1. Схема трёхскоростного независимого ВОМ:
1 – хвостовик ВОМ; 2 – подвижная зубчатая муфта

Некоторые зарубежные тракторы с целью повышения экономичности МТА на работах с незначительной нагрузкой двигателя по мощности снабжают трехскоростным ВОМ. Примером могут служить тракторы моделей 303LS-308LS фирмы «Fendt», на которых по заказу потребителей устанавливаются ВОМ, обеспечивающие $n_{\text{ВОМ}}=540$, 750 и 1000 мин^{-1} . Схема трехскоростного независимого ВОМ представлена на рис. 1.

Редуктор привода независимого ВОМ выполнен двухвальным, с шестернями постоянного зацепления. Передача момента от ДВС осуществляется через фрикционную муфту ФМ. Ведомые шестерни, необходимые для получения двух стандартизованных частот вращения $n_1=540 \text{ мин}^{-1}$ и $n_2=1000 \text{ мин}^{-1}$, выполнены двухвенцовыми и свободно установлены на валу. Ведомая шестерня для получения третьей частоты вращения $n_3=750 \text{ мин}^{-1}$ выполнена совместно с двухсторонней зубчатой шлицевой муфтой 2. Изменение частоты вращения хвостовика ВОМ 1 осуществляется перемещением зубчатой муфты в осевом направлении до зацепления с зубчатыми венцами ступиц ведомых колёс, обеспечивающих стандартизованные частоты вращения. Передача момента через зубчатую пару А обеспечивает частоту вращения $n_1=540$

мин^{-1} , через пару С – $n_2=1000 \text{ мин}^{-1}$, а через пару В – $n_3=750 \text{ мин}^{-1}$. Отключение привода производится муфтой управления ФМ.

Привод $n_3=750 \text{ мин}^{-1}$ получил название «экономичный» ВОМ, при работе с такой скоростью при снижении частоты вращения до 70...75 % от номинальной обеспечивается экономией топлива до 30 %. Это вполне окупает затраты, связанные с некоторым усложнением конструкции привода ВОМ. Наличие третьей частоты вращения позволяет двигателю работать на частичных режимах для машин и имеющих привод с первой низшей стандартной скоростью $n_1=540 \text{ мин}^{-1}$.

Постоянное увеличение доли сельскохозяйственных машин, привод которых осуществляется со второй повышенной стандартизированной скоростью $n_2=1000 \text{ мин}^{-1}$, требует обеспечения такой возможности и для данной частоты вращения ВОМ, т.е. имеется необходимость в четырёхскоростном ВОМ, и уже сейчас многие зарубежные фирмы (Massey-Ferguson, Steyr и др.) предлагают оснащение ими некоторые модели своих тракторов. Схема четырёхскоростного ВОМ фирмы «Massey-Ferguson» представлена на рис. 2.

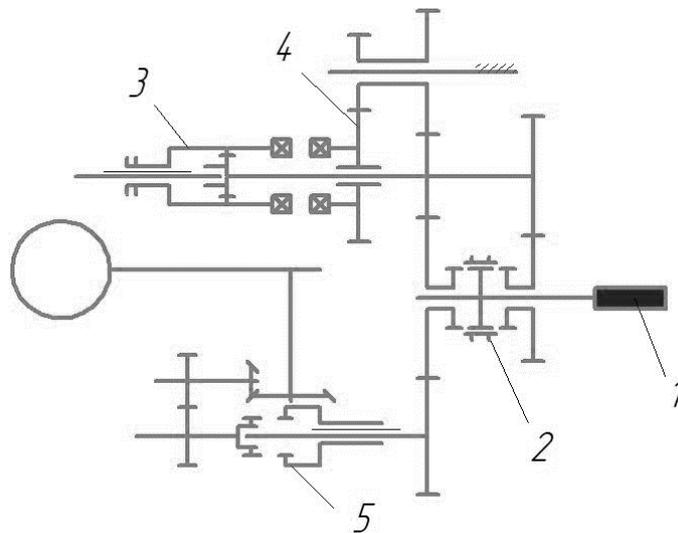


Рис. 2. Схема четырехскоростного ВОМ фирмы «Massey-Ferguson»

Данная схема сложнее, но дает возможность получить четыре скорости независимого ВОМ и две синхронного. Основной двухступенчатый редуктор позволяет получить стандартизованные частоты вращения независимого ВОМ $n_1=540 \text{ мин}^{-1}$ и $n_2=1000 \text{ мин}^{-1}$ выходного хвостовика 1 посредством осевого перемещения муфты 2. Один из дополнительных редукторов, предназначенный для обеспечения частот вращения независимого ВОМ на частичных режимах работы двигателя, оборудован торцевой кулачковой муфтой 3. Включение дополнительных скоростей осуществляется связью муфты 3 с шестерней 4 дополнительного редуктора и перемещением муфты 2 основного редуктора.

Второй дополнительный редуктор, предназначенный для получения синхронных частот вращения ВОМ, выполняется конически-цилиндрическим и оборудуется подвижной зубчатой полумуфтой 5. Две синхронные частоты вращения обеспечиваются осевыми перемещениями муфт 2 и 5.

Величину четвертой скорости ВОМ можно определить из произведения величины второй стандартизованной скорости на отношение первой стандартизованной скорости к третьей, то есть её значение составит $1000 \times 540 / 750 = 1389 \text{ мин}^{-1}$.

Округляя данное значение, получаем следующий скоростной ряд

четырёхскоростных ВОМ: первая стандартизованная скорость $n_1=540 \text{ мин}^{-1}$; вторая стандартизованная скорость – $n_2=1000 \text{ мин}^{-1}$; первая дополнительная скорость – $n_3=750 \text{ мин}^{-1}$; вторая дополнительная скорость – $n_4=1500 \text{ мин}^{-1}$.

Недостатком вышерассмотренной конструкции является низкий КПД, т.к. в зацеплении одновременно находится большое количество шестерен. Если идти по пути фирмы «Fendt», то для обеспечения четвертой скорости необходимо дополнительное введение пары шестерней, в результате чего редуктор ВОМ превратится в четырехступенчатую двухвальную коробку передач с довольно сложным управлением. Поэтому для разработки таких ВОМ возможно использовать четырехзвенные планетарные механизмы, кинематические схемы которых представлены на рис. 3.

Общий элемент таких схем – механизм переключения, выполненный, например, в виде зубчатой муфты m , установленной на приводном валу n . В одном положении (сплошная линия) муфта соединяет вал с входным звеном планетарного механизма, в результате один из выходных хвостовиков получает стандартизованную частоту вращения n_1 или n_2 , в другом положении (тонкая штриховая линия) – с выходным звеном планетарного механизма, в результате другой хвостовик получает дополнительную частоту вращения n_3 или n_4 .

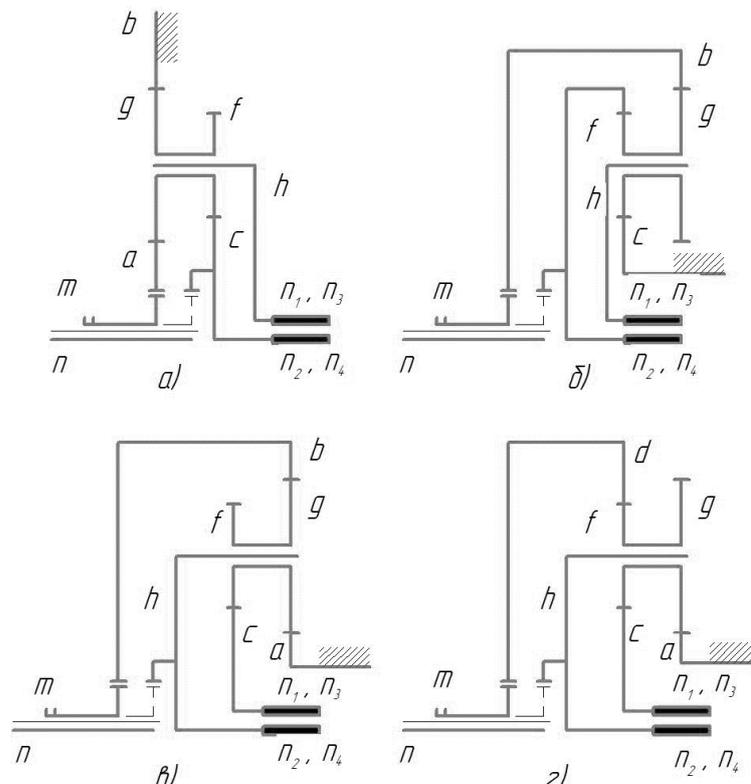


Рис. 3. Кинематические схемы четырёхскоростных ВОМ на основе четырёхзвенных планетарных механизмов: *a, c* – центральные (солнечные) шестерни с наружными зубьями, соответственно с меньшим и большим числом зубьев; *b, d* – центральные шестерни с внутренними зубьями (эпициклы), соответственно с большим и меньшим числом зубьев; *g, f* – венцы сателлитов, соответственно с большим и меньшим числом зубьев; *h* – водило

Использование в таких схемах гидравлического привода и фрикционных муфт (см. рис. 4) позволит значительно упростить управление. Однако в таких

конструкциях придется использовать сменные хвостовики ВОМ, что влечёт за собой некоторые недостатки.

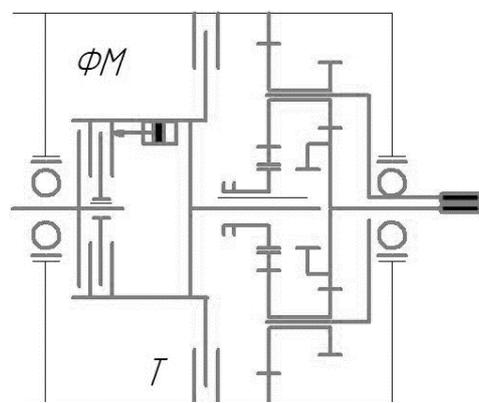
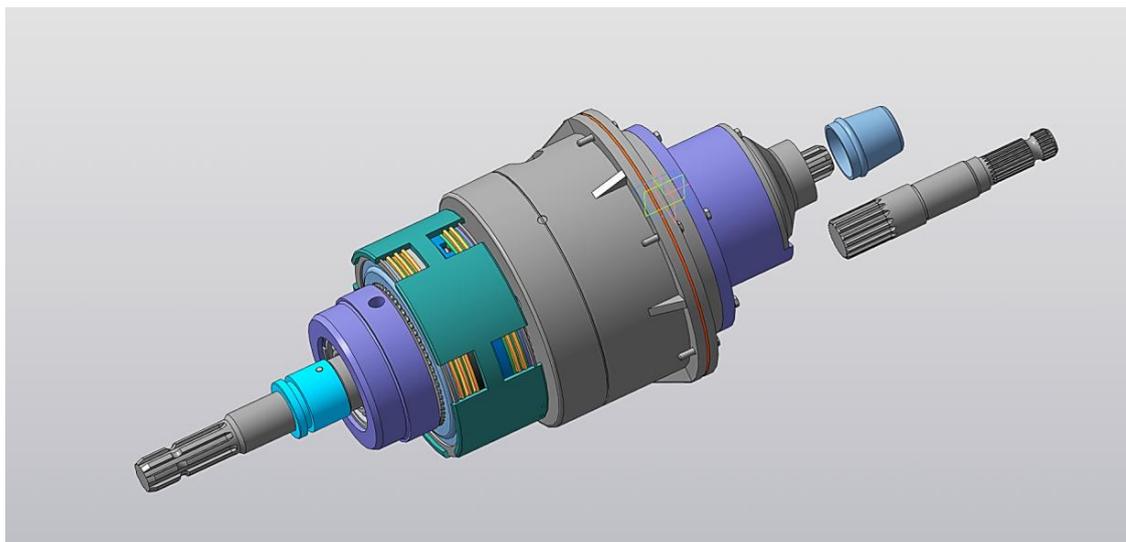


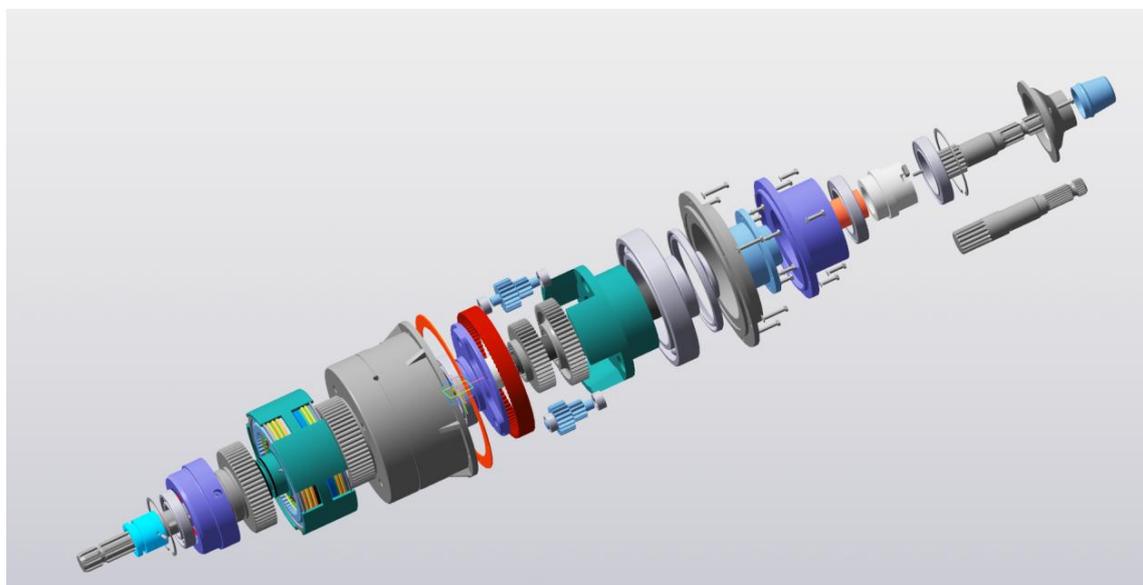
Рис. 4. Четырёхскоростной ВОМ с гидравлическим управлением: ФМ – фрикционная муфта управления с гидроподжатием; Т – остановочный тормоз

На рис. 5 представлена 3D-модель, а на рис. 6 – конструктивное исполнение

четырёхскоростного ВОМ, выполненного по схеме, представленной на рис. 3, а [3].



а)



б)

Рис. 5. 3d-модели четырёхскоростного ВОМ: *а* – общий вид; *б* – разнесённая модель

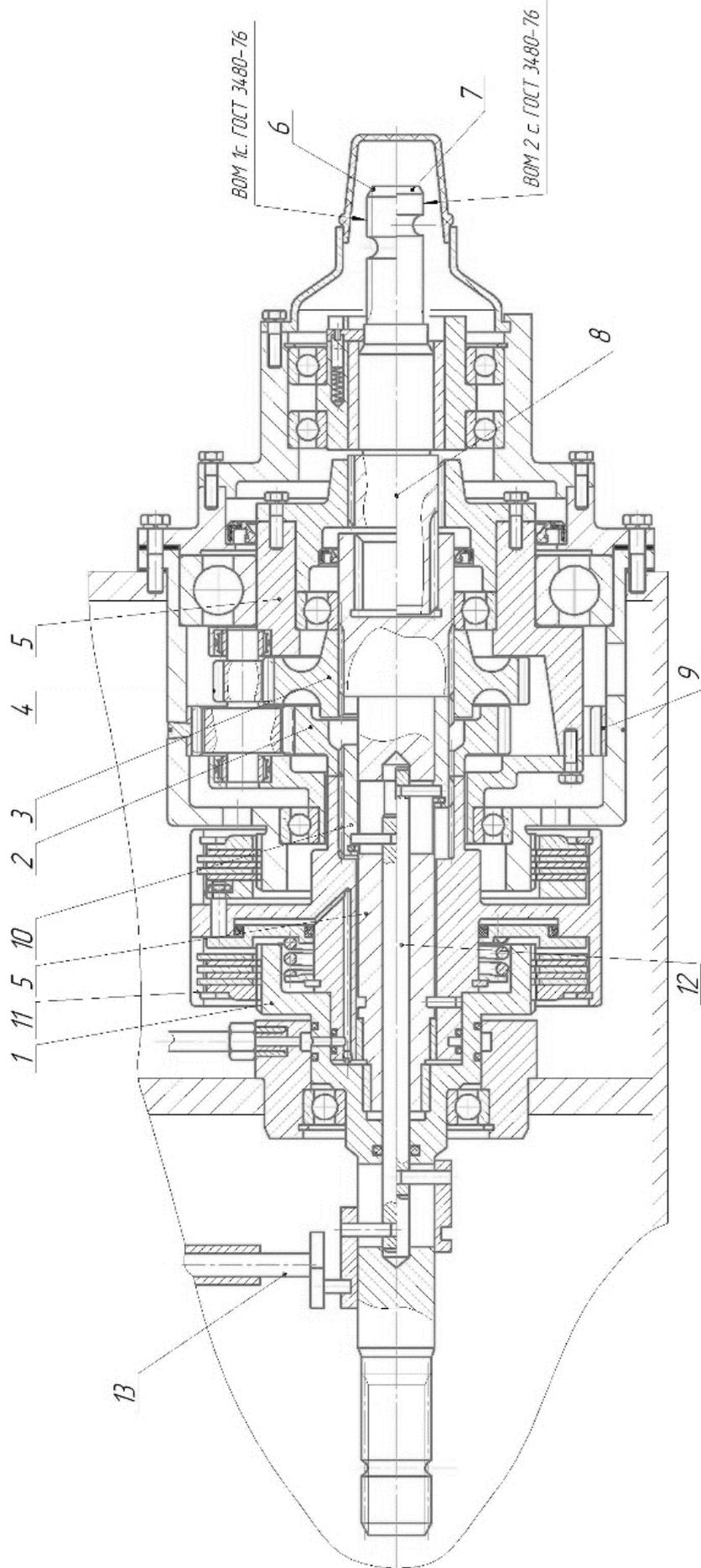


Рис. 6. Вариант четырёхскоростного ВОМ

Примером конструктивной реализации четырёхскоростных ВОМ может служить вариант ВОМ, общий вид которого представлен на рис. 6. Его редуктор выполнен по схеме, показанной на рис. 3, а. Механизм привода ВОМ содержит приводной вал 1, планетарный механизм, состоящий из солнечных шестерен 2, 3, водила 5 с двухвенцовыми сателлитами 4 и коронной шестерни 9, и фрикционную гидropоджимную муфту 11 с тормозом. На центральном валу 8 установлена управляемая муфта 10, которая может выборочно взаимодействовать с солнечными шестернями 2 и 3. Управление муфтой 10 осуществляется рычагом 13 посредством штока 12. Первый выходной вал 6 соединяется с водилом 5 (верхняя относительно оси часть) рис. 6, а второй 7 – с центральным валом 8 (нижняя часть) рис. 6.

При включенном положении механизма крутящий момент от приводного вала 1 через фрикционную муфту 11 и управляемую муфту 10, в зависимости от ее положения, передается или на солнечную шестерню 2 (верхняя часть) рис. 6, или на

солнечную шестерню 3 (нижняя часть) рис. 6. Этим обеспечиваются две разные частоты вращения каждого выходного элемента – водила 5 и солнечной шестерни 3.

Для получения двух низших частот вращения хвостовиков ВОМ – n_1 и n_3 в механизм устанавливаются выходной вал 6, вращающийся от водила 5, а для получения двух высших частот вращения n_2 и n_4 – выходной вал 7, приводимый от солнечной шестерни 3.

Наличие дополнительных частот вращения n_3 и n_4 позволяет осуществлять привод сельскохозяйственных машин с незначительной нагрузкой двигателя по мощности (в настоящее время приводящихся со стандартными частотами $n_1=540 \text{ мин}^{-1}$ и $n_2=1000 \text{ мин}^{-1}$) на частичном режиме работы двигателя при $n_{\text{дв}} \approx 0,7n_{\text{ном}}$.

ВЫВОДЫ

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что для четырёхскоростных ВОМ целесообразно использовать четырёхзвенные планетарные механизмы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарипов, В.М. Конструирование и расчет тракторов: учебник для студентов вузов/ В.М. Шарипов. – Москва : Машиностроение, 2009. – 752 с. – Текст : непосредственный.

2. Бобровник, А.И. Повышение потребительских свойств мелиоративного гусеничного трактора «Беларус» [Оборудование гидравлической и механической систем отбора мощности стабилизированной системой отбора мощности] / А.И. Бобровник. – Текст : непосредственный // Мелиорация. – 2014. – № 2. – С. 146–161.

3. Авторское свидетельство СССР, МПК В60К 17/28. Механизм привода отбора мощности транспортного средства: № SU 1216035 А: заявл.13.07.84: опубл. 07.03.86 / О.К. Довнар [и др.]. – 2 с. – Текст : непосредственный.

4. Zyuzin, A.A. Roughness and wear of frictional surfaces in slip bearings / A.A Zyuzin, B.N. Kaz'min, M.D. Yurov. – Text: immediate // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32. № 9–10. – P. 646–660.

5. Зюзин, А.А. Влияние гармонических составляющих некруглости и нецилиндричности на формирование НДС поверхностных слоев деталей в соединениях с натягом / А.А. Зюзин. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2020. – № 4. – С. 4–7.

6. Развитие исследований по повышению точности геометрической формы и качества основных поверхностей деталей машин/ А.А. Зюзин, И.С. Константинова, Б.Н. Казьмин, М.Д. Юров // Российская наука: прошлое и будущее: монография/ под науч. ред. В.И. Левина. Т.1. – Пенза; Москва : Приволжский Дом знаний; МИЭМП, 2014. – С. 48–64.

7. **Казьмин, Б.Н.** Особенности распределения момента дифференциалом «POWER LOCK» при установке его в задний ведущий мост колёсного трактора / Б.Н. Казьмин, М.Д. Юров – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – 2023. – № 3. – С. 44–50.

8. **Кудаева, К.О.** Повышение надежности работы самоблокирующегося дифференциала ведущего моста / К.О. Кудаева, Б.Н. Казьмин. – Текст : непосредственный // Молодежь и системная модернизация страны : сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (19-20 мая 2022 года). В 5 томах. Том 5. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т., 2022. – С. 56–59.

Сведения об авторах:

Казьмин Борис Николаевич

старший преподаватель кафедры транспортных средств и техносферной безопасности, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

bkazmin@mail.ru

Юров Максим Дмитриевич

старший преподаватель кафедры транспортных средств и техносферной безопасности, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

mdyurov@mail.ru

9. **Юров, М.Д.** Обоснование конструктивных решений и выбор оптимальных параметров упругой подвески колёсного трактора / М.Д. Юров, К.Ю. Жиганов, В.В. Сердюков. – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – 2020. – № 2. – С. 52–59.

10. **Юров, М.Д.** Обоснование 3-D моделирования дифференциала повышенного трения / М.Д. Юров, А.В. Черных. – Текст : непосредственный // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – Липецк: ЛГТУ. – 2009. – С. 243–245.

Information about the authors:

Kaz'min Boris Nikolaevich

Senior Lecturer

Department of Transport means and Technosphere Safety, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

bkazmin@mail.ru

Yurov Maksim Dmitrievich

Senior Lecturer

Department of Transport means and technosphere safety,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

mdyurov@mail.ru

DOI 10.53015/30343275_2024_4_23
УДК 621.791

В.В. НЕВЕРОВ, П.Н. КЛЕВЦОВ, С.В. ЛЕБЕДЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ С СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА БОЛЕЕ 0,4 % АУСТЕНИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе описаны основные затруднения, возникающие при сварке сталей с содержанием углерода более 0,4 %. Рассмотрены основные применяемые технологические приёмы, позволяющие получить качественные сварные соединения указанных материалов. Приведены результаты исследований сварных соединений углеродистых сталей, полученных с использованием сварочных материалов, предназначенных для сварки хромоникелевых сталей аустенитного класса.

Ключевые слова: углеродистая сталь, трещины, диффузия углерода, хромоникелевая сталь.

V.V. NEVEROV, P.N. KLEVTSOV, S.V. LEBEDEV

INVESTIGATION OF THE WELDABILITY OF STEELS WITH A CARBON CONTENT OVER 0.4% WITH AUSTENITIC MATERIALS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article describes the main difficulties encountered when welding steels with a carbon content over 0.4%. The main technological techniques used to obtain high-quality welded joints from these materials are considered. The results of studies of welded joints of carbon steel obtained using welding materials intended to weld austenitic chromium-nickel steels are presented.

Keywords: carbon steel, cracks, carbon diffusion, chromium-nickel steel.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существующие способы сварки позволяют соединять материалы различного химического состава. В условиях развития вспомогательных технологий (предварительный подогрев при помощи индукторов, локальных газовых горелок малой мощности, посредством ТВЧ и т.д.), появляется возможность сварки материалов, которые возможно соединить только с использованием предварительного и (или) сопутствующего подогрева. К таким материалам относятся углеродистые стали с содержанием углерода более 0,4 % при отсутствии других легирующих элементов.

Однако всё больше металлических конструкций (опоры, кронштейны, кожухи и т. п.), изготавливаются именно из таких материалов ввиду их сравнительно невысокой стоимости и высоких эксплуатационных характеристик, то есть из высокоуглеродистых конструкционных сталей (содержание углерода от 0,5 до 2 %). Данные стали применяются в основном в тех областях, где решающее значение имеет отношение прочности к удельному весу материала. При этом сварка остаётся одним из самых доступных и технологичных способов их соединения. Но указанные выше особенности существенно ограничивают возможности сварки данных материалов

при отсутствии возможности их подогрева, особенно при монтаже в полевых условиях [1,2,5]. В этой связи разработка технологических приёмов, позволяющих сваривать углеродистые стали без подогрева, является актуальной задачей.

Такие стали имеют склонность к образованию холодных трещин в околосварной зоне при сварке вследствие образования закалочной структуры мартенсита, в связи с этим они имеют ограниченную свариваемость, а в некоторых случаях вообще не предназначены для сварных конструкций. Чтобы прочность металла сварного шва и основного металла соответствовали друг другу, нужно понизить содержание углерода и ввести некоторое количество легирующих элементов, но это может привести к образованию трещин уже в металле шва. Поэтому получение качественного сварного соединения со свойствами, равноценными свойствам основного металла, достаточно затруднительно. Вследствие специфического термического цикла сварки, связанного со скоростями нагрева и охлаждения, достигающими нескольких сотен градусов в секунду, трудно гарантировать получение пластичности и вязкости металла шва на уровне основного металла.

Одним из путей решения данной проблемы может быть использование для

сварки углеродистых сталей материалов, способствующих диффузии углерода из зоны термического влияния (ЗТВ) в металл сварного шва. В результате в ЗТВ содержание углерода уменьшается и, соответственно, уменьшается вероятность образования трещин.

Диффузия углерода обусловлена различием его термодинамической активности в металле. Углерод из зоны с высокой термодинамической активностью будет стремиться переместиться в зону, где его термодинамическая активность ниже [3]. Элементами, понижающими термодинамическую активность углерода в сталях, являются α -стабилизаторы, к которым относятся хром, молибден, вольфрам, ванадий и другие [3–4].

Авторами были проведены исследования возможности сварки сталей 65Г и У8 материалами, предназначенными для сварки высоколегированных хромоникелевых сталей аустенитного класса. Выбор марок сталей для исследований обусловлен содержанием углерода (более 0,4 %) и отсутствием в составе выбранных сталей других легирующих элементов, способных оказать влияние на термодинамическую активность углерода. Химический состав и основные свойства указанных сталей представлены в табл. 1–4.

Таблица 1

Химический состав стали 65Г, %, по ГОСТ 14959-79

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,62–0,7	0,17–0,37	0,9–1,2	≤0,035	≤0,035	≤0,25	≤0,25	≤0,2

Таблица 2

Технологические характеристики стали 65Г [1]

Ковка		Охлаждение поковок, изготовленных			
Вид полуфабриката	Температурный интервал ковки, °С	из слитков		из заготовок	
		Размер сечения, мм	Условия охлаждения	Размер сечения, мм	Условия охлаждения
Слиток	1 200–800	До 300	В печи	До 100	На воздухе
Заготовка	1 250–780			101–300	В мульде
Свариваемость		Флокеночувствительность		Склонность к отпускной хрупкости	
Не применяется для сварных конструкций		Малочувствительность		Склонность при содержании Mn ≥ 1%	

Таблица 3

Химический состав стали У8, %, по ГОСТ 1435-99

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,75-0,84	0,17-0,33	0,17-0,33	≤0,028	≤0,03	0,12-0,4	0,12-0,25	0,2-0,25

Таблица 4

Технологические характеристики стали У8 [1]

Ковка		Охлаждение поковок, изготовленных			
Вид полуфабриката	Температурный интервал ковки, °С	из слитков		из заготовок	
		Размер сечения, мм	Условия охлаждения	Размер сечения, мм	Условия охлаждения
Слиток	1 150-800	До 100	В штабелях на воздухе	До 100	На воздухе
Заготовка	1 180-800	101-700	Отжиг с перекристаллизацией, одно переохлаждение	101-300	В яме
Свариваемость		Флокеночувствительность		Склонность к отпускной хрупкости	
Не применяется для сварных конструкций		Не чувствительна		Не склонна	

Сварка осуществлялась покрытыми электродами марок ЦЛ-11 и МР-3 на режимах, представленных в табл. 5. Показаны 2 значения силы сварочного тока как рабочие в диапазоне применения для указанных материалов.

Выбор электродов обусловлен наличием в составе наплавленного металла электродов

ЦЛ-11 высокого содержания хрома, который должен будет «вытягивать» в металл сварного шва углерод из ЗТВ, тогда как высокое содержание никеля как γ -стабилизатора должно способствовать сохранению пластичности металла сварного шва несмотря на увеличение содержания углерода, диффундирующего

из ЗТВ. Также для сравнения те же марки сталей сваривались электродами марки МР-3, предназначенными для сварки конструкционных низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Химический состав указанных марок электродов представлен в табл. 6–7. Для исследований были выбраны образцы в виде листового проката толщиной 5 мм размером

120x70 мм. Какие-либо дополнительные технологические приёмы, такие как предварительный или сопутствующий подогрев, замедленное охлаждение после сварки укрытием теплоизоляционным материалом, проведение термической обработки после сварки, не применялись.

Таблица 5

Режимы сварки образцов из сталей 65Г и У8

Марка электрода	Диаметр электрода $d_э$, мм	Сила сварочного тока $I_{св}$, А	Напряжение на дуге $U_д$, В
МР-3	4	140, 200	20
ЦЛ-11	4	120, 180	20

Таблица 6

Химический состав наплавленного металла сварочных электродов МР-3, %

С	Mn	Si	S	P
0,1	0,58	0,17	0,03	0,035

Таблица 7

Химический состав наплавленного металла сварочных электродов ЦЛ-11, %

С	Mn	Si	Ni	Cr	Nb	S	P
0,1	1,8	0,53	9,8	20,8	0,99	0,011	0,02

Общий вид одного из сварных образцов приведён на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид сварного образца для исследований

В качестве критерия оценки качества сварного соединения использовались замеры твёрдости металла сварного шва, основного металла и ЗТВ, производимые на приборе ПМТ-3.

Повышенная твёрдость является характерным признаком появления в структуре мартенсита [2–4]. Результаты исследований представлены на рис. 2–5.

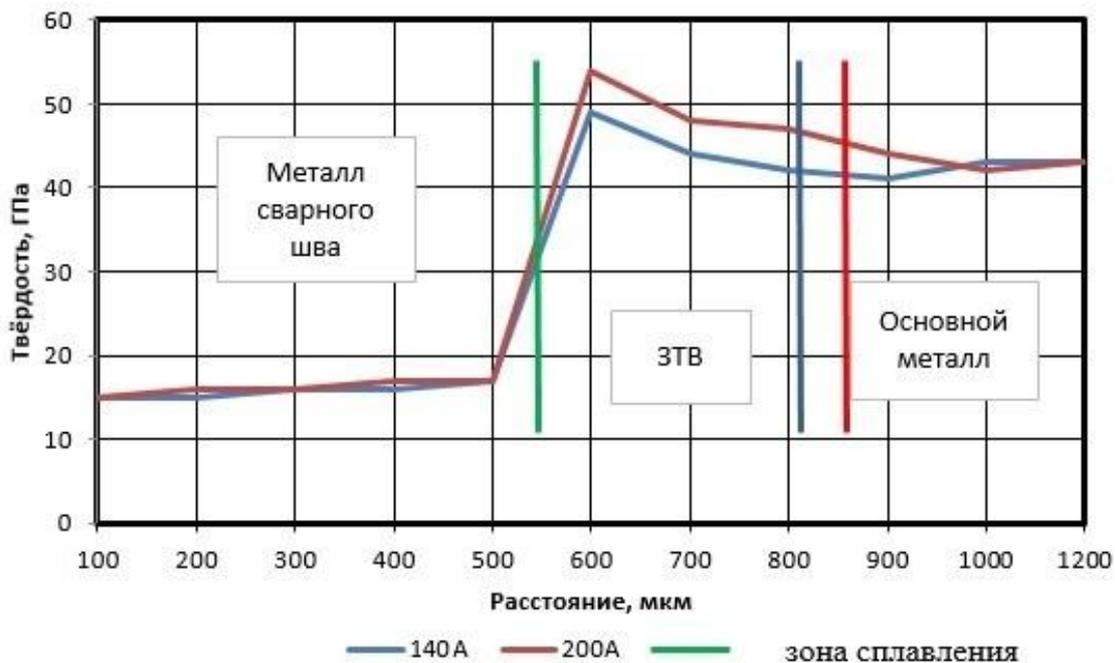


Рис. 2. Изменение твёрдости сварного соединения стали 65Г при сварке электродами МР-3

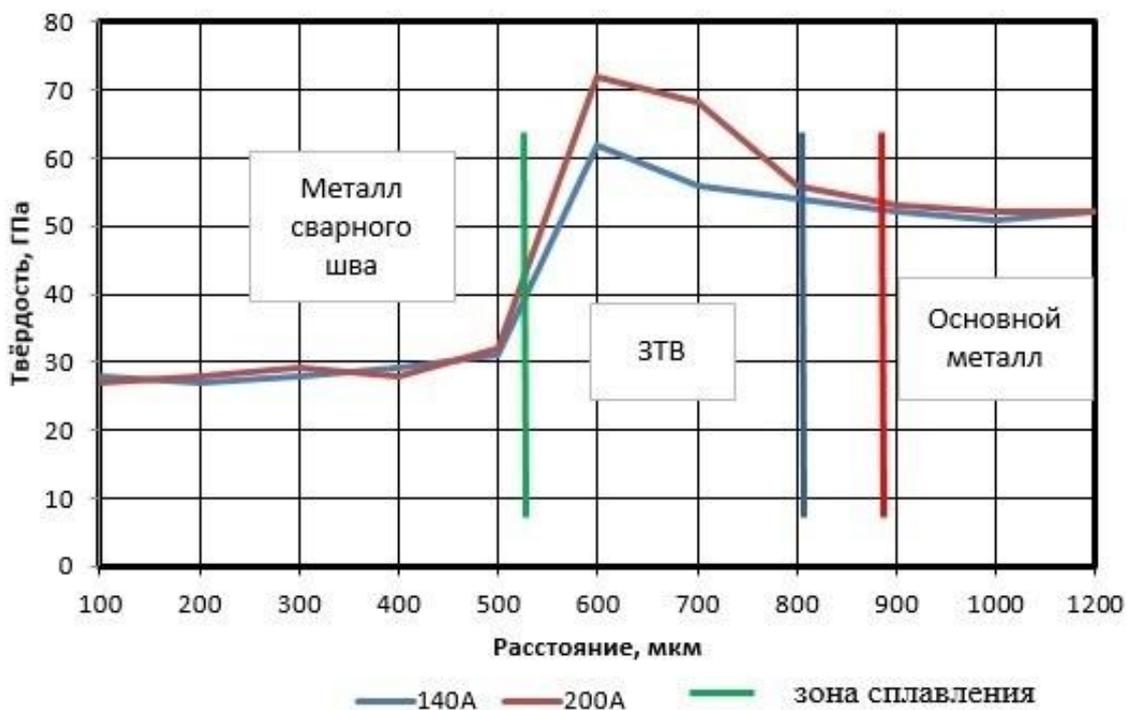


Рис. 3. Изменение микротвёрдости сварного соединения стали У8 при сварке электродами МР-3

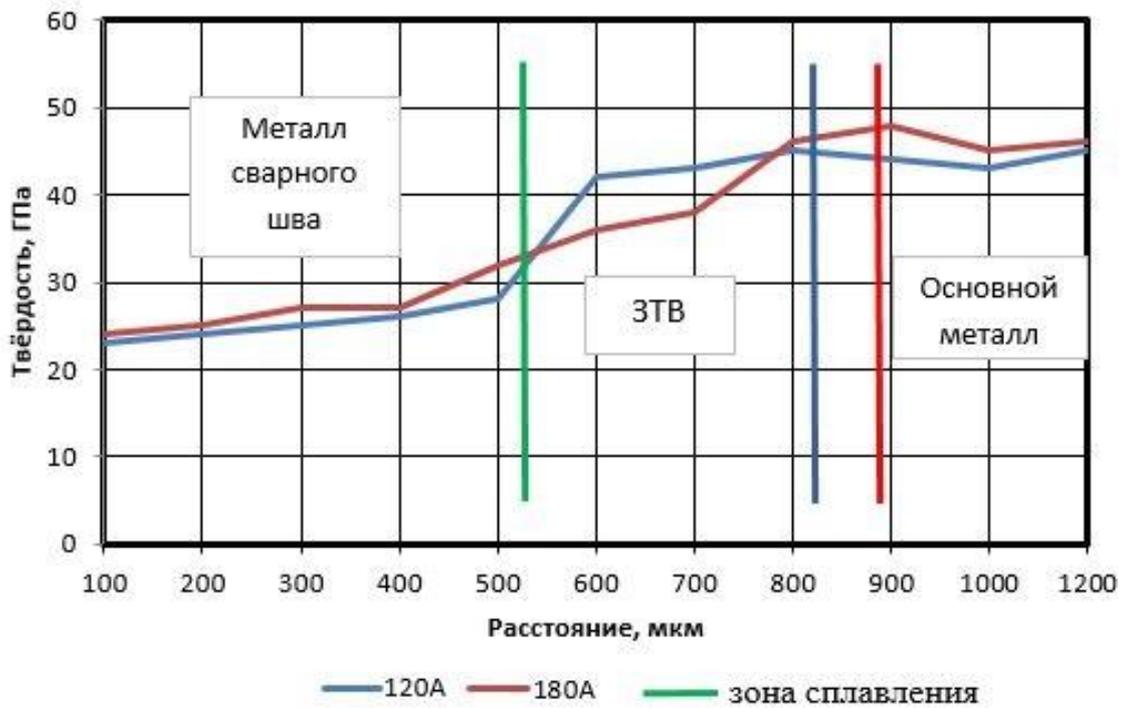


Рис. 4. Изменение твёрдости сварного соединения стали 65Г при сварке электродами ЦЛ-11

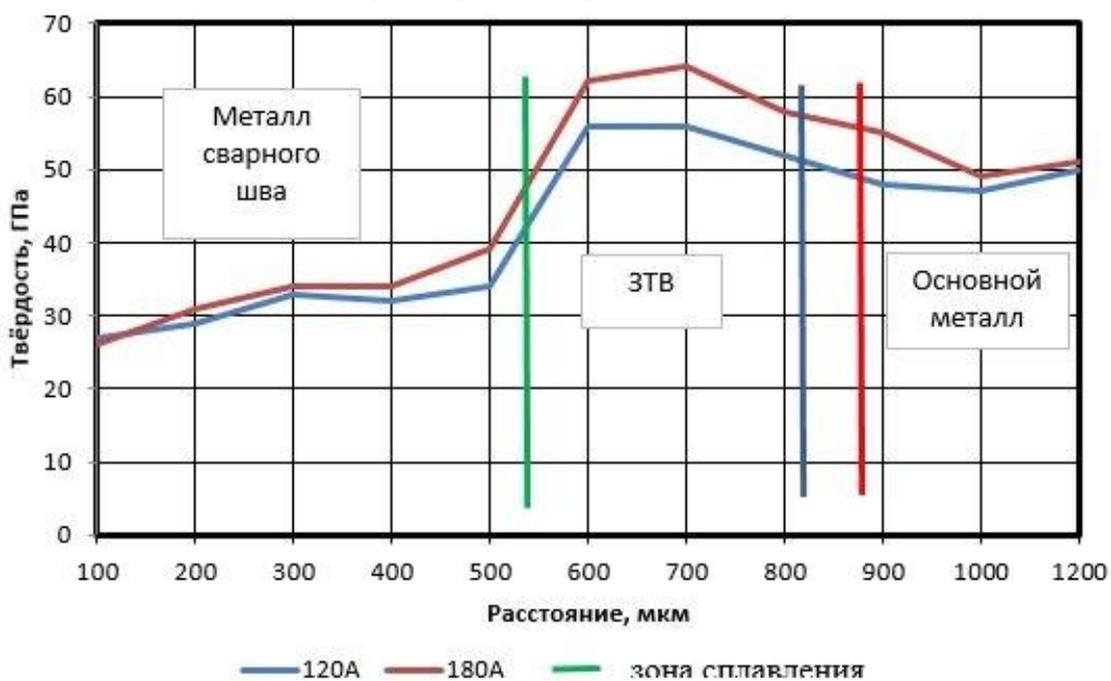


Рис. 5. Изменение твёрдости сварного соединения стали У8 при сварке электродами ЦЛ-11

Как видно из результатов исследований, при сварке сталей электродами МР-3 всегда присутствует выраженный пик твёрдости (рис. 2–3), свидетельствующий о наличии в структуре ЗТВ мартенсита. Тогда как при сварке электродами ЦЛ-11

стали 64Г такого пика не наблюдается (рис. 4). В стали У8 при сварке электродами ЦЛ-11 пик твёрдости присутствует, что может служить признаком недостаточности диффузии

углерода из ЗТВ для недопущения образования мартенсита.

ВЫВОД

Таким образом, на основании результатов работы можно сделать вывод о том, что сварка углеродистых сталей материалами, предназначенными для сварки хромо-никелевых сталей аустенитного класса, позволяет минимизировать вероятность образования трещин даже в случае отсутствия подогрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. В 2-х томах. Т 2. – Москва : Машиностроение, 2004. – 624 с. – Текст : непосредственный.

2. **Свечникова, Л.А.** Фазовые и структурные превращения в металлах и сплавах: учебник / Л.А. Свечникова, В.И. Темных, А.М. Токмин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2019. – 284 с. – Текст : непосредственный.

3. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах. Т.1. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – Москва : Машиностроение, 2004. – 624 с. – Текст : непосредственный.

4. **Овчинников, В.В.** Сварка и резка деталей из различных сталей, цветных металлов и их сплавов, чугунов во всех

Эксперименты показали, что при содержании в стали углерода до 0,65 % сварка её возможна хромоникелевыми материалами даже без подогрева в случае, если размеры сварного соединения сравнительно невелики. Каковы размеры такого соединения – предстоит выяснить в следующих исследованиях. При более высоком содержании углерода предварительный подогрев сварного соединения необходим.

пространственных положениях : учебник / В.В. Овчинников – Москва : Academia, 2014. – 304 с. – Текст : непосредственный.

5. **Неверов, В.В.** Технологические особенности сварки труб и фасонных частей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В.В. Неверов, С.В. Лебедев, П.Н. Клевцов. – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – 2019. – № 2 – С. 28–33.

6. **Катаев, В.А.** Методы исследования фазового состава и свойств углеродистой стали : учебно-методическое пособие / В.А. Катаев, В.О. Васьковский. – Екатеринбург : издательство уральского университета, 2016. — 84 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Неверов Виктор Валентинович

кандидат технических наук,
доцент кафедры оборудования
и процессов машиностроительных
производств,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
e-mail: viktor-neverov@mail.ru.

Information about the authors:

Neverov Viktor Valentinovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate professor of the Departments
of Equipment and Processes of Machine-
building Industries,
Lipetsk State Technical University.
398055, Russia, Lipetsk,
Moskovskaya st., 30.
e-mail: viktor-neverov@mail.ru.

Клевцов Павел Николаевич
кандидат технических наук,
доцент кафедры оборудования и
процессов машиностроительных
производств,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
e-mail: klevtsov_weld@mail.ru

Лебедев Сергей Викторович
доктор технических наук,
профессор кафедры оборудования
и процессов машиностроительных
производств,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
e-mail: svarka_lip@mail.ru

Klevtsov Pavel Nikolaevich
Candidate of Technical Sciences,
Associate professor of the Departments of
Equipment and Processes of Machine-
building Industries,
Lipetsk State Technical University.
398055, Russia, Lipetsk,
Moskovskaya st., 30.
e-mail: klevtsov_weld@mail.ru

Lebedev Sergey Viktorinovich
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Departments of Equipment
and Processes of Machine-building Industries,
Lipetsk State Technical University.
398055, Russia, Lipetsk,
Moskovskaya st., 30.
e-mail: svarka_lip@mail.ru

DOI 10.53015/30343275_2024_4_30
УДК 621.01: 531.8 (075)

А.В. СУХАНОВ

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА С РАЗДВОЕННОЙ БЫСТРОХОДНОЙ СТУПЕНЬЮ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: в настоящей работе рассматривается классический метод проектирования привода с цилиндрическим двухступенчатым редуктором с раздвоенной быстроходной ступенью. В статье приведен обзор существующих типов цилиндрических редукторов, рассмотрены особенности их расчёта. Произведен кинематический расчёт цилиндрического двухступенчатого редуктора с раздвоенной быстроходной ступенью: определен общий коэффициент полезного действия привода, исходя из мощности ориентировочных значений частот вращения, выбран электродвигатель, определены общие передаточные числа привода, вычислены крутящие моменты на валах и произведён предварительный расчёт валов. Выбраны типы подшипников для ведущего, промежуточного и ведомого валов, для передачи крутящего момента выбрана упругая втулочно-пальцевая муфта. Приведены ссылки на работы, в которых описаны методы оценки надёжности и прочности валов редуктора.

Ключевые слова: привод, редуктор, муфта, передаточное число, крутящий момент.

KINEMATIC CALCULATION OF A CYLINDRICAL REDUCER WITH A DOUBLE HIGH-SPEED STAGE

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper discusses the classical method of designing a drive with a cylindrical two-stage reducer with a double high-speed stage. The article overviews the existing types of cylindrical reducers and considers the features of their calculation. A kinematic calculation of a cylindrical two-stage reducer with a double high-speed stage is performed: the overall efficiency of the drive is determined, an electric motor is selected considering the power of the approximate values of rotation frequencies, the overall gear ratios of the drive are determined, the shaft torques are calculated, and a preliminary calculation of the shafts is performed. The types of bearings for the driving, intermediate, and driven shafts are selected, and an elastic pin-bush coupling to transmit torque is selected. References are provided to papers that describe methods for assessing the reliability and strength of the reducer shafts.

Keywords: drive, reducer, coupling, gear ratio, torque.

ВВЕДЕНИЕ

Редукторами называют механизмы, состоящие из передач зацеплением с постоянным передаточным отношением, заключенные в отдельный корпус и предназначенные для понижения угловой скорости выходного вала по сравнению с входным. Современные редукторы классифицируют по типам, по типоразмерам и по исполнению. Редуктор состоит из передач. Наиболее распространены редукторы с валами, расположенными в горизонтальной плоскости, отдельный тип редукторов составляют цилиндрические редукторы с раздвоенной быстроходной ступенью [1].

Типоразмер редуктора определяют типом и главными параметрами тихоходной ступени. Такими главными параметрами для цилиндрических и червячных редукторов являются межосевое расстояние, а для конических - внешний делительный диаметр колеса. Исполнение редуктора определяют передаточным числом, вариантом сборки и формой концевых участков валов. Вариант сборки указывает, в какую сторону расположен выходной конец вала редуктора или на обе стороны. Сам выходной конец вала может иметь цилиндрическую форму, коническую или на ней может быть нарезана резьба [1, 2].

Цилиндрические редукторы имеют наибольшее распространение благодаря их долговечности, относительной простоте, высокому КПД, большому диапазону скоростей и нагрузок. Число ступеней редуктора выбирают в зависимости от общего передаточного числа. Одноступенчатые редукторы (рис. 1) применяют при передаточных числах до 7 (реже до 12,5).

При передаточных числах от 7 до 40 выгоднее, с точки зрения габаритов и массы, применять двухступенчатые редукторы, которые могут быть выполнены по различным схемам.

Первый вариант схемы – последовательное расположение ступеней (рис. 2). Такой редуктор вытянут в длину, несимметричное расположение колес, следовательно, неравномерное распределение нагрузки по длине зуба. При проектировании этого редуктора необходимо, чтобы передаточное отношение первой ступени было больше чем у второй, что позволяет выполнить редуктор более компактным. Вторым вариантом схемы – с раздвоенной тихоходной ступенью (рис. 3). Раздвоение последней ступени устраняет недостаток предыдущего редуктора. Особенность его расчета в том, что момент на тихоходном валу делят пополам и расчет каждой половины тихоходной ступени ведут по

половинному крутящему моменту. Третий вариант схемы – соосный двухступенчатый цилиндрический редуктор (рис. 4). Особенность его конструкции в том, что оси быстроходного и тихоходного валов лежат на одной линии. Он отличается большей компактностью. Особенности расчета такого редуктора в том, что вначале следует рассчитать наиболее нагруженную тихоходную ступень, а быстроходную

ступень проверяют на прочность исходя из равенства межосевых расстояний быстроходной и тихоходной ступеней [1, 2].

Целью настоящей работы является кинематический расчёт привода с цилиндрическим редуктором с раздвоенной быстроходной ступенью, в конструкции которого используются большинство деталей и узлов общего назначения.

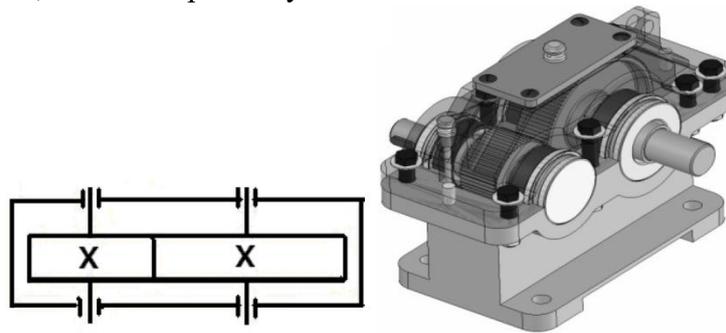


Рис. 1. Цилиндрический одноступенчатый редуктор

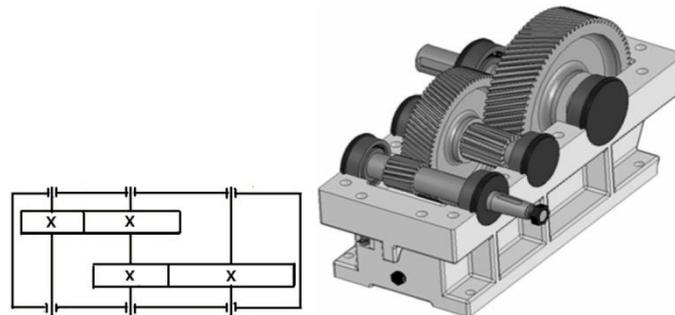


Рис. 2. Цилиндрический двухступенчатый редуктор с последовательным расположением ступеней

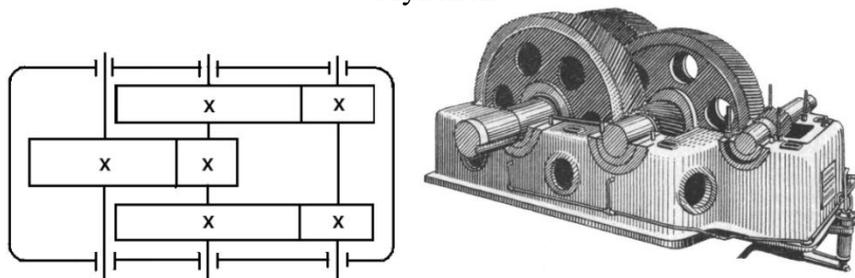


Рис. 3. Цилиндрический двухступенчатый редуктор с раздвоенной быстроходной ступенью

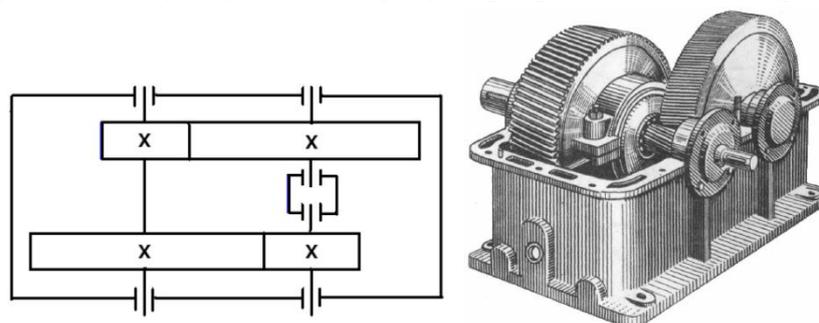


Рис. 4. Цилиндрический соосный двухступенчатый редуктор

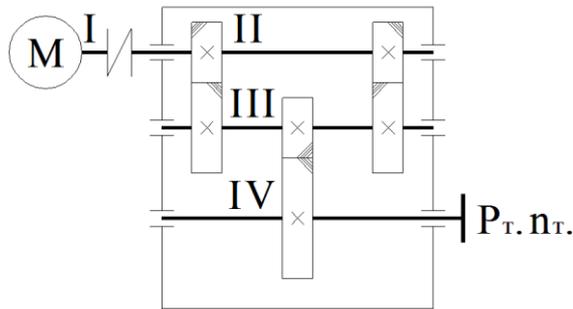


Рис. 5. Структурные группы многозвенного механизма

Задача настоящей работы – спроектировать привод с цилиндрическим двухступенчатым редуктором с раздвоенной быстроходной ступенью, произвести кинематический расчёт редуктора. Схема привода приведена на рис. 5. Характеристики привода: мощность выходного вала $P_T = 4$ кВт, частота вращения выходного вала $n_T = 70$ с⁻¹, ресурс редуктора – 24000 часов, режим работы редуктора – средний, соединительная муфта – упругая.

Вычислим момент на тихоходной ступени:

$$P_{\text{вых}} = T\omega;$$

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,1415 \cdot 70}{30} = 7,32 \text{ рад/с};$$

$$T_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\omega} = \frac{4000}{7,32} = 546,44 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определим общий КПД привода:

$$\eta_{\text{привода}} = \eta_{\text{зуб}}^3 \cdot \eta_{\text{подш}}^3 \cdot \eta_{\text{муфты}} =$$

$$= 0,97^3 \cdot 0,99^3 \cdot 0,98 = 0,867.$$

Определим мощность двигателя:

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta_{\text{привода}}} = \frac{4000}{0,867} = 4,6 \text{ кВт}.$$

Частота вращения вала электродвигателя:

$$n_{\text{вх}} = n_{\text{вых}} \cdot u; u = u_{\text{быстр}} \cdot u_{\text{тих}}.$$

$$n_{\text{вх}} = 70 \cdot (2,5 \dots 5) \cdot (3,15 \dots 5) =$$

$$= 551,25 \dots 1750 \text{ об/мин}.$$

Исходя из мощности ориентировочных значений частот вращения, выбираем электродвигатель закрытый обдуваемый единой серии 4А80В/720 [2] с мощностью $P_{\text{дв}} = 5,5$ кВт и синхронной частотой 720 об/мин.

Определим общие передаточные числа привода и разобьем его на несколько

ступеней (рис. 5). Действительное фактическое передаточное число

$$U_{\text{д}} = \frac{\eta_{\text{вх}}}{\eta_{\text{вых}}} = \frac{720}{70} = 10,28 = U_{\text{ред}}.$$

Разбиваем передаточное число по ступеням. Согласно [2]:

$$u_{\text{быстр}} = \frac{u_{\text{ред}}}{u_{\text{тих}}};$$

$$u_{\text{тих}} = 0,88 \cdot \sqrt{u_{\text{ред}}} = 0,88 \cdot \sqrt{10,28} = 2,82;$$

$$u_{\text{быстр}} = \frac{10,28}{3} = 3,42.$$

Принимаем

$$U_{\text{тих}} = 3; U_{\text{быстр}} = 3,55.$$

Определим частоту вращения (n), окружную скорость (ω), мощность (P) и вращающий момент (T) каждого вала (рис. 5).

Вал I:

$$n_1 = n_{\text{дв}} = 720 \text{ об/мин};$$

$$\omega_1 = \omega_{\text{дв}} = \frac{\pi n}{30} = 75,36 \text{ рад/с};$$

$$P_1 = P_{\text{дв}} = 5,5 \text{ кВт};$$

$$T_1 = T_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = 72,98 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Вал II:

$$n_2 = n_1 = n_{\text{дв}} = 720 \text{ об/мин};$$

$$\omega_2 = \omega_1 = \omega_{\text{дв}} = 75,36 \text{ рад/с};$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{\text{муфты}} \cdot \eta_{\text{подш}} = 5,3361 \text{ кВт};$$

$$T_2 = T_1 \cdot \eta_{\text{муфты}} \cdot u_{\text{муфты}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = 71,5204 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Вал III:

$$n_3 = \frac{n_2}{u_{\text{быстр}}} = 202,8 \text{ об/мин};$$

$$\omega_3 = \frac{\pi \cdot n_3}{30} = 21,2 \text{ рад/с};$$

$$P_3 = P_2 \cdot \eta_{зуб}^2 \cdot \eta_{подш} = 4,97 \text{ кВт};$$

$$T_3 = T_2 \cdot \eta_{зуб} \cdot u_{быстр} = 246,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Вал IV:

$$n_4 = \frac{n_3}{u_{тих}} = \frac{202,8}{3} = 67,6 \text{ об/мин};$$

$$\omega_4 = \frac{\pi \cdot n_4}{30} = 7,7 \text{ рад/с};$$

$$P_4 = P_3 \cdot \eta_{зуб} \cdot \eta_{подш} = 4,77 \text{ кВт};$$

$$T_4 = T_3 \cdot \eta_{зуб} \cdot u_{тих} = 716,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Произведём предварительный расчёт валов. Крутящий момент в поперечном сечении ведущего вала: $T_{II} = 71,52 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{мм}$; крутящий момент в поперечном сечении промежуточного вала: $T_{III} = 246,3 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{мм}$; крутящий момент в поперечном сечении ведомого вала: $T_{IV} = 716,7 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{мм}$. Диаметр выходного конца ведущего вала при $[\tau]_k = 25 \text{ Н/мм}^2$:

$$d_{B2} = \sqrt[3]{\frac{71,52 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 25}} = 24,2 \text{ мм}.$$

Диаметр шеек под подшипники принимаем $d_{п2} = 25 \text{ мм}$; под ведущей шестерней $d_{к2} = 32 \text{ мм}$. У промежуточного вала расчетом на кручение определяем диаметр опасного сечения (под шестерней) по пониженным допускаемым напряжениям $[\tau]_k = 15 \text{ Н/мм}^2$:

$$d_{к3} = \sqrt[3]{\frac{T_{III}}{0,2 \cdot [\tau]_k}} = \sqrt[3]{\frac{246,3 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 15}} = 43,4 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр под шестерней $d_{к3} = 45 \text{ мм}$. Диаметр опасного сечения под колесами:

$$d_{к3} = \sqrt[3]{\frac{T_{III}}{0,2 \cdot [\tau]_k}} = \sqrt[3]{\frac{246,3 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 30}} = 34,5 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр под шестерней $d_{к3} = 35 \text{ мм}$. Диаметр выходного вала при $[\tau]_k = 25 \text{ Н/мм}^2$:

$$d_{IV} = \sqrt[3]{\frac{T_{IV}}{0,2 \cdot [\tau]_k}} = \sqrt[3]{\frac{716,7 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 25}} = 52,3 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр подшипников $d_{п4} = 55 \text{ мм}$, под колесом $d_{к4} = 60 \text{ мм}$, $d_{п4} = 60 \text{ мм}$.

Уточненный расчет проведем для промежуточного вала. Составим расчетную схему. Все размеры возьмем из компоновки: $a = 50 \text{ мм}$; $b = 35 \text{ мм}$.

$$P_{радС} = 1,208 \cdot 10^3 \text{ Н}; P_{осС} = 894 \text{ Н};$$

$$P_{окрС} = 3212,7 \text{ Н}; P_{радВ,Д} = 505,8 \text{ Н};$$

$$P_{осВ,Д} = 382,1 \text{ Н}; P_{окрВ,Д} = 1,336 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

По полученным данным построим эпюру крутящих моментов (рис. 6). Опасным сечением является сечение С:

$$M_{ЭКВ} = \sqrt{M_{\Sigma ИС}^2 + T_{КР}^2} = \sqrt{204,9^2 + 267,2^2} = 336,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Из условия прочности

$$\delta = \frac{M_{ЭКВ}}{W_X} \leq [\delta].$$

$$\text{При } W_X = 0,1 \cdot d^3 \text{ } [\delta] = 50 \text{ МПа}.$$

Получим

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{ЭКВ}}{0,1 \cdot [\delta]}} = \sqrt[3]{\frac{336,7}{0,1 \cdot 50 \cdot 10^6}} = 0,043 \text{ м}.$$

Принимаем $d = 45 \text{ мм}$.

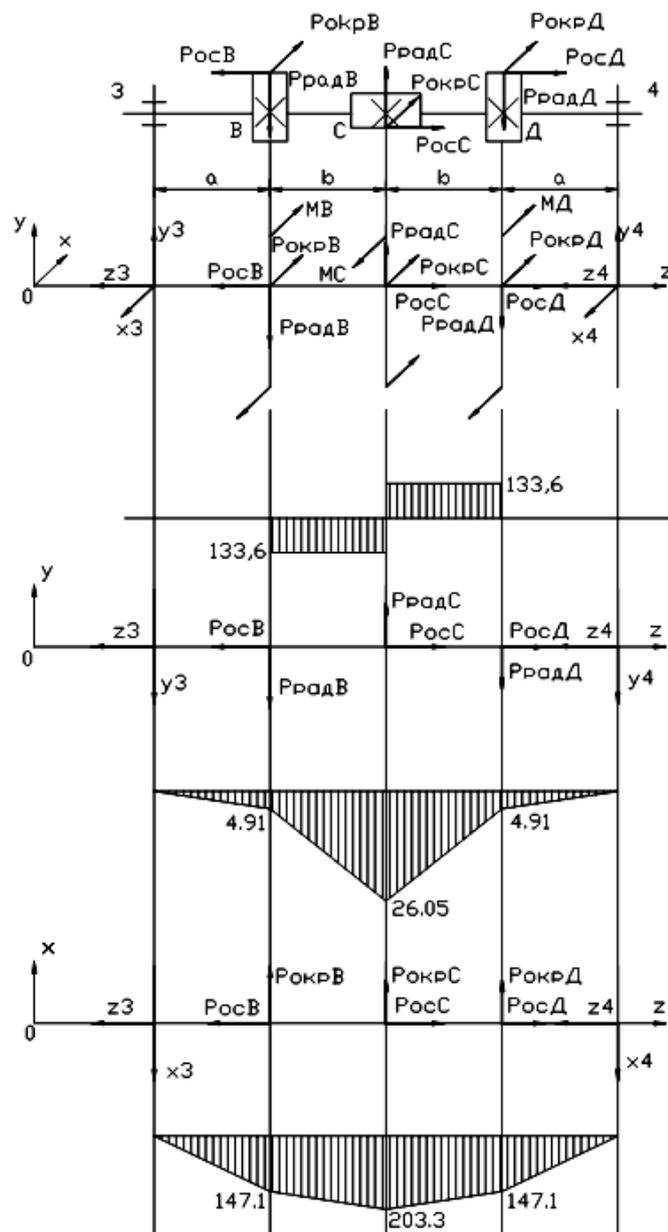


Рис. 6. Эпюра крутящих моментов

Для ведущего вала выбираем роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами, однорядные, тип 7305, ГОСТ 333-79, средняя серия $d = 25$, $D = 62$, $B = 17$, $c = 2$, $D_1 = 67$, $T = 18.25$, грузоподъемность = 2960, ролики $D_T = 9.5$, $z = 13$.

Для промежуточного вала выбираем роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами, однорядные, тип 7307, ГОСТ 333-79, средняя серия $d = 35$, $D = 80$, $B = 21$, $c = 2.5$, $D_1 = 85$, $T = 22.75$, грузоподъемность = 6100, ролики $D_T = 11.7$, $z = 12$.

Для ведомого вала выбираем роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами,

однорядные, тип 7311, ГОСТ 333-79, средняя серия $d = 55$, $D = 120$, $B = 27$, $c = 3$, $D_1 = 127$, $T = 31.5$, грузоподъемность = 10200, ролики $D_T = 16.7$, $z = 13$.

Для уменьшения потерь мощности на трение и снижения интенсивности износа трущихся поверхностей, а также для предохранения их от заедания, задиров, коррозии и лучшего отвода теплоты трущиеся поверхности деталей должны иметь надежную смазку. Выбор смазочного материала основан на опыте эксплуатации машин. Принцип назначения сорта масла следующий: чем выше окружная скорость колеса, тем меньше должна быть вязкость масла, чем выше контактные давления в зубьях, тем

большей вязкостью должно обладать масло. Поэтому требуемую вязкость масла определяют в зависимости от контактного напряжения и окружной скорости колес. В настоящее время широко применяют пластичные смазочные материалы ЦИАТИМ-201 и ЛИТОЛ-24, которые допускают температуру нагрева до 130 °С.

Все шпонки редуктора призматические со скругленными торцами, размеры длины, ширины, высоты соответствуют ГОСТ 23360-80. Материал шпонок – сталь 45 нормализованная.

Для передачи крутящего момента выбираем муфту упругую втулочно-пальцевую по ГОСТ 21424–75. Такая

муфта отличается простотой конструкции и удобством монтажа и демонтажа. Обычно применяется в передачах от электродвигателя с малыми крутящими моментами. Упругими элементами здесь служат гофрированные резиновые втулки. Из-за сравнительно небольшой толщины втулок муфты обладают малой податливостью и применяются в основном для компенсации несоосности валов в небольших пределах. Материал полумуфт – чугун СЧ20.

Общий вид спроектированного цилиндрического редуктора с раздвоенной быстроходной ступенью показан на рис. 7.

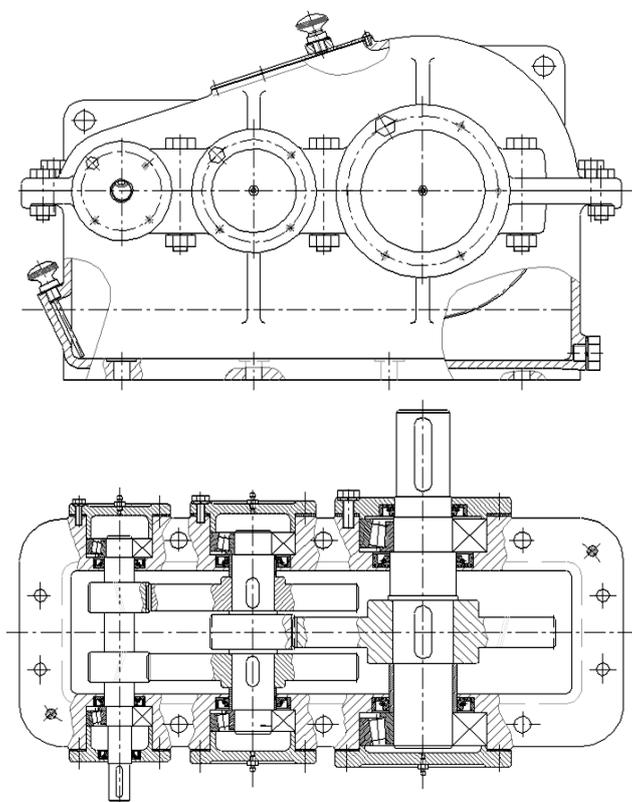


Рис. 7. Цилиндрический редуктор с раздвоенной быстроходной ступенью

ВЫВОДЫ

Спроектирован привод с цилиндрическим двухступенчатым редуктором с раздвоенной быстроходной ступенью и произведен кинематический расчёт редуктора. Для оценки надёжности и прочности валов редуктора можно использовать аналитические методы

расчёта валов, приведенные в работах [3, 4]. В случае, если выходной вал является входным звеном для плоских рычажных механизмов, то кинематические параметры звеньев таких механизмов можно вычислять с использованием методик, изложенных в работах [5–10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – 12-е изд., стер. – Москва: Издательский центр «Академия», 2009. – 496 с. – Текст : непосредственный.
2. Иванов, М.Н. Детали машин: учебник для вузов / М.Н. Иванов. – 5-е изд., перераб. – Москва : Высшая школа, 1991. – 383 с. – Текст : непосредственный.
3. Суханов, А.В. Определение деформаций и напряжений при кручении статически неопределимого бруса / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 2 (51). – С. 91–99.
4. Суханов, А.В. Подбор сечения стального ступенчатого вала с заданной мощностью на шкивах / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 2 (51). – С. 77–84.
5. Суханов, А.В. Кинематический анализ плоского шестизвенного механизма / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2024. – № 3 (56). – С. 25–29.
6. Суханов, А.В. Моделирование работы кривошипно-ползунного механизма двигателя внутреннего сгорания / А.М. Корнеев, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2018. – № 4 (38). – С. 33–39.
7. Суханов, А.В. Структурный и кинематический анализ плоского многозвенного механизма второго класса / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 1 (47). – С. 77–87.
8. Суханов, А.В. Определение ускорений точек шатуна плоского многозвенного механизма / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 2 (48). – С. 62–68.
9. Суханов, А.В. Структурный и кинематический анализ плоского восьмизвенного механизма / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 2 (48). – С. 68–76.
10. Суханов, А.В. Графоаналитический метод определения ускорений точек шатуна плоского многозвенного механизма / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 1 (50). – С. 79–85.

Сведения об авторах:

Суханов Андрей Владимирович
старший преподаватель
кафедры общей механики,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
pm03sav@mail.ru

Information about the authors:

Sukhanov Andrey Vladimirovich
senior lecturer of the Department of General
Mechanics,
Lipetsk State Technical University.
398055, Russia, Lipetsk,
Moskovskaya str., 30.
pm03sav@mail.ru

DOI 10.53015/30343275_2024_4_38
УДК 669.162

В.Н. ТИТОВ, И.В. КУПРИЯНОВА, Т.В. КРАВЧЕНКО

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДУТЬЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: Приведены результаты оценки влияния температуры дутья на показатели доменной плавки. Отмечено, что с ростом температуры дутья происходит снижение расхода кокса, а влияние на производительность носит экстремальный характер с максимумом. Характер связи с производительностью обусловлен изменением газопроницаемости столба шихты. Влияние на расход связано как с ростом количества тепла, вносимого с дутьем, так и с ростом расхода природного газа. С увеличением температуры дутья доля природного газа в общем снижении расхода кокса возрастает.

Ключевые слова: температура дутья, расход кокса, производительность, расход природного газа.

V.N. TITOV, I.V. KUPRIYANOVA, T.V. KRAVCHENKO

INFLUENCE OF BLAST TEMPERATURE ON BLAST FURNACE PERFORMANCE INDICATORS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The results of assessing the influence of blast temperature on blast furnace smelting parameters are presented. It is noted that coke consumption decreases with an increase in blast temperature, and the influence on productivity is of an extreme character with a maximum. The character of the relation to productivity impacts the change of gas permeability in the charge column. The influence on coke consumption is related both to the increase in the amount of heat introduced with the blast and to the increase in natural gas consumption. The share of natural gas in the total reduction of coke consumption increases with an increase in blast temperature.

Keywords: blast temperature, coke consumption, productivity, natural gas consumption.

ВВЕДЕНИЕ

Нагрев дутья перед его подачей в доменную печь является одним из основных мероприятий, направленных на повышение эффективности доменной плавки. Проведенные в первой половине XIX века опытные плавки показали, что данное мероприятие является достаточно эффективным и затраты топлива на нагрев тепла в несколько раз ниже экономии топлива при выплавке чугуна [1].

В настоящее время нагрев дутья осуществляют в специальных аппаратах,

называемыми воздухонагревателями. Наиболее распространенными конструкциями воздухонагревателей являются [2, 3]:

1. Воздухонагреватель с внутренней камерой горения.
2. Воздухонагреватель с выносной камерой горения.
3. Бесшахтный воздухонагреватель конструкции Калугина.

Первый тип воздухонагревателей позволяет достигнуть температур дутья 1200 °С, второй – 1 250 °С, третий – до 1 300 °С.

В соответствии с работами [4,5] основными направлениями по повышению эффективности работы воздухонагревателя с целью увеличения температуры дутья являются:

- Оптимизация режимов работы блока воздухонагревателей с использованием АУСТП
- Изменение технологии подогрева дутья с позиции повышения КПД используемого топлива
- Применение технологических приемов, обеспечивающих подогрев газа и воздуха горения, в том числе с использованием тепла отходящих газов.

Авторами работ [6–8] проведена аналитическая оценка влияния температуры дутья на работу доменной печи с использованием математической модели. По результатам оценки авторы отмечают, что рост температуры дутья приводит к снижению расхода кокса и росту производительности. При этом с ростом температуры дутья величина экономии кокса и прироста производительности снижается. Авторы [6–8] отмечают, что одним из факторов, обуславливающих снижение эффективности, является замедление скорости снижения температуры колошниковога газа. Проведенная оценка показала, что при равномерном распределении рудных нагрузок величина снижения расхода кокса и прироста производительности на 10–30 % (отн.) меньше, по сравнению с вариантом, когда распределение рудных нагрузок носит неравномерный характер (центральный ход с подгруженной периферией). Это обусловлено высокой степенью использования энергии газового потока и, соответственно, более высокой степенью приближения к предельным термодинамическим условиям доменной плавки.

Авторами работы [9] осуществлена оценка влияния температуры дутья на стабильность химического состава чугуна, которое характеризовали величиной среднеквадратичного отклонения содержания кремния в чугуне. Оценка проведена методом математического

моделирования. По итогам проведенного анализа авторы [9] делают заключение, что работа с температурой 1063 °С будет с наибольшей степенью вероятности обеспечивать минимальные колебания содержания кремния в чугуне, которое составит 0,0265 %. При этом авторами оценена экономическая целесообразность работы с такой температурой дутья, а не с более высокой.

В работе [10] авторы оценивали влияние температуры дутья на работу доменной печи при разных условиях. На первом этапе произведена оценка влияния температуры дутья на технико-экономические показатели доменной плавки при использовании различных типов окатышей (офлюсованные и неофлюсованные). Результаты показали, что повышение температуры дутья более эффективно при использовании неофлюсованных окатышей, что выражается в большей экономии кокса и увеличении производительности. Также отмечается более высокий прирост степени использования СО. Дополнительно в работе [10] произведен расчет основных показателей доменного процесса при совместном увеличении температуры дутья и расхода природного газа. Расчет осуществлялся с использованием зональных тепловых балансов.

В заключении авторы [10] отмечают, что в существующих условиях доменной плавки повышение температуры дутья позволяет работать с повышенным расходом природного газа, оказывая воздействие не только на теоретическую температур горения, но и на газодинамические условия в верхней части печи. При этом дальнейшее увеличение температуры дутья должно производиться совместно с другими мероприятиями, способствующими снижению степени прямого восстановления.

В работе [11] представлены результаты оценки влияния повышения температуры дутья для условий работы ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат». Однако, несмотря на фактические данные, авторы работы [11] оценку эффективности повышения

температуры дутья производят расчетным путем с использованием методики А.Н. Рамма [12]. По результатам расчета авторы отмечают, что повышение температуры дутья способствует снижению расхода кокса и увеличению производительности доменной печи. При этом частично экономия кокса обусловлена повышением расхода природного газа.

Недостатком работы [12] является отсутствие оценки эффективности повышения температуры дутья с использованием фактических данных по работе доменной печи.

Таким образом, можно отметить, что повышение температуры дутья и в настоящее время является одним из основных направлений повышения эффективности доменной плавки. При этом в современной литературе в основном приводятся результаты расчетно-аналитической оценки эффективности повышения температуры дутья. Оценка на фактических результатах доменной плавки практически отсутствует.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является оценка эффективности повышения температуры

дутья с использованием фактических результатов работы доменных печей.

Оценку влияния температуры дутья на показатели доменной плавки осуществляли для условий работы двух доменных печей, полезным объемом 2 000 м³ (ДП-А и ДП-Б). Отличие ДП-Б от ДП-А заключается в применении технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива. На рис. 1 приведено влияние температуры дутья на производительность и расход кокса

Из рис. 1 видно, что рост температуры дутья сопровождается снижением расхода кокса. При этом связь с производительностью носит экстремальный характер с максимумом. Экстремальный характер связи с производительностью обусловлен тем, что при увеличении температуры сверх определенного уровня происходит рост газодинамической напряженности столба шихты (рис. 2), что обусловлено снижением порозности столба шихты из-за сокращения расхода кокса, а также роста расхода природного газа (рис. 3) для сохранения теоретической температуры горения на базовом уровне.

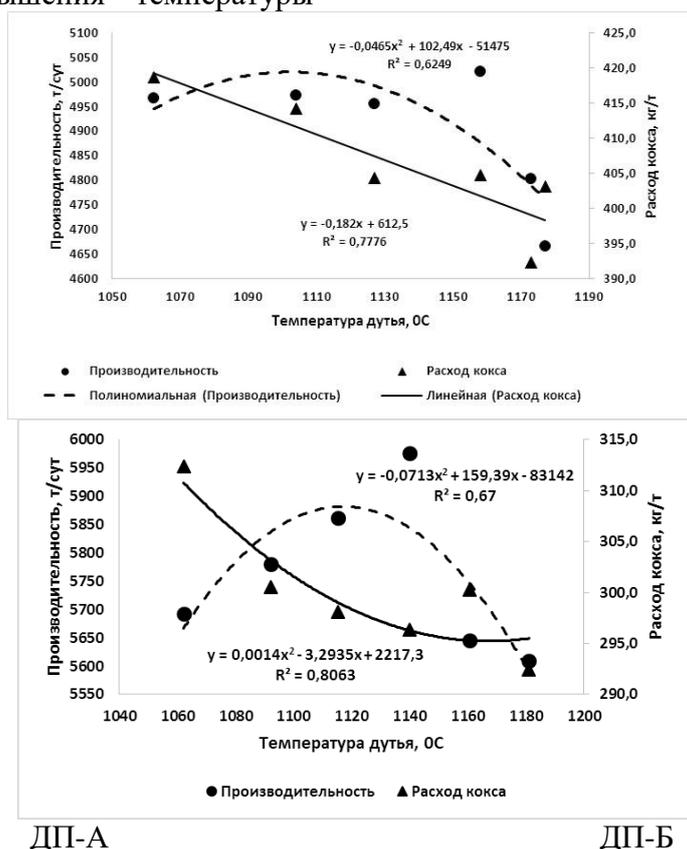
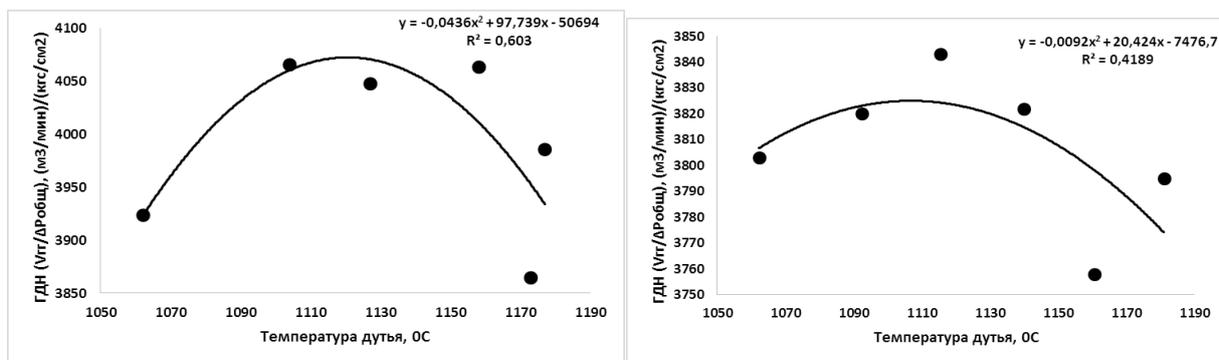


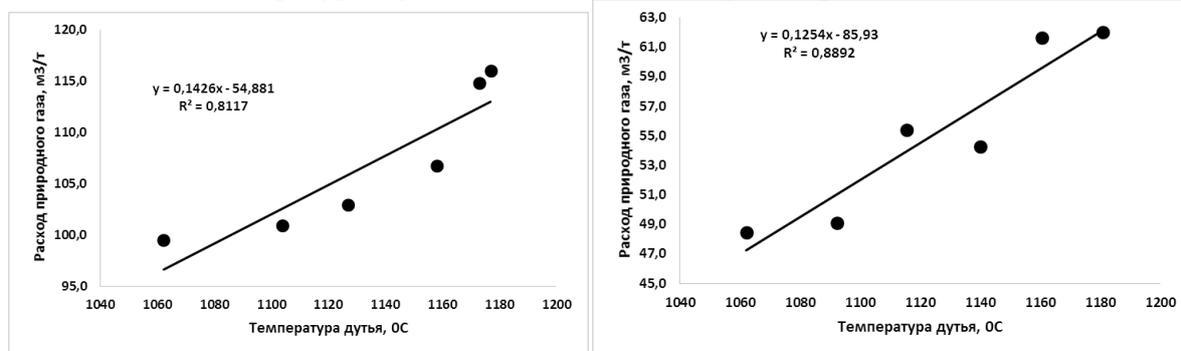
Рис. 1. Влияние температуры дутья на производительность и расход кокса



ДП-А

ДП-Б

Рис. 2. Влияние температуры дутья на газодинамическую напряженность (показатель ГДН)



ДП-А

ДП-Б

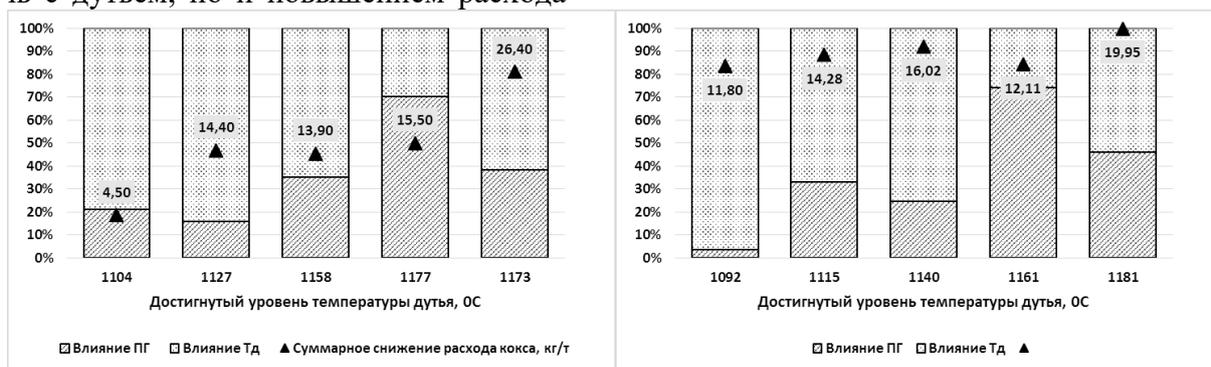
Рис. 3. Влияние температуры дутья на удельный расход природного газа

При сопоставлении рис. 1 и 2 можно отметить совпадение экстремумов производительности и показателя ГДН. Влияние температуры дутья выражается относительно влияния расхода природного газа и составляет рост расхода природного газа на 1,25–1,43 м³/т чугуна на каждые 10 °С увеличения температуры дутья.

Снижение расхода кокса при увеличении расхода температуры дутья обусловлено не только повышением количества тепла, вносимого в доменную печь с дутьем, но и повышением расхода

природного газа. Расчет чистого влияния температуры дутья (без учета изменения расхода природного газа) показал, что данная величина составляет 0,20 % / 10 °С и близка к коэффициентам, принятым при пофакторном анализе.

На рис. 4 представлено распределение общего снижения расхода кокса между температурой дутья и природным газом. Как видно из данных рис. 4 с увеличением температуры дутья ее доля в общем снижении расхода кокса снижается, а доля природного газа растет.



ДП-А

ДП-Б

Рис. 4. Распределение доли температуры дутья и природного газа в общем снижении расхода кокса

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ изменения параметров доменной плавки при увеличении температуры дутья.

2. Влияние температуры дутья на производительность печи носит знакопеременный характер с максимумом в районе 1 110–1 140 °С. Снижение производительности при увеличении температуры дутья сверх оптимального значения обусловлено ростом газодинамической напряженности (повышением количеством газов на единицу массы шихты).

3. Влияния на расход кокса носит обратно пропорциональный характер. С увеличением температуры дутья расход кокса снижается, что обусловлено как

повышением количества тепла, поступающего в доменную печь с дутьем, так и увеличением расхода природного газа. Рост последнего составляет 1,25–1,43 м³/т на каждые 10 °С. Отдельное (без учета влияния расхода природного газа) влияние температуры дутья на расход кокса в среднем выражается величиной –0,20 % на каждые 10 °С

4. С увеличением температуры дутья увеличивается доля природного газа в общем снижении расхода кокса, что предопределяет повышенную газодинамическую напряженность при повышенных (1 160–1 180 °С) уровнях температуры дутья и снижения производительности доменной печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Металлургия чугуна: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп.* / Под редакцией Ю.С. Юсфина. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с. – Текст : непосредственный.

2. *Доменные воздухонагреватели (конструкция, теория, режимы работы)* / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каштанова [и др.] // Москва : *Металлургия*, 1982. – 176 с. – Текст : непосредственный.

3. **Плискановский, С.Т.** Оборудование и эксплуатация доменных печей / С.Т. Плискановский, В.В. Полтавец. – Днепропетровск : Пороги, 2004. – 340 с. – Текст : непосредственный.

4. Новое направление совершенствования системы нагрева доменного дутья / В.Н. Ковшов, В.В. Бочка, С.Е. Сулименко [и др.]. – Текст : непосредственный // *Сталь*. – № 3. – 2012. – С. 2–4

5. **Буткарев, А.А.** Увеличение температуры горячего дутья доменных воздухонагревателей с помощью подсистемы оптимального управления / А.А. Буткарев, А.П. Буткарев, А.Г. Птичников. – Текст : непосредственный // *Сталь*. – № 3. – 2015. – С. 28–34.

6.

6. **Товаровский, И.Г.** Анализ процессов доменной плавки при варьировании температуры дутья в широком диапазоне / И.Г. Товаровский, А.Е. Меркулов. – Текст : непосредственный // *Черная металлургия*. – 2011. – № 4. – С. 36–50.

7. **Товаровский, И.Г.** Аналитическое исследование процессов доменной плавки при разных температурах дутья и содержаниях кислорода / И.Г. Товаровский, А.Е. Меркулов. – Текст : непосредственный // *Металлург*. – 2011. – № 5. – С. 41–47.

8. **Товаровский, И.Г.** Аналитическое исследование процессов доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, А.Е. Меркулов. – Текст : непосредственный // Днепропетровск, ЧМК «Экономика», 2011. – 206 с.

9. **Семенюк, П.П.** Математическое моделирование влияния температуры горячего дутья доменной печи на колебания содержания кремния в чугуне / П.П. Семенюк, Р.Е. Великоцкий, Н.А. Румянцева. – Текст : непосредственный // *Черная металлургия*. – 2018. – № 9. – С. 25–31.

10. **Сибгатулин, С.К.** Действие повышения температуры дутья на ход плавки чугуна в зависимости от условий

работы доменной печи // С.К. Сибатулин, Р.Ф. Махмутов, И.А. Рамазанов // Литейные процессы. – 2013. – № 12. – С. 35–41. – Текст : непосредственный.

11. Оценка эффективности повышения температуры доменного дутья в условиях ОАО «Днепропетровский меткомбинат» В.И. Романенко, В.Г. Крупий,

Сведения об авторах:

Титов Владимир Николаевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургических технологий,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Куприянова Ирина Вячеславовна

старший преподаватель кафедры металлургических технологий,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Кравченко Татьяна Викторовна

Старший преподаватель кафедры металлургических технологий,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Ю.Г. Антонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 15–18.

12. Рамм, А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. Москва : Металлургия, 1980. – 304 с. – Текст : непосредственный.

Information about the authors:

Titov Vladimir Nikolaevich

Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Kupriyanova Irina Vyacheslavovna

Senior lecturer of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Kravchenko Tatiana Viktorovna

Senior lecturer of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

e-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

К.Н. ПЛЕШИВЦЕВ, А.Н. РОГОТОВСКИЙ, Е.Н. ТЮЛЕНЕВ,
О.Ю. ШЕШУКОВ, А.А. МЕТЕЛКИН

УДАЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ВАКУУМАТОРЕ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Липецкий государственный технический университет, Липецк
ПАО «НЛМК», Новолипецкий металлургический комбинат, Липецк
Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Аннотация: В статье рассмотрены основные механизмы удаления углерода под глубоким вакуумом в циркуляционном вакууматоре.

Ключевые слова: декарбонизация, вакуумирование стали, вакууматор.

K.N. PLESHIVTSEV, A.N. ROGOTOVSKY, E.N. TYULENEV,
O.Yu. SHESHUKOV, A.A. METELKIN

CARBON REMOVAL AT REDUCED PRESSURE IN AN RH DEGASSER

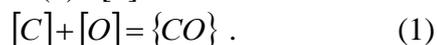
Lipetsk State Technical University, Lipetsk
"NLMK", Novolipetsk Metallurgical Plant, Lipetsk
Ural Federal University, Ekaterinburg

Abstract: The article discusses the main mechanisms of high vacuum carbon removal in an RH degasser.

Keywords: decarbonization, steel degassing, RH degasser.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс реакции декарбонизации исследован больше, чем любая другая химическая реакция. В сталеплавильной ванне окисление углерода в основном идет по реакции (1) [1]:



Константа равновесия реакции (1) в общем случае определяется реакцией (2):

$$K_C = \frac{P_{CO}}{[C] \cdot [O]} . \quad (2)$$

Константа равновесия реакции (1) определяется по уравнению (3) [3]:

$$LgK_C = (1860/T) + 1,61 . \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) с учетом (3) при температуре 1 600° С примет вид [1]:

$$[C] \cdot [O] = P_{CO} / K_C = \\ = P_{CO} / 402 = 0,0025 \cdot P_{CO} . \quad (4)$$

Если в формуле (4) принять, что парциальное давление {CO} соответствует остаточному давлению над металлом $P_{CO} \approx P_{ост}$ и дополнительно учесть, что в производственных условиях в вакуум-камере достигается давление не менее 2 мбар, содержание кислорода [O] = 0,04-0,08 %, то минимальное содержание углерода будет соответствовать следующему значению:

$$[C]_{min} = \frac{0,0025 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 0,0001\% . \quad (5)$$

Однако на практике содержание углерода выше в 100-200 раз. По данным [1] такое

большое различие прежде всего объясняется тем, что при вакуумировании даже в производственных условиях остаточное давление приближается к упругости пара, и происходит интенсивное испарение железа, т.е. из металлической фазы удаляются не только углерод и кислород, но и железо.

Получение очень низкого остаточного содержания углерода (менее 0,001 %) в жидком металле даже при струйном вакуумировании практически невозможно [1].

По данным [2] способные к зарождению на поверхности расплава пузырьки газа {CO} необходимо соблюдать при условиях, представленных в уравнении (6):

$$400 \cdot [C] \cdot [O] = 1,3 \cdot 10^{-2} \quad (6)$$

С учетом данных, представленных выше, можем рассчитать минимальное содержание углерода в металле, при котором возможно кипение расплава

$$[C] = \frac{1,3 \cdot 10^{-2}}{400 \cdot [O]} = \frac{1,3 \cdot 10^{-2}}{400 \cdot 0,06} = 0,00054 \text{ \%} .$$

С учетом вычислений можно сделать вывод, что образование пузырьков газа {CO} с поверхности расплава в вакуум-камере происходит постоянно и не ограничивается содержанием углерода в металле.

По данным [2] в случае образования пузырьков окиси углерода максимальная глубина зарождения определяется из уравнения (7)

$$P + \frac{h}{142} < 400 \cdot [C] \cdot [O] \quad (7)$$

где, P – давление в вакуум-камере;
h – глубина зарождения пузырьков газа CO.

Тогда при минимальном содержании углерода (0,001 %) и содержании кислорода в металле [O] = 0,06 % глубина зарождения пузырьков газа составит:

$$h = (400 \cdot [C] \cdot [O] - P) \cdot 142 = \\ = (400 \cdot 0,001 \cdot 0,06 - 0,001) \cdot 142 = 3,3 \text{ см.} \quad (8)$$

Таким образом, для достижения минимальных значений содержания углерода в металле, достаточно, в отличие от удаления водорода, механизма образования пузырьков газа CO и удаления их с поверхности расплава в вакуум-камере.

Необходимо отметить, что протекание реакции (1) возможно и на границе раздела фаз расплав – транспортирующий газ, однако данный механизм удаления углерода только интенсифицирует процесс декарбонизации и не влияет на минимальное остаточное содержание углерода.

Определим пути удаления углерода, путем его взаимодействия с растворенным кислородом с образованием газа {CO}.

Первый путь удаления – это с поверхности расплава в вакуум-камере. Полученные данные представлены на рис. 1.

Из данных, представленных на рис. 1, видно, что при значениях углерода менее 0,004 % его удаление путем взаимодействия с растворенным кислородом путем всплытия на поверхность расплава затруднено.

Для достижения содержания углерода в стали на уровне 0,001 %, необходимо интенсифицировать процесс декарбонизации путем дополнительного воздействия транспортирующего газа на расплав.

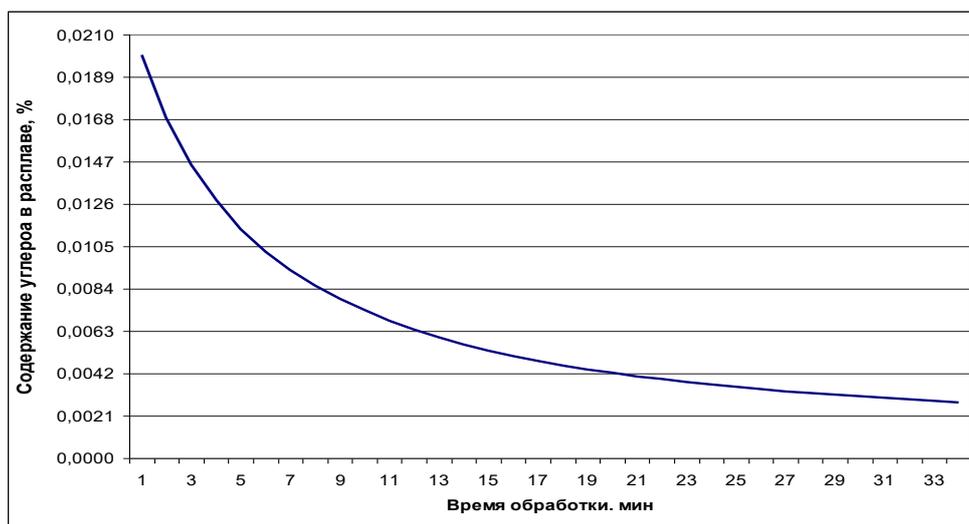


Рис. 1. Удаление углерода из расплава путем образования газа {CO} с последующим его всплытием и удалением газа с поверхности металла

ВЫВОДЫ

1. В циркуляционном вакууматоре при известных технологических процессах в области металлургии невозможно получить содержание углерода в стали менее 0,001 %.

2. Механизм декарбонизации и удаления пузырьков газа с поверхности вакуум-камеры достаточен для получения пониженного содержания углерода в металле, однако для получения заданного (менее 0,002 %) необходима длительная обработка более 0,5 часа.

3. Для интенсификации процесса декарбонизации необходимо интенсифицировать процесс декарбонизации путем дополнительного воздействия транспортирующего газа на расплав.

4. Уменьшение времени обработки металла в вакуум-камере при низком давлении позволит снизить удельные затраты и повысить производительность металлургического агрегата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бигеев, А.М.** Металлургия стали. Теория и технология плавки стали : учебник для вузов / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 544. – Текст : непосредственный.

2. **Кудрин, В.А.** Теория и технология производства стали : учебник / В.А. Кудрин. – Москва : «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с. – Текст : непосредственный.

3. **Кнюппель, Г.** Раскисление и вакуумная обработка стали. Термодинамические и кинетические закономерности. – Текст : непосредственный / Г. Кнюппель. – Москва : Металлургия, 1973. – 312 с.

4. **Кнюппель, Г.** Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии / Г. Кнюппель. – Москва : Металлургия, 1984. – 414 с. – Текст : непосредственный.

5. **Кудрин, В.А.** Внепечная обработка чугуна и стали / В.А. Кудрин. – Москва : Металлургия, 1992. – 336 с. – Текст : непосредственный.

6. Шакиров, К.М.

Гидродинамический анализ реакции окисления углерода в условиях кислородно-конвертерного процесса / К.М. Шакиров, С.И. Попель, В.В. Павлов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 4. – С. 92–104. – Текст : непосредственный.

7. Анализ процесса удаления углерода в циркуляционном вакууматоре с целью получения ультранизкого содержания в расплаве / К.Н. Плешивцев, А.Н. Роговский, О.Ю. Шешуков [и др.]. – Текст : непосредственный // XVII Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла ISCON-2023 «От руды до стали»: сборник трудов, 03–07 апреля 2023. – Магнитогорск, 2023. – С. 40–42.

Сведения об авторах:

Плешивцев Константин Николаевич
преподаватель кафедры металлургических технологий,
Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.

pleshivtsev.konstantin@yandex.ru

Роговский Александр Николаевич
кандидат технических наук, заведующий
кафедрой металлургических технологий,
Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.

arogotovskij@yandex.ru

8. Изучение процесса удаления водорода в циркуляционном вакууматоре в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» / К.Н. Плешивцев, О.Ю. Шешуков, А.А. Метелкин, О.И. Шевченко. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 8. – С. 543–549.

Information about the authors:

Pleshivtsev Konstantin Nikolaevich
lecturer of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.
398055, Russia, Lipetsk,
Moskovskaya st., 30.

pleshivtsev.konstantin@yandex.ru

Rogotovskiy Alexander Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Head of the
Department of Metallurgical Technologies
Lipetsk State Technical University.

398055, Russia,
Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

arogotovskij@yandex.ru

Шешуков Олег Юрьевич

доктор технических наук,
директор Института новых материалов и
технологий УрФУ ФГАОУ ВО «УрФУ
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина».

620002, Россия, Екатеринбург,
ул. Мира, 28.

o.j.sheshukov@urfu.ru

Метелкин Анатолий Юрьевич

доктор технических наук, доцент кафедры
металлургии железа и сплавов,
Институт новых материалов и технологий
УрФУ ФГАОУ ВО «УрФУ
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина».

620002, Россия, Екатеринбург,
ул. Мира, 28.

anatoliy82@list.ru

Тюленев Евгений Николаевич

начальник отдела технической дирекции
ПАО «НЛМК»,
Новолипецкий металлургический
комбинат.

398019, Россия, Липецк,
пл. Metallургов, д.2.

tyulenev_en@nlmk.com

Sheshukov Oleg Yurievich

Doctor of Technical Sciences, Director of the
Institute of New Materials and Technologies
of URFU Federal State Educational
Institution of Higher Education "URFU
named after the first President of Russia
B.N. Eltsin".

620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 28.

o.j.sheshukov@urfu.ru

Metelkin Anatoly Yurievich

Doctor of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Metallurgy of
Iron and Alloys,
Institute of New Materials and Technologies
of URFU Federal State Educational
Institution of Higher Education "URFU
named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin".

620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 28.

anatoliy82@list.ru

Tyulenev Evgeniy Nikolaevich

Chief of department technical direction
NLMK Group New Lipetsk Metallurgical
plant, Lipetsk, Russia, str. Metallurgov., 2.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Липецкого государственного технического университета» публикуются статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера.

Статья должна поступить на электронный адрес vm@stu.lipetsk.ru и сохранена в версии Microsoft Word 2003. Рукопись статьи (1 экземпляр) и сопроводительные документы должны быть высланы в редакцию. К сопроводительным документам относятся:

– рецензия, отражающая следующие пункты: актуальность представленной работы; характеристику объекта исследования; качество постановки целей работы и задач исследования; степень научной новизны исследования, практическую значимость работы; учебно-методическую ценность исследования, стиль изложения; степень разработанности темы научного исследования; структурность работы. (В случае если один из авторов является доктором наук, рецензия должна быть подписана доктором соответствующего профиля);

– выписка из протокола заседания кафедры, на котором было принято решение о рекомендации публикации статьи в журнал «Вестник Липецкого государственного технического университета»;

– согласие на публикацию и гарантии того, что статья не будет больше нигде опубликована, подписанные автором.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

1. На первой странице должны быть указаны: УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, название учреждения, представляющего рукопись для опубликования.

2. Текст статьи набирается в формате *.doc шрифтом Times New Roman размером 12 pt через одинарный интервал, без отступов, отступ красной строки 0,5 см, выравнивание по ширине, без уплотнения. Поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2 см, в две колонки. Не использовать табуляций, автоматических списков. Не использовать курсив, жирный текст и подчеркивания.

Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела.

3. Для набора формул применять редактор Microsoft Equation 3.0. Формулы должны быть оформлены шрифтом Times New Roman, без курсива, размером 12 pt, с одинарным интервалом.

Большие формулы необходимо разбивать на отдельные части. Фрагменты формул должны быть независимы (при использовании редактора формул каждая строка – отдельный объект).

Нумерацию и знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

4. Таблицы должны быть оформлены шрифтом Times New Roman, размером 12 pt, с одинарным интервалом. В случае если в тексте есть ссылка на таблицу, то пишется слово «табл.».

5. Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи. Список составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Библиографический список должен быть оформлен согласно ГОСТ 7.0.100-2018. Ссылки на библиографический список в тексте приводятся в квадратных скобках. Перечень литературных источников должен содержать не менее 15 наименований.

6. Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим государственным стандартам.

7. К статье прилагаются: аннотации (200–250 слов); ключевые слова (не менее трех); имена и фамилии авторов, ученые звания, должности и адрес места работы, электронный адрес; на английском языке название статьи, аннотация, ключевые слова, имена и фамилии авторов.

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ
DOI (присваивается редакцией)
УДК 656.078:338.2

Ю.Н. РИЗАЕВА, В.А. ЛОГИНОВ

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОСТАВОК ПРОДУКЦИИ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ВО ВРЕМЕНИ СПРОСЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассматриваются подходы к планированию поставок продукции. Предложен алгоритм сокращения потерь у потребителя и производителя при изменяющемся во времени спросе потребителя. Акцент сделан на современные требования в развитии отрасли за счет совершенствования планирования деятельности предприятий по показателям, которые являются функцией от спроса. Применение нового подхода к планированию поставок продукции заключается в учете изменяющегося во времени спроса потребителя. Математическое моделирование выполняется применительно к реальным эксплуатационным условиям. Планирование реализуется за счет разработанной математической модели и методики, направленных на сокращение общесистемных потерь. Применение разработанного подхода в практике работы предприятий позволит формировать общесистемные потери и использовать новое программное обеспечение для разработки и принятия управленческих решений.

Ключевые слова: поставка продукции, спрос, потери потребителя, потери производителя, планирование поставок продукции.

Yu.N. RIZAEVA, V.A. LOGINOV

SUPPLY PLANNING AT TIME-VARYING CONSUMER DEMAND

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article discusses approaches to product supply planning. An algorithm is proposed for reducing consumer and producer losses at time-varying consumer demand. Modern requirements are emphasized in the industry development by improving production planning according to indicators that are a function of demand. The new approach to supply planning is manifested in taking into account the time-varying consumer demand. Mathematical modeling is performed with respect to real operating conditions. Planning is implemented through the developed mathematical model and methodology aimed at reducing system-wide losses. The practical application of the developed approach will form system-wide losses and use new software to develop and make managerial decisions.

Keywords: product supply, demand, consumer losses, producer losses, product supply planning.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим процесс производства и поставки продукции в дискретные моменты времени $t=0,1, \dots, T$,

где T – период планирования [1, 2].

Спрос потребителя на продукцию в эти моменты времени задан и определяется функцией $q(t)$. Обозначим неизвестный размер поставки в момент времени как $x(t)$. При несовпадении поставки $x(t)$ и спроса $q(t)$ возникают общесистемные потери. При дефиците, то есть когда

$$d(t)=x(t)-q(t)<0,$$

общесистемные потери обуславливаются неудовлетворенностью спроса [3–5]. При превышении поставки над спросом, когда $d(t)>0$, потери вызваны дополнительными затратами на хранение избытка продукции.

Так как потери от превышения объема поставки продукции над спросом $d(t)>0$ меньше, чем потери от дефицита $d(t)<0$, то при одинаковом значении разности (в абсолютном значении) d , график функции потерь $f_1(d)$ будет иметь вид, как на рис. 1 (потери прямо пропорциональны разности d).

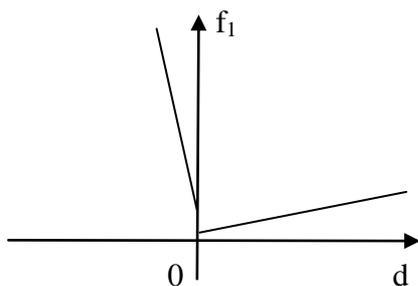


Рис. 1. График функции потерь потребителя

Функциональную зависимость, представленную на рис. 1, аппроксимируем:

$$f_1(d)=\begin{cases} a_1 d, & \text{если } d \geq 0 \\ b_1 d, & \text{если } d \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 – удельные потери потребителя на единицу продукции. При этом $b_1 > a_1 > 0$.

Для поставщика продукции желательна постоянная интенсивность производства, то есть $x(t) = \text{const}$, когда

$$u(t)=x(t+1)-x(t)=0.$$

В случае $u(t)>0$ или $u(t)<0$ производитель несет потери из-за перестройки производства. Функция потерь производителя имеет вид, показанный на рис. 2.

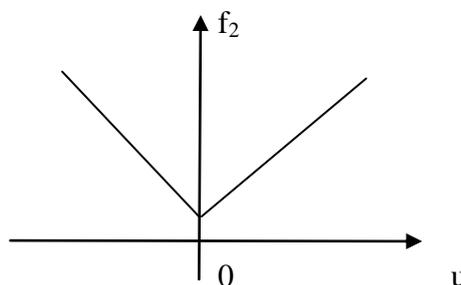


Рис. 2. График функции потерь производителя

В аналитическом виде аппроксимируем эту функцию в виде

$$f_2(u)=\begin{cases} a_2 u, & \text{если } u \geq 0 \\ b_2 u, & \text{если } u \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где a_2 и b_2 – удельные потери производителя на единицу продукции. Величины коэффициентов зависят от конкретных условий производства. Ясно только, что $a_1 > 0$, $b_1 > 0$ [6, 7].

Сформулируем задачу планирования поставки продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя: найти функцию поставки продукции $x(t)$, $t=1,2, \dots, T$, и динамику изменения этого объема поставки

$$u(t)=x(t+1)-x(t), \quad t=1,2, \dots, T-1,$$

чтобы минимизировать суммарные потери потребителя в течение планового периода T .

ВЫВОДЫ

Исходя из проведенного исследования, можно сделать вывод о возможности применения данного алгоритма в планировании поставок продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя, при этом общесистемные потери сокращаются. Результаты исследования предназначены для практики работы предприятий на этапе определения показателя общесистемных потерь.

Сведения об авторах:

Ризаева Юлия Николаевна

доктор технических наук, заведующий кафедрой управления автотранспортом, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

rizaeva.u.n@yandex.ru

Логинов Владимир Анатольевич

кандидат экономических наук, доцент кафедры управления автотранспортом, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

v_loginov@lipetsk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Логинов, В.А.** Устойчивость развития транспортных систем / В.А. Логинов, А.К. Карташова. – Текст : непосредственный // Тенденции развития современной науки : сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. В 2-х частях. Часть 1. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2017. – С. 538–541.
2. **Быстров, Н.В.** Обзор современных мировых тенденций развития асфальтобетонов / Н.В. Быстров. – Текст : непосредственный // Дороги России. – 2020. – № 1 (115). – С. 90–95.
3. Интеллектуальные методы управления транспортными системами (2- изд.) / А.С. Сысоев, С.А. Ляпин, А.В. Галкин [и др.]. – Москва : Издательско-торговая корпорация Дашков и К, 2022. – 192 с. – Текст : непосредственный.

Information about the authors:

Rizaeva Yulia Nikolaevna

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Vehicle Management, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

rizaeva.u.n@yandex.ru

Loginov Vladimir Anatolyevich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Vehicle Management,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

v_loginov@lipetsk.ru

ISSN 3034-3275

ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета

(Вестник ЛГТУ)

№ 4 (57) 2024 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Scientific and technical journal «Vestnik LSTU»

Регистрационный номер средства массовой информации Эл № **ФС77-87639**.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 25.06.2024 г.

Выходит 4 раза в год.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Адрес редакции: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Телефон: (4742) 32-81-33.

Липецкий государственный технический университет.

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Редактор: Е.А. Федюшина

Перевод (англ.) Н.В. Барышев

Дата подписания к использованию 19 декабря 2024 года

© ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», 2024