АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

ВЫПУСК 7

Уфа
АЭТЕРНА
2017

УДК 00(082)
ББК 65.26
А 33

Рецензенты:
1. Прошин И.А., д.т.н., проф.
2. Шляхов С.М., д.ф-м.н., проф.

А 33
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ: КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ [ПОД РЕД. И.В. МИРОШНИЧЕНКО]. - УФА: АЭТЕРНА, 2017. – 121 С.

ISBN 978-5-00109-215-5

Коллективная монография «Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты» посвящена широкому кругу проблем, которые находятся в центре внимания. Монография призвана дать представление о актуальных теоретических и практических вопросах технических наук.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов. Материалы публикуются в авторской редакции.

УДК 00(082)
ББК 65.26

ISBN 978-5-00109-215-5

© ООО «Аэтерна», 2017
© Коллектив авторов, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая читателю работа – яркий пример междисциплинарности. Представители ряда наук в области естествознания (Архитектура, Информатика, Материаловедение, Механика, Машиностроение, Ядерная энергетика и т.д.) объединяются, чтобы исследовать явления, важные для создания и развития техники

Монография, по нашему мнению, будет интересна и полезна научным работникам, преподавателям, аспирантам и студентам вузов. Данная книга, на наш взгляд, окажет также несомненную и немалую пользу всем, кто интересуется проблемами развития и становления психологии и педагогики. Хочется отметить, в связи с этим, прекрасный язык и стиль многих авторов, нередко приближающийся к художественному, а также высококачественные издательские характеристики книги, отличный дизайн, удачное структурирование излагаемого материала.

Начатая коллективом авторов работа, безусловно, имеет будущее, которое приведет к увеличению как круга поднятых вопросов, так и решения иных задач.

УДК 681.3; 681.5; 664.9

Вотинов Максим Валерьевич, канд. техн. наук
кафедра автоматики и вычислительной техники
Мурманский государственный технический университет
г. Мурманск, Российская Федерация

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ РЫБЫ ПРИ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ

Аннотация

Работа посвящена актуальным вопросам обеспечения производств средствами компьютерного математического моделирования технологических процессов, протекающих под управлением систем автоматизации. Показано формирование температурных моделей тепловой обработки рыбы на примере малогабаритной сушильной установки.

Ключевые слова

компьютерная модель, автоматизация, рыбная промышленность, малогабаритная сушильная установка, нагрев, тепловая обработка.

Введение

На сегодняшний день одним из самых мощных инструментов математического анализа и проектирования является компьютерное моделирование, которое помогает специалистам в разработке сложных технологических процессов и производств. Компьютерное моделирование позволяет инженеру исследовать объекты в тех случаях, когда делать это на реальном объекте затруднено или нецелесообразно. Развитие систем компьютерного моделирования, в том числе для рыбной промышленности, сегодня является актуальной задачей.

В Мурманском государственном техническом университете была разработана и внедрена в производство в учебно - экспериментальном цехе малогабаритная сушильная установка для разработки малоотходных технологических процессов получения солено - сушёных и копчёных изделий [3].

Однако, ввиду того, что данные процессы длительны по времени и трудоёмки (необходимо отбирать образцы близкими по размерам и удельной поверхности, подготавливать полуфабрикат и так далее), было принято решение задаться целью разработать компьютерную модель исследования процессов тепловой обработки рыбы при автоматическом управлении её нагревом и обезвоживанием.

Математическая модель процесса позволит сократить затраты времени на подготовку и проведение экспериментов, а также способствует симуляции различных режимов тепловой обработки рыбы.

Инструменты исследования

Разработанная малогабаритная сушильная установка [1], представленная на рисунке 1, по традиционной схеме включает корпус, с расположенными внутри сетчатыми противнями. В состав установки входит термокамера с элементами подогрева сушильного агента, а также блок автоматики, реализующий систему автоматического управления тепловыми процессами. Камера оснащена дверью для размещения рыбного полуфабриката.

Подготовка сушильного агента включает в себя:

- центробежный нагнетательный вентилятор;
- камера нагрева воздуха с трубчатым электронагревателем (ТЭН) мощностью 2 кВт;
- лампы инфракрасного излучения (ИК - лампы) мощностью 2 кВт.

1 – корпус; 2 - камера сушки с сетчатыми поддонами; 3 – двухсторонний центробежный вентилятор; 4 – камера нагрева воздуха с трубчатым электронагревателем; 5 – нагнетающий воздуховод; 6 – входной патрубок, соединенный с камерой нагрева (4), 7 – трубопровод; 8 - клапаны распределения воздушных потоков 9 – блок автоматики; 10 – инфракрасные лампы; 11 – датчик температуры в камере; 12 – устройство для измерения температуры с использованием инфракрасного датчика; 13 – площадка для измерения массы рыбы.

Рисунок 1 - Общий вид малогабаритной сушильной установки

Математическое описание изменения температуры в термокамере малогабаритной сушильной установки

Для определения математической модели малогабаритной сушильной установки, а именно её функциональной схемы, была поставлена и проведена серия экспериментов, как с использованием трубчатого электронагревателя, так и с использованием ламп инфракрасного излучения.

На изменение температуры в термокамере будут влиять как инфракрасные лампы, так и трубчатый электронагреватель. На рисунке 2 представлена функциональная схема малогабаритной сушильной установки.

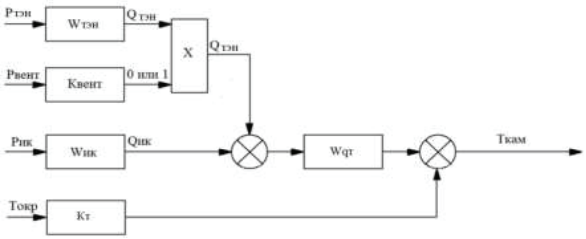


Рисунок 2 – Функциональная схема малогабаритной сушильной установки как объекта управления

Основными воздействиями, прикладываемыми к исполнительным механизмам малогабаритной сушильной установки в процессе тепловой обработки, а также основными технологическими параметрами являются:

Ртэн – мощность, подводимая к трубчатому электронагревателю;

Рвент – мощность, подводимая к центробежному вентилятору;

Рик – мощность, подводимая к инфракрасным лампам;

Ткам – температура в термокамере.

Начальным условием является Токр – температура окружающей среды. В соответствии с функциональной схемой на выходной параметр Ткам влияют Ртэн, Рвент, Рик и формируемые ими Ттэн и Тик.

Центробежный вентилятор функционирует в двух режимах: «простой» или «работа», формируя движение сушильного агента.

Трубчатые электронагреватели расположены за пределами термокамеры в камере нагрева воздуха. При подводе мощности Ртэн, тепло Ттэн, выделяемое трубчатыми электронагревателями, будет поступать в термокамеру малогабаритной сушильной установки только при режиме центробежного вентилятора «работа».

При определении эффективных режимов тепловой обработки следует учитывать влияние не только температуры в термокамере и относительной влажности сушильного агента, но и температуру поверхности, внутреннюю температуры полуфабриката, а также его массу.

На рисунке 3 представлена функциональная схема формирования исходных температур для реализации процессов нагрева и обезвоживания рыбы.

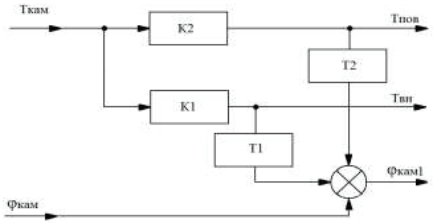


Рисунок 3 – Функциональная схема формирования исходных температур.

Значения температур Тпов, Твн зависят в общем случае от температуры Ткам, с учетом функций преобразования К2 и К1. В процессе прогрева рыба выделяет влагу, которая на функциональной схеме отмечена как φкам1 и образуется за счёт функций преобразования Т1 и Т2. Влага φкам1 влияет на относительную влажность сушильного агента в термокамере малогабаритной сушильной установки.

На малогабаритной сушильной установке была поставлена серия экспериментов. Исследовались переходные процессы Ткам при использовании трубчатого электронагревателя и инфракрасных ламп в максимальных режимах работы. В качестве рыбного образца, для исследования использовались образцы сельди удельной поверхностью 0,02 $м^2$ / кг и средней толщиной 3 см с начальным содержанием соли 2 - 2,5 % . Были поставлены следующие эксперименты:

- нагрев до установившихся температур Ткам при работе трубчатого электронагревателя на 100 % мощности.
- нагрев до установившихся температур Ткам при работе инфракрасных ламп на 100 % мощности.

- нагрев до установившихся температур Ткам при работе трубчатого электронагревателя и инфракрасных ламп на 100 % мощности.

По виду переходных характеристик были определены передаточные функции изменения температуры в термокамере, при возмущающем воздействии от исполнительных механизмов для каждого режима. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Передаточные функции изменения температуры в термокамере

Параметр	**Передаточная функция**
С трубчатым электронагревателем	
Температура в термокамере	$W\text{мсу} = \frac{1}{264227p^2 + 1474p + 1}$
С инфракрасными лампами	
Температура в термокамере	$W\text{мсу} = \frac{1}{89980p^2 + 1022p + 1}$
Комбинированный режим	
Температура в термокамере	$W\text{мсу} = \frac{1}{135300p^2 + 736p + 1}$

Смоделированные с помощью полученных передаточных функций переходные процессы изменения температуры в термокамере малогабаритной установки были сравнены с экспериментальными данными. Анализ переходных процессов показал, что полученные в результате моделирования передаточные функции достоверно описывают экспериментальные данные, рисунке 4. Максимальная ошибка не превышает 5 % .

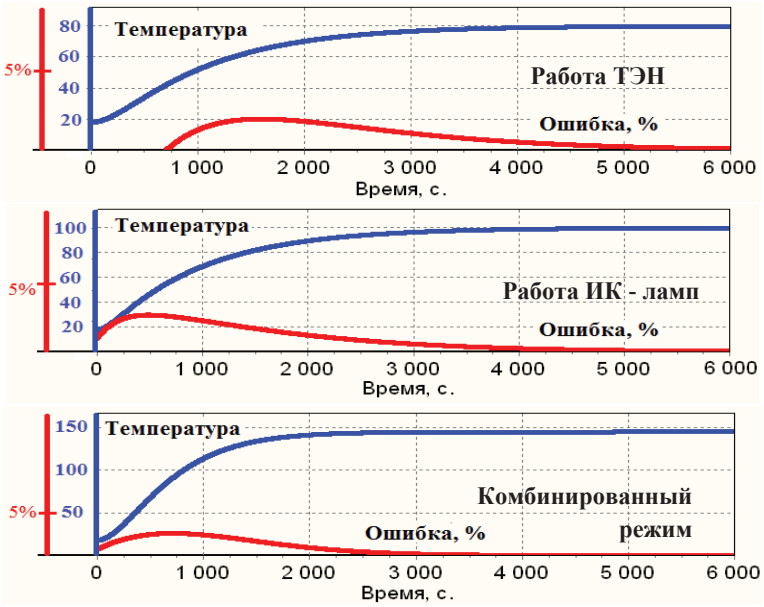


Рисунок 4 – Переходные характеристики Ткам при различных режимах работы малогабаритной сушильной установки

Исследование закономерностей изменения температуры в центре и на поверхности рыбы при различных способах обезвоживания рыбы

В процессе нагрева рыбы имеет место процесс обезвоживания, в течение которого полуфабрикат теряет влагу и как следствие свою массу. Ускорение процессов обезвоживания гидробионтов возможно с интенсификацией процессов внутреннего массопереноса. Однако, необходимо учитывать, что увеличение температурного режима обезвоживания может привести к резкому перепаду температур между поверхностью (Тпов) полуфабриката и его центром Твн, что будет препятствовать внутренней диффузии влаги.

Для оценки влияния различных способов обезвоживания как на нагрев поверхности полуфабриката, так и его прогрев изнутри была проведена серия экспериментов, в ходе которой исследовались образцы рыб с торпедовидной формой тела [1]. Условия проведения экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Начальные условия эксперимента

Условие	Сельдь	Путассу	Мойва
Влажность рыбы на общую массу, %	64,2	74,6	72,3
Содержание поваренной соли, %	2,9	3,2	3,1
Удельная поверхность, м2 / кг	0,12	0,17	0,21

Относительная влажность воздуха в цехе во время проведения экспериментов, рассчитанная с использованием психрометра составляла в среднем 75 % . В экспериментах использовались образцы сельди, путассу и мойвы.

Системой автоматического управления малогабаритной сушильной установки поддерживалась температура в термокамере на уровне 80 °С.

Графики переходных процессов по температуре поверхности сырья, а также по внутренней температуре сырья для путассу приведены на рисунках 5 - 7.

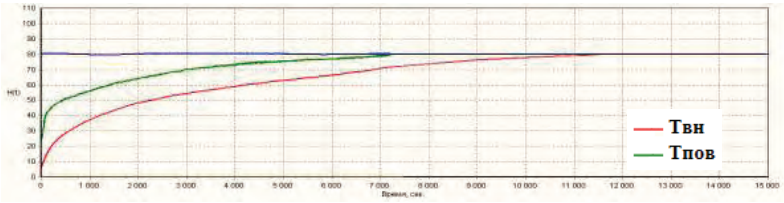


Рисунок 5 – Переходные характеристики Тпов, Твн
при конвективной тепловой обработке.

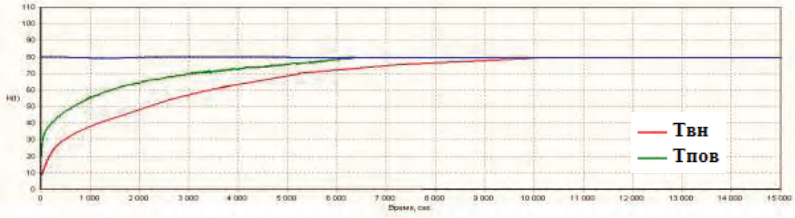


Рисунок 6 – Переходные характеристики Тпов, Твн
при инфракрасной тепловой обработке.

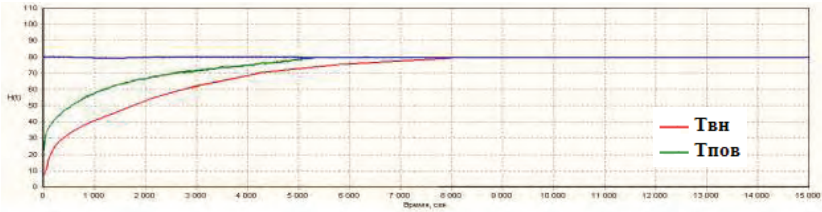


Рисунок 7 – Переходные характеристики Тпов, Твн
при комбинированной конвективной и инфракрасной тепловой обработке.

Представленные графики переходных процессов наглядно демонстрируют изменение температур поверхности (Тпов) полуфабриката и его центром (Твн). Скорость прогрева поверхностного слоя всегда выше, чем у внутреннего слоя. Вид графиков при тепловой обработке сельди и мойвы аналогичен представленным, отличается только продолжительностью технологического процесса.

Прогрев поверхностного слоя сырья зависит, прежде всего, от поддерживаемой температуры в термокамере малогабаритной сушильной установки. Изменение внутренней температуры сырья более сложный процесс, зависящий от размерно - массовых характеристик объекта, его химического состава, способов подвода тепловой энергии, а также и температуры его поверхности.

Проведённые исследования позволяют математически описать переходные характеристики изменения внутренней температуры и температуры поверхности для данных образцов рыб. Так переходные процессы для внутренней температуры сырья и температуры поверхности можно описать как сумму двух параллельных динамических звеньев первого порядка. Структурная схема представлена на рисунке 8.

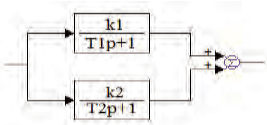


Рисунок 8 – Структурная схема переходных процессов Тпов, Твн

Коэффициенты k1, k2 и постоянные времени Т1, Т2 для передаточных функций изменения температуры Тпов, Твн представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Формирование передаточных функции изменения температур Тпов, Твн

Режим сушки	**Передаточная функция Твн(t)**				**Передаточная функция Тпов(t)**			
	k1	k2	T1	T2	k1	k2	T1	T2
Путассу								
Конвек. сушка	0,2	0,8	500	4000	0,5	0,5	100	2000
Инфракр. сушка	0,2	0,8	400	2800	0,5	0,5	80	1600
Комбинир. сушка	0,2	0,8	200	2200	0,5	0,5	75	1400

Сельдь								
Конвек. сушка	0,2	0,8	800	8000	0,5	0,5	190	3800
Инфракр. сушка	0,2	0,8	700	6500	0,5	0,5	140	3200
Комбинир. сушка	0,2	0,8	550	5000	0,5	0,5	130	2600
Мойва								
Конвек. сушка	0,2	0,8	440	2800	0,5	0,5	70	1350
Инфракр. сушка	0,2	0,8	300	2100	0,5	0,5	60	1300
Комбинир. сушка	0,2	0,8	150	1900	0,5	0,5	55	1280

Полученные передаточные функции на примере путассу были проанализированы и смоделированы в программном обеспечении VisSim 3.0. Ошибки моделирования переходных характеристик для внутренней температуры и температуры поверхности при трёх различных режимах (конвективном, инфракрасном, комбинированном) представлены на рисунках 9 - 10.

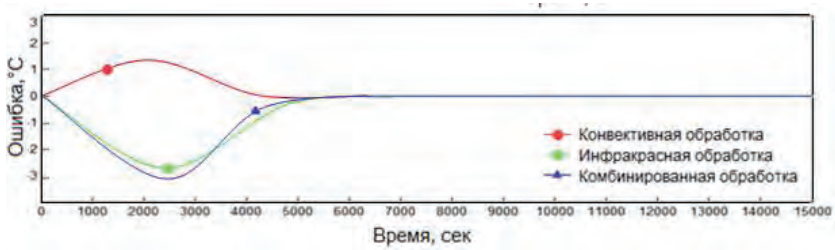


Рисунок 9 – Ошибка моделирования Твн при конвективной, инфракрасной, комбинированной сушке.

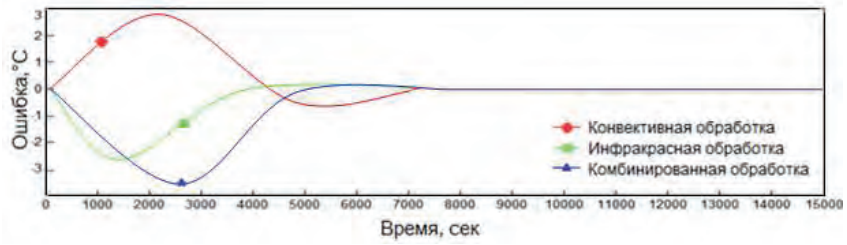


Рисунок 10 – Ошибка моделирования Тпов при конвективной, инфракрасной, комбинированной сушке.

Анализ графиков, содержащих ошибки моделирования Твн, Тпов показывает, что отклонения модели от реального технологического процесса составляет не более 5 % . Таким образом можно говорить об адекватности полученной модели реальному технологическому процессу тепловой обработки.

Очевидно, что постоянные времени Т, определяющие переходный процесс изменения переменных Твн, Тпов зависят как от способа обезвоживания, так и от размеров и массы используемых образцов рыбного сырья, в общем случае от удельной поверхности рыб. Таким образом можно предложить метод расчёта переходных характеристик для конвективного, инфракрасного и комбинированного способа обезвоживания как внутренней температуры рыбы, так и температуры её поверхности по средствам использования величины удельной поверхности полуфабриката, подверженного обработке.

С использование статистического программного обеспечения «Statgraphics Plus» для каждого режима функционирования малогабаритной сушильной установки были установлены корреляционные зависимости между удельной поверхностью s / m (в кг / м^2) и постоянными времени Т1, Т2 (в секундах). Для уточнения формул проводились дополнительные эксперименты с путассу (s / m: 0,15 - 0,25 кг / м^2), мойвой (s / m: 0,21 - 0,23 кг / м^2).

Полученные уравнения корреляционных зависимостей представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Корреляционные зависимости между постоянными времени Т1, Т2 передаточных функций и удельной поверхность рыбы s / m.

Режим	Зависимость
Конвективная тепловая обработка	
Внутренняя температура	$T1 = 2099 - 14880 \times (s / m) + 33281 \times (s / m)^2$ $T2 = 25057 - 193185 \times (s / m) + 419559 \times (s / m)^2$
Температура поверхности	$T1 = 562 - 4204 \times (s / m) + 9045 \times (s / m)^2$ $T2 = 11878 - 91228 \times (s / m) + 197698 \times (s / m)^2$
Радиационная(инфракрасная) тепловая обработка	
Внутренняя температура	$T1 = 1966 - 14318 \times (s / m) + 30932 \times (s / m)^2$ $T2 = 22796 - 186703 \times (s / m) + 418336 \times (s / m)^2$
Температура поверхности	$T1 = 401 - 2956 \times (s / m) + 6421 \times (s / m)^2$ $T2 = 10156 - 79796 \times (s / m) + 179064 \times (s / m)^2$
Комбинированная тепловая обработка	
Внутренняя температура	$T1 = 2106 - 17910 \times (s / m) + 40630 \times (s / m)^2$ $T2 = 17504 - 144529 \times (s / m) + 330966 \times (s / m)^2$
Температура поверхности	$T1 = 368 - 2686 \times (s / m) + 5788 \times (s / m)^2$ $T2 = 7831 - 60590 \times (s / m) + 139056 \times (s / m)^2$

Полиномная регрессия с вероятностью 98,9 % объясняет зависимость постоянных времени Т1, Т2 от удельной поверхности рыбы.

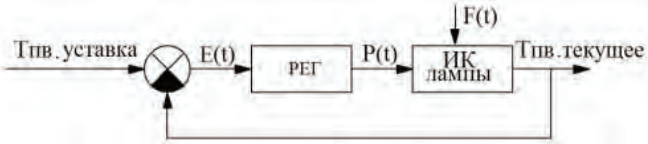
Таким образом, получена математическая модель прогрева рыбы в процессе обезвоживания в малогабаритной сушильной установке. Граничными параметрами использования данной модели являются удельные поверхности рыб торпедовидной формы (преимущественно мойва, сельдь, путассу) в диапазоне 0,10 - 0,25 кг / м^2.

Разработанная модель позволяет по полученной корреляционной зависимости определить постоянные времени прогрева рыбы, подверженной термической обработке при различных способах обработки. Безусловно, в дальнейшем её можно усовершенствовать, связывая постоянные времени Т не только с удельной поверхностью рыбы, но и с начальным содержанием влаги, поваренной соли и скоростью сушильного агента.

Функциональная схема работы системы автоматизации

Программная часть системы управления малогабаритной сушильной установкой, позволяет пользователю самостоятельно конструировать функциональную схему системы, выбирать исполнительные механизмы (трубчатый электронагреватель, инфракрасные лампы) и вид поступающей информации с объекта (температура в термокамере, температура поверхности рыбы, внутренняя температура рыбы), позволяет задавать различные комбинации этих параметров во времени, в зависимости от запрограммированного этапа работы.

Приведём пример функциональной схемы системы автоматического управления при радиационном способе обезвоживания, при котором поддерживается постоянной температура поверхности рыбы с помощью инфракрасных ламп. Типовая функциональная схема работы системы управления в этом случае представлена на рисунке 11.

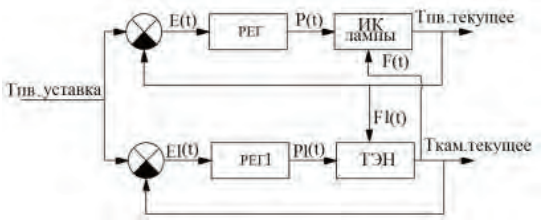


ОУ - объект управления, Рег. - ПИД регулятор, Тпв - температура поверхности рыбы, E(t) - рассогласование между заданным значением и регулируемым значением температуры поверхности, P(t) - управляющее воздействие, F(t) - возмущающее воздействие.

Рисунок 11 – Функциональная схема системы автоматического управления при радиационном способе обезвоживания

Аналогичная система автоматического управления реализована для трубчатого электронагревателя, а вместо температуры поверхности рыбы, пользователем может быть выбрана температура в термокамере либо внутренняя температура рыбы. Причём при автоматическом управлении одним из исполнительных механизмов, на другой может быть подана фиксированная мощность.

При работе системы автоматического управления для реализации стадийного комбинированного метода сушки используется более сложная функциональная схема [2]. Так как один из регуляторов системы должен поддерживать температуру в термокамере за счёт конвективной составляющей, а другой регулятор поддерживать температуру поверхности рыбы, подверженной обезвоживанию. Типовая функциональная схема работы системы управления при работе стадийного комбинированного метода тепловой обработки представлена на рисунке 12.



Ткам – температура в термокамере

Рисунок 12 – Функциональная схема работы системы управления при работе стадийного комбинированного метода тепловой обработки

Таким образом, для реализации компьютерного моделирования все составляющие известны, необходимо их только соединить воедино в программном обеспечении.

Компьютерное программное обеспечение для моделирования процессов тепловой обработки рыбы

Полученные передаточные функции изменения температуры в термокамере малогабаритной сушильной установки в зависимости от работы исполнительных механизмов – трубчатого электронагревателя или инфракрасных ламп, а также полученная математическая модель прогрева рыбы в процессе нагрева в малогабаритной сушильной установке легли в основу разработанного компьютерного программного обеспечения:

- компьютерная модель прогрева рыбы в процессе тепловой обработки;
- моделирование процессов тепловой обработки рыбы.

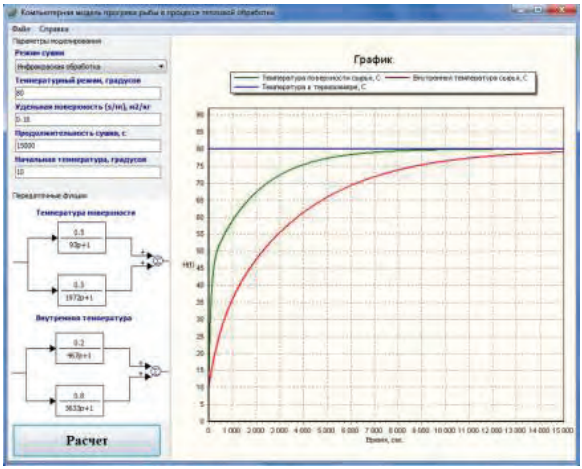


Рисунок 13 – Экранная форма программного обеспечения «Компьютерная модель прогрева рыбы в процессе сушки»

В первом программном обеспечении «Компьютерная модель прогрева рыбы в процессе тепловой обработки», рисунок 13, заложены формулы для определения постоянных времени изменения внутренней температуры рыбы и температуры на поверхности рыбы в зависимости от удельной поверхности образца, подверженного обработке.

Входными параметрами для расчёта будут являться:

- способ нагрева;
- температура окружающей среды, $^{\circ}C$;
- температура тепловой обработки, $^{\circ}C$;
- удельная поверхность рыбы, подверженной обработке, $м^2$ / кг;
- продолжительность тепловой обработки, с.

По нажатию кнопки «Расчёт» программное обеспечение определить передаточные функции для построения графиков изменения температуры поверхности рыбы и её внутренней температуры во времени.

Таким образом, пользователю, технологу не обязательно знать все полученные зависимости, а работать непосредственно в готовом программном обеспечении.

Сформированный математический аппарат позволяет также разработать компьютерную нелинейную математическую модель процесса тепловой обработки рыбы при обезвоживании. Структурная схема малогабаритной сушильной установки для разрабатываемой компьютерной модели представлена на рисунке 14.

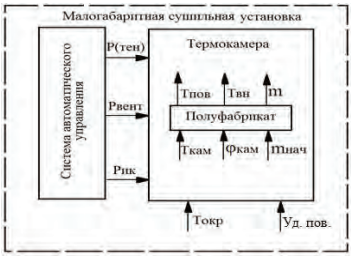


Рисунок 14 – Структурная схема разрабатываемой компьютерной модели процесса тепловой обработки рыбы при обезвоживании

Входным параметром структурной схемы являются температура окружающей среды (Токр). Параметры подаваемой мощность на исполнительные механизмы Ртен, Рвент и Рик определяются непосредственно системой автоматического управления в зависимости от алгоритма работы малогабаритной сушильной установки, режима сушки, а также удельная поверхность гидробионта, для расчета передаточных функций по Тпов и Твн.

Компьютерная нелинейная математическая модель процесса тепловой обработки рыбы при обезвоживании получила развитие в разработанном программном обеспечении «Моделирование процессов тепловой обработки рыбы». Вид экранной формы программного обеспечения представлен на рисунке 15.

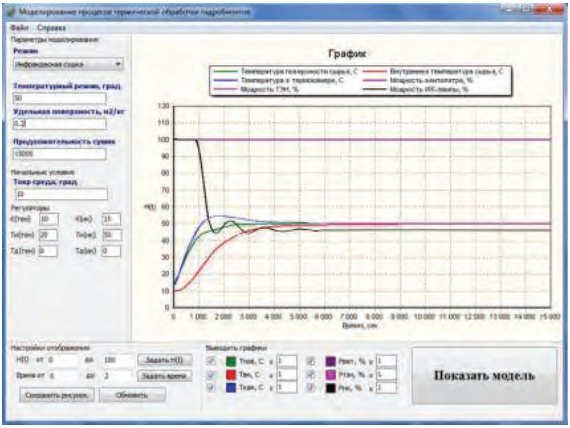


Рисунок 15 – Экранная форма программного обеспечения «Моделирование процессов тепловой обработки рыбы»

Для моделирования тепловой обработки путассу при её обезвоживании радиационным способом при температуре 50 °С необходимо ввести в программное обеспечение следующие настройки:

Способ: Радиационный.

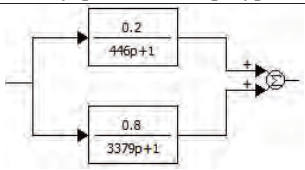
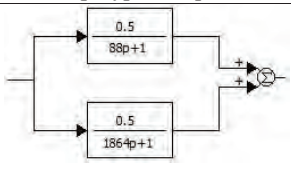
Удельная поверхность гидробионта: 0,165 $м^2$ / кг.

Температурный режим: 50 °С.

Параметры ПИД - регуляторов: рассчитанные оптимальные.

Программное обеспечение по разработанному методу по введённой удельной поверхности рыбы определит постоянные времени нагрева и определит передаточные функции для расчёта Тпов и Твн в виде, аналогичном представленному в таблице 5.

Таблица 5 – Передаточные функции Тпов и Твн.

Внутренняя температура	Температура поверхности
	

После ввода всех параметров программное обеспечение произведёт моделирование технологического процесса. Результаты данного моделирования представлены на рисунке 16.

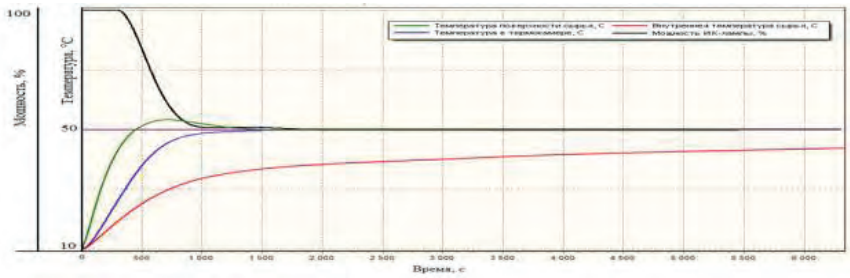


Рисунок 16 – Моделирование радиационного способа обработки путассу при температуре 50 °С.

Отличительной особенностью разработанного программного обеспечения является функция прогноза массопотерь и остаточной массы продукта. Функция прогноза осуществляется на основе накопленного опыта тепловой обработки различных образцов рыбы.

Стоит отметить, что разработанное программное обеспечение «Моделирование процессов тепловой обработки рыбы» позволяет загружать алгоритмы программы, подготовленные для системы автоматического управления малогабаритной сушильной установкой в конструкторе.

Выводы

Таким образом, разработанный математический аппарат позволил в виде компьютерного программного обеспечения реализовать математическую температурная модель технологического процесса тепловой обработки рыбы, основанную на методе расчёта внутренней температуры рыбы, температуры поверхности рыбы, по средствам использования величины её удельной поверхности.

Разработанные компьютерные модели позволяют с достаточной степенью достоверности моделировать различные способы тепловой обработки, позволяют анализировать температуру поверхности и внутреннюю температуру сырья.

Использование компьютерного моделирования процессов тепловой обработки рыбы при обезвоживании позволяет сократить время на анализ и апробацию новых температурных режимов тепловой обработки для различных образцов рыб, а также может быть применено при разработке новых кулинарные блюд и решений.

Список использованной литературы:

1. Вотинов, М. В. Исследование закономерностей изменения температуры на поверхности и в толще рыбы при различных способах её тепловой обработки / М. В. Вотинов // "Научный аспект №3 - 2015" том 2. – С. 314 - 318.

2. Вотинов, М. В. Повышение эффективности сушки гидробионтов за счёт применения комбинированных регуляторов / М. В. Вотинов // Control Engineering Россия. – 2015. – № 5 (59). – С. 32 - 35.

3. Пат. 135234 Рос. Федерация, МПК А 23 В 4 / 03. Малогабаритная сушильная установка / Вотинов М. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Мурм. гос. техн. ун - т». – № 2013132112 / 13 ; заявл. 10.07.13 ; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34. – 6 с. : ил.

© M.V. Votinov 2017

УДК 62

А.В. Жебо
к.т.н., доцент
Хабаровский государственный университет экономики и права
г. Хабаровск, Российская Федерация

ТОВАРОВЕДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТДЕЛЬНЫХ ДИКОРАСТУЩИХ ПЛОДОВ И ЯГОД ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Российский Дальний Восток очень богат разнообразными плодами и ягодами, произрастающими в естественных угодьях. В 90 - х гг. с угасанием потребительской кооперации и заготовительных пунктов объемы сбора сократились до 20 - 30 % , а по некоторым культурам и вовсе свелись к нулю. В последние годы значительно возрос интерес потребителя к дикоросам, что вынуждает производителей задуматься о расширении ассортимента продукции за счет включения оригинального дикорастущего сырья или вовсе перейти к производству новых, инновационных продуктов.

Нормативно - техническая документация по дикорастущим плодам и ягодам крайне ограничена и на отражает качество всего многообразия объектов. Тем не менее, для организации выпуска продукции необходимо регламентировать требования по таким группам показателей, как безопасность и назначение (функциональность). В связи с этим, было рассмотрен химический состав и определены основные показатели органолептические и физико - химические, которые позволят при составлении рецептур и технологических инструкции планировать качество инновационных продуктов.

В целом на российском Дальнем Востоке для пищевых целей используются 20 - 25 ягодных видов. Даже при слабом освоении ресурсов почти повсеместно объем сбора дикорастущих ягод больше, чем культурных [10, 11]. При этом видовой состав дикорастущих ягод гораздо разнообразнее, чем культурных. Имеется довольно обширная справочная база для ознакомления с общими характеристиками плодов и ягод.

Ареал распространения дикорастущих плодов и ягод – от юга Приморья до Крайнего Севера.

Брусника обыкновенная широко распространена по всему Дальнему Востоку (от Приморья на юге до Чукотки на севере). Максимальная урожайность ягод в продуктивных брусничниках в среднем составляет 1000 - 2000 кг / га, а в отдельных местах - 3000 - 8000 кг / га. Брусничники относятся к группе ягодников с устойчивым плодоношением и относительно частыми хорошими и обильными урожаями ягод. Биологический запас ягод брусники на Дальнем Востоке на ягодоносных площадях ориентировочно оценивается в 600 тыс. т. [10, 2].

Рябина бузинолистная растет на Камчатке, Анадыре, Командорах, Курилах, Сахалине, побережьях Охотского моря и Татарского пролива, в Нижнем Приамурье. Рябинники относятся к группе ягодников с устойчивым плодоношением и относительно частыми хорошими и обильными урожаями (240 - 600кг / га). Биологический запас ягод рябины (всех видов) на Дальнем Востоке ориентировочно оценивается в 9 тыс. т. Среднегодовой фактический сбор ее составляет 150 т.; степень освоения от возможного сбора на относительно доступной для освоения части территории составляет не более 12,5 % . Среднемноголетняя дата наступления массового созревания плодов приходится на 20 - 25 августа. Плоды обычно долго не осыпаются и остаются на кусте до поздней осени [13].

Черника пазушная встречается в низовьях Амура, на побережье Татарского пролива, Сахалине и Южных Курилах. Продуктивность ягод черники пазушной чаще характеризуется средними и высокими показателями - от 50 до 800 кг / га [13]. Биологический запас ягод черники на Дальнем Востоке ориентировочно оценивается в 30 тыс. т. Среднемноголетняя дата наступления начала массового созревания ягод приходится на 10 - 15 августа. Плоды долго не осыпаются и остаются на кустах до первых заморозков (до октября) [13].

Голубика распространена в северной и средней полосе европейской части СССР, в Сибири, на Кавказе, Дальнем Востоке, Урале, в тундре. Растет на торфяных болотах и в разреженных хвойных и лиственных лесах. Средний урожай около 140 кг с 1 га.

Клюква - биологический запас достигает 546,4 тыс. т., растет клюква на моховых и торфяных болотах почти во всех районах северной и средней полосы европейской части СССР, и Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке [13].

Имеются также сведения о свойствах и составе плодов и ягод, но, как правило, не систематизированные, что затрудняет оценку качества.

Лимонник китайский (Schizandra chinensis) относится к роду Schizandra семейства Schizandraceae, принадлежит к группе древянистых лиан [8]. В ягодах найдены лимонная (69,9 %), виннокаменная (2,8 %) и яблочная (27,45 %) кислоты, эфирные масла и моносахариды, в семенах – до 50,44 % масел, в том числе эфирных и сопутствующих веществ. Неочищенное жирное масло семян лимонника содержит до 13,8 % веществ, извлекающихся метиловым спиртом. К сопутствующим веществам относят хлорофилл, стерины, резинол, токоферол, свободные органические кислоты, эфирные соединения. Специфические для лимонника лигнаны схизандрин и его производные в семенах лимонника локализуются преимущественно в кожуре семян, а также в оболочке околоплодника, в соке плодов лигнаны не обнаружены [8, 7].

Из неорганических веществ в золе семян лимонника обнаружено 50 - 51 % окиси калия, 8 - 9 % окиси натрия, 9 % окиси магния, 10 - 11 % окиси кальция, 7 - 7,5 % фосфатов, 2,5 % силикатов и 10,2 % сульфатов, а также микроэлементы: никель – 0,001 - 0,01 % , медь – 0,001 - 0,1, марганец – 0,1 - 1, титан – 0,01 - 0,1, свинец - 0,001 - 0,01, барий – 0,001 - 0,01. Содержание микроэлементов зависит от содержания их в почве [2, 7].

Брусника обыкновенная (Vaccinium vitis - idaea) - в сухом веществе ягод (17 - 15 %) первое место занимают углеводы, второе – кислоты, другие веществ содержатся в меньших количествах. Из сахаров преобладают фруктоза и глюкоза, сахароза. Ягоды брусники содержат в среднем 1,8 % сырой клетчатки. Такое значительное количество клетчатки объясняется тем, что ягоды обычно анализируют вместе с семенами, которые богаты этим веществом. При влажности семян 5,97 % в них содержится 38,56 % клетчатки и безазотистых экстрактивных веществ. В созревших ягодах брусники содержится 0,8 % - 1,0 % пектиновых веществ (0,56 - 0,86 % растворимого пектина и 0,17 - 0,24 % протопектина). Специфическим веществом, определяющим основные фармакологические свойства брусники, является гликозид арбутин, его содержание в ягодах составляет 1,5 % и уменьшается в 3 - 4 раза в процессе созревания (до 0,29 - 0,38 % в спелых ягодах). Аналогично изменяется и содержание дубильных веществ (от 0,9 % до 0,4 - 0,6 % в спелых ягодах) [1, 10? 9].

Количество свободных кислот в пересчете на яблочную кислоту составляет 2,94 % от сырой массы и 0,06 % летучих кислот, перегоняющихся с водяным паром. Из органических кислот в ягодах брусники содержатся: лимонная, яблочная, винная, салициловая, борная, бензойная. Кислотность обуславливается главным образом яблочной (0,3 % на сырую массу) и лимонной кислотами (1,3 %) [1].

В бруснике находится бензойная кислота не только в свободном (0,054 - 0,144 %), но и в связанном состоянии – в виде глюкозида вакициниина (0,0342 - 0,1244 %). Она является антисептиком, сдерживающим процесс брожения в брусничном соке. Содержание бензойной кислоты в спелых ягодах составляет 0,05 - 0,20 % , в соке – 0,067 - 0,086 % , которое по мере созревания ягод увеличивается.

Из биологически активных веществ брусники наибольший интерес представляет группа полифенольных или Р - активных соединений (антоцианы, лейкоантоцианы, катехины), многие из которых обладают Р - витаминной активностью. Содержание Р - активных

соединений в бруснике составляет 0,3 - 0,6 % . В бруснике также найдены витамины группы В – 0,03 мг, витамин Е – 1,0 мг, провитамин А (каротин) – 0,05 - 0,10 мг.

В составе ягод брусники имеется небольшое количество минеральных веществ (0,26 - 0,35 % сырой массы): серебро – 0,016мг / кг, барий – 1,505, хром – 0,025, медь – 32,250, молибден – 0,020, никель – 0,065, свинец – 0,108, олово – 0,055, стронций – 1,118, титан – 0,245, вольфрам – 0,053, цинк – 0,159, железо – 11,17, кальций – 94,60, магний – 22,40, фосфор – 44,52мг / кг, калия – 0,43 - 0,61 % [13].

Количество азота в зеленых или начинающих созревать ягодах в 2 - 2,5 раза больше чем в созревших (0,45 - 0,77 %). Количество натрия в созревших ягодах – 17 - 40 мг, марганца – 70 - 83мг, бора – 0,12 - 0,36мг.

Черника пазушная - ценное эндемичное, пищевое, лекарственное и декоративное растение. Ягоды ароматные, кисловато - сладкие, слегка вяжущие. Представляют большой интерес для индивидуальных и промысловых заготовок. В ягодах черники содержатся углеводы (глюкоза, сахароза, пектин), органические кислоты (лимонная, молочная, щавелевая, яблочная, янтарная), витамины (С, РР, В), эфирное масло, фенолы и их производные (гидрохинон, полифенолы), катехины, фенолкарбоновые кислоты, дубильные вещества, флавоноиды, антоцианы, микроэлементы. Ягоды черники используют для лечебных целей как витаминное, вяжущее и антисептическое средство [12].

Шиповник содержит поливитаминный комплекс, с явным преобладанием аскорбиновой кислоты (витамина С), в некоторых видах шиповника содержание аскорбиновой кислоты может достигать 18 % , в среднем же ее 4 - 6 % , что до 10 раз больше, чем в смородине и до 50 раз больше, чем в лимоне. Помимо этого содержится рутин (витамин Р), витамины А, B_1, B_2, К, в семенах в большом количестве содержится токоферол (витамин Е).

Богаты плоды шиповника и другими не менее полезными соединениями, в них содержатся флавоноловые гликозиды кемпферол и кверцетин, макро - и микроэлементы (калий, железо, марганец, фосфор, кальций, магний, натрий, медь, марганец, хром, молибден, кобальт), органические кислоты (лимонная, яблочная и др.), сахара (их количество может доходить до 18 %), дубильные вещества, ликопин, рубиксантин, эфирное масло.

Боярышник содержит флаваноиды (до 3 %), органические кислоты (лимонная и виннокаменная), каротин (2 —11 и даже до 30 мг), витамин С (от 25 до 375 мг), холин, эфирное масло, фруктоза, красящие вещества, сорбит, жиры, ситостерины и дубильные вещества.

Голубика содержит белки, углеводы (глюкоза и фруктоза), калий, кальций, магний, фосфор, железо, 20 мг витамина С, до 550 мг вещества Р - витаминного действия, до 1,7 мг органических кислот (лимонная и яблочная), около 0,5 мг пектиновых веществ (в пересчете на 100 г съедобной части продукта).

В клюкве много различных микроэлементов, в первую очередь таких, как медь, марганец, кобальт, молибден и железо; до 4,7 % сахаров, до 0,7 % пектиновых веществ, до 3,5 % органических кислот (лимонная, бензойная и др.), до 30 мг витамина С и вещества Р - витаминного действия [13].

Таким образом, изучение литературных источников по ресурсам, химическому составу, пищевой ценности дикорастущего плодово - ягодного сырья показало их перспективность

для вовлечения в производство широкого ассортимента пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям рационального питания.

Как отмечалось выше, плодово - ягодные культуры являются ценным источником биологически активных веществ (полифенолов, флаваноидов, витаминов и др.). Каждый дикорастущий вид отличается своим уникальным химическим составом, на который большое влияние оказывают природные условия произрастания, климатические, географические и другие факторы [3, 4].

С целью упорядочения имеющейся информации, а также уточнения химического состава и свойств были проведены исследования, которые позволили более детально отразить показатели качества дикорастущих плодов и ягод, на примере самых популярных культур – брусники, лимонника, калины, черники, рябины, голубики, боярышника, и шиповника. Плоды и ягоды собирались в разных районах Хабаровского края: брусника, голубика, боярышник, черника и шиповник в Комсомольском - на - Амуре районе (с. Пивань); лимонник, рябина и калина в окрестностях Большехихцирского заповедника, Хабаровский район, шиповник – в Хабаровском районе (с. Бычиха и острова реки Амур в районе г. Хабаровска).

В таблице 1 дана характеристика плодов и ягод, которые являются основными объектами промысла и переработки в соковую и другую продукцию.

Таблица 1 – Органолептическая характеристика исследуемых образцов плодов и ягод дикорастущих растений

Исследуемые образцы		Форма	Цвет	Вкус и запах
1		2	3	4
Брусника обыкновенная		шаровидная, слегка приплюснутая 4 - гнездная ягода	красная ягода	вкус кисло - сладкий, вяжущий, свойственный
Черника пазушная		шаровидные, сморщенные ягоды, диаметром от 3 до 6 мм	с красноватым оттенком, мякоть красновато - фиолетовая	своеобразный, вкус кисло - сладкий, слегка вяжущий
Калина Саржента		сплюснутые, морщинистые, округлые плоды диаметром 0,5—1,5 см,	от оранжево - красного до темно - красного цвета	слабый запах, горьковато - кислый вкус
Лимонник китайский		ягоды слегка удлиненные, неправильнокруглые	ярко - красная окраска	кислый, со своеобразным лимонным привкусом и запахом
Шиповник обыкновенный	с. Бычиха	ягоды слегка удлиненные, неправильнокруглые, шаровидные и обратногрушевидные	оранжево - красный	кисло - сладкого вяжущего вкуса, запах слабый
	с. Пивань			
	о - ва р. Амур			

Рябина бузинолистная	ягодообразные, овально - округлые, в поперечнике 7 - 9 мм, блестящие	красновато - оранжевый, буровато - красный или желтовато - оранжевый	кисловато - горький, слабый, свойственный рябине
5Боярышник обыкновенный	ягодообразные, округлые	красновато - оранжевый,	кисло - сладкий вкус, запах слабый
Голубика	шаровидные ягоды, диаметром от 3 до 6 мм	фиолетовые с красноватым оттенком, мякоть красновато - фиолетовая	своеобразный, слабыйкисло - сладкий вкус, слегка вяжущий
Клюква	шаровидная, слегка приплюснутая 4 - гнездная ягода	красная ягода	сладкий, умеренно кислый, вяжущий

Плоды и ягоды после сбора подвергались сортировке от растительных примесей (частей растений, листьев и т.д.) и недоброкачественного сырья.

Исследованные образцы имели типичную форму, характерные для данного вида цвет, вкус и запах. Сырьё было доброкачественным, без признаков порчи, плесневелых, зараженных плодов. Все плоды соответствовали потребительской спелости.

Результаты исследования химического состава плодов и ягод приведены в таблице 2, 3. Нормативными документами не нормируются показатели, характеризующие химический состав, так как на них оказывают сильное влияние климат, место произрастания, погодные условия и т.д. Тем не менее, эти показатели крайне важны для расчета рецептур и технологических процессов. Определяли массовую долю титруемых кислот (в пересчёте на яблочную кислоту, как преобладающую), дубильных и красящих веществ, а также витамина С. Результаты сравнивались со справочными для установления отличия / схожести объектов произрастающих на Дальнем Востоке с усредненными данными [15].

Таблица 2 – Химический состав плодов и ягод дикорастущих растений

Исследуемые образцы		Массовая доля, %			Витамин С мг / 100г
		кислот (в пересчете на яблочную кислоту)	дубильных и красящих веществ	пищевых волокон	
Брусника обыкновенная	справ	2,94	6 - 9	2,5	15,0
	факт.	2,7±0,3	7,3±0,2	2,4±0,3	16,5±0,3
Черника пазушная	справ	2,6	7	3,1	10,0
	факт.	2,55±0,1	5,4±0,3	2,9±0,3	9,8±0,2
Калина Саржента	справ	3,0	4 - 8	3,5	14,5
	факт.	2,9±0,2	5,1±0,1	3,3±0,1	13,8±0,3
Лимонник	справ	3,5	3 - 5	4,2	10

китайский		факт.	3,4±0,1	3,2±0,3	4,1±0,3	9,8±0,1
Шипов ник обыкно венный	с. Бычиха	справ	2,0	4 - 6	10,6	650,0
		факт.	1,85±0,3	5,8±0,3	8,6±0,3	540,6±3
	с. Пивань	факт.	1,7±0,1	5,3±0,1	7,9±0,3	578,0±3
	о - ва р. Амур	факт.	1,9±0,3	4,9±0,2	9,3±0,1	596,5±4
Рябина бузинолистная		справ	3,0	5 - 7	3,8	18,5
		факт.	2,8±0,1	5,3±0,3	3,6±0,3	17,3±0,3
Боярышник обыкновенный		справ	2,0	5 - 6	11,6	350,0
		факт.	1,75±0,2	5,6±0,1	8,4±0,3	248,6±4
Голубика		справ	2,5	7,1	3,7	12,0
		факт.	2,4±0,1	5,7±0,2	2,6±0,1	9,7±0,3
Клюква		справ	2,8	7 - 9	2,5	14,0
		факт.	2,7±0,1	7,9±0,3	2,2±0,1	15,5±0,3

Полученные результаты исследований в целом согласуются со справочными [15] и литературными данными. Все исследованные ягоды и плоды являются ценным источником дубильных веществ (3,2 - 7,3 %) и пищевых волокон (2,5 - 10,6 %). Кислотность ягод и плодов колеблется в пределах от 1,7 % (шиповник) до 3,5 % (лимонник).

Таблица 3 – Пищевая ценность плодов и ягод дикорастущих растений

Исследуемые образцы			Массовая доля, %				Энергетическая ценность, ккал / 100г
			углеводов	белков	жиров	золы общей	
Брусника обыкновенная		справ	12	0,7	0,5	не более 5	55,3
		факт.	11,5±0,3	0,6±0,1	0,5±0,2	4,6±0.1	52,9
Черника пазушная		справ	5 - 20	1,5	0,6	не более 3	31,4 - 91,4
		факт.	19±0,1	1,3±0,2	0,3±0,1	3,0±0,1	83,9
Калина Саржента		справ	13	1,9	0,4	не более 5	63,2
		факт.	10,7±0,2	1,6±0,3	0,4±0,1	2,3±0,2	48,8
Лимонник китайский		справ	3 - 5	1,6	0,4	не более 5	88,4
		факт.	3,2±0,3	1,3±0,1	0,3±0,1	3,8±0,1	81,9
Шиповник	с. Бычиха	справ	22,4	1,6	0,7	не более 5	102,3

обыкновенный		факт.	19,9±0,3	1,5±0,1	0,6±0,2	3,1±0,1	91,0
	с. Пивань	факт.	20,6±0,3	1,6±0,2	0,6±0,1	3,8±0,1	94,2
	о - ва р. Амур	факт.	23,0±0,2	1,6±0,3	0,6±0,1	1,6±0,05	103,8
Рябина бузинолистная		справ	22,4	1,6	0,7	не более 5	81,7
		факт.	19,9±0,3	1,5±0,1	0,6±0,2	3,1±0,1	74,0
Боярышник обыкновенный		справ	20,6±0,3	1,6±0,2	0,6±0,1	3,8±0,1	97,0
		факт.	23,0±0,2	1,6±0,3	0,6±0,1	1,6±0,05	88,9
Голубика		справ	15 - 20	1,6	0,7	не более 3	72,7 - 92,7
		факт.	18±0,3	1,3±0,1	0,4±0,2	3,0±0,1	80,8
Клюква		справ	13	0,8	0,5	не более 5	59,7
		факт.	12,5±0,1	0,7±0,2	0,6±0,1	4,6±0,3	58,2

Следует отметить явную неоднородность по химическому составу (что ярко выражено у плодов шиповника), причиной является влияние климата и погодных условия даже в пределах одного географического региона, не смотря на то, что все ягоды и плоды собирались на территориях, прилагающих к реке Амур и впадающих рек.

При выборе сырья при производстве функциональных пищевых продуктов исходят из конкретных особенностей их химического состава. В частности, привлекательными свойствами шиповника и боярышника является высокое содержание витамина С и пищевых волокон, лимонник обладает ярко выраженными органолептическим характеристиками. Это позволяет составлять композиции благоприятные для получения широкого ассортимента напитков и пищевых продуктов с учетом разнообразных потребностей населения.

Так как ягоды и плоды используются для получения соков и других напитков путем механического воздействия (прессования) целесообразным было изучить морфологическое строение и состав плодов и ягод (таблица 4) и определить степень перехода отдельных компонентов в основной продукт и во вторичное сырьё.

Таблица 4 –Морфологический состав плодов и ягод, %

Наименование плода / ягоды	Мякоть	Косточки / семена	Кожица / оболочка
Брусника обыкновенная	93,2±0,3	2,5±0,1	5,5±0,1
Черника пазушная	87,5±0,3	2,7±0,2	6,7±0,2
Калина Саржента	83,4±0,5	6,5±0,2	6,3±0,2
Лимонник китайский	89,9±0,4	7,5±0,2	5,9±0,1
Шиповник обыкновенный	79,1±0,2	15,5±0,3	8,5±0,1
Рябина бузинолистная	87,6±0,3	7, 7±0,2	5,5±0,2

Боярышник обыкновенный	80,2±0,3	15,3±0,2	8,1±0,1
Голубика	87,5±0,2	5,8±0,1	6,5±0,3
Клюква	93,4±0,4	6,0±0,3	5, 7±0,1

Полученные результаты исследований морфологического состава дикорастущих плодов и ягод согласуются с литературными данными.

Нами было установлено, что ягоды и плоды имеют следующий состав: мякоть – 79 - 93 % от общей массы ягоды, косточки / семена – 16 - 2,5 % и кожица – 5,5 - 8,5 % , при массовой доле влаги от 73 до 88 % .

Учитывая особенности экономики дальневосточного региона и развития отдельных отраслей промышленности, при переработке плодов и ягод можно выделить два основных направления – производство десертных продуктов (варенье, желе, джемы и др.) и переработка на соковую продукцию, сиропы, экстракты и т.д.

При производстве соков и сиропов в процессе прессования плодов и ягод мякоть и часть клеточного сока кожицы переходит в соковую продукцию, а около 85 % содержимого оболочки остается в выжимках. Это в основном пищевые волокна, минеральные вещества, витамины и полифенолы. Далее выжимки можно использовать в процессе экстрагирования для извлечения биологически активных и минеральных веществ или в других способах переработки.

Образцы плодово - ягодных выжимок были подвергнуты анализу на содержание биологически активных веществ: суммы фенольных соединений, дубильных (окисляемых) веществ, флавоноидов и антоцианов. Сумму фенольных соединений и флавоноидов определяли по стандартизированным методикам.

Результаты исследования содержания биологически активных веществ (флаваноидов, суммы дульных веществ, полифенольных соединений и антоцианов) на примере трех образцов выжимок (калины, брусники и лимонника) в виде различных спектров приведены на рисунке 1 - 6.

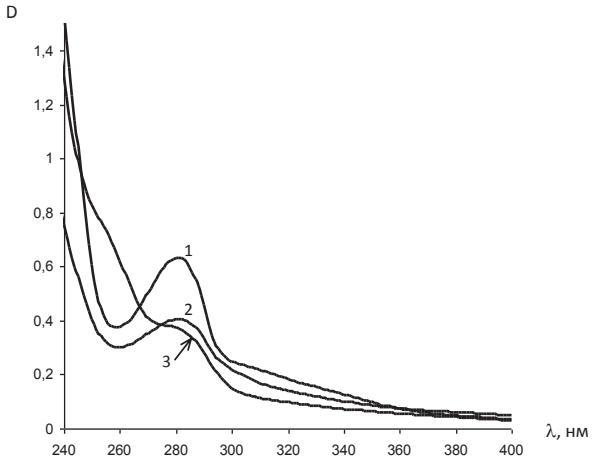


Рисунок 1 – УФ - спектры растворов образцов сырья на 70 % спирте этиловом:
1 – выжимки калины, 2 – выжимки брусники, 3 – выжимки лимонника

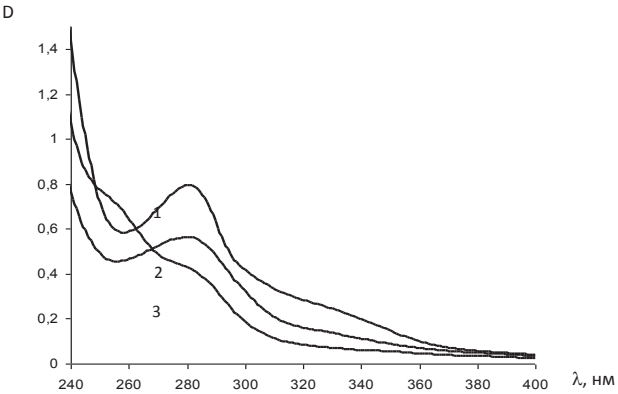


Рисунок 2 – УФ - спектры растворов жидких образцов на 70 % спирте:
1 – выжимки калины, 2 – выжимки брусники, 3 – выжимки лимонника

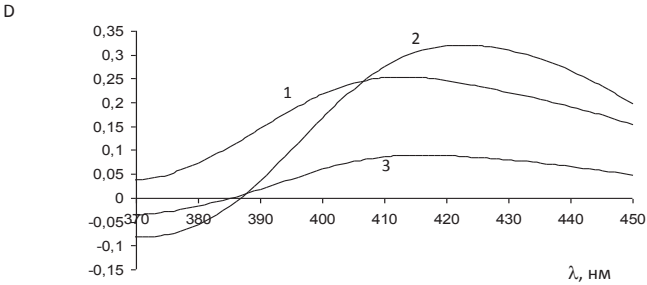


Рисунок 3 – Дифференциальные спектры поглощения растворов на 70 % спирте этиловом из сухих образцов с алюминия хлоридом: 1 – выжимки калины, 2 – выжимки брусники, 3 – выжимки лимонника

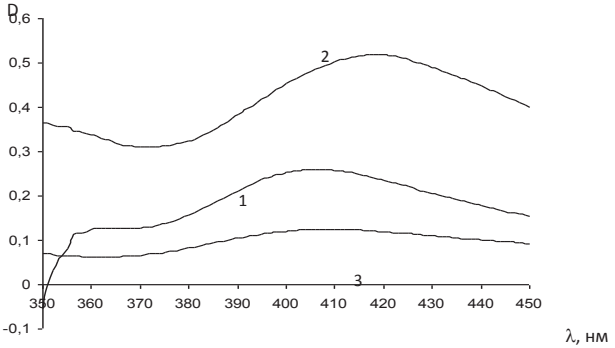


Рисунок 4 – Дифференциальные спектры поглощения растворов на 70 % спирте этиловом жидких образцов с алюминия хлоридом: 1 – выжимки калины, 2 – выжимки брусники, 3 – выжимки лимонника

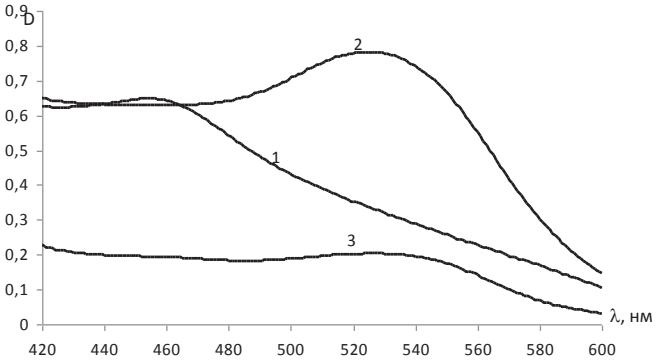


Рисунок 5 – Спектры поглощения растворов образцов сырья в 1 % растворе кислоты хлористоводородной на 70 % спирте этиловом в видимой области (в области поглощения антоцианов): 1 – выжимки калины, 2 – выжимки брусники, 3 – выжимки лимонника

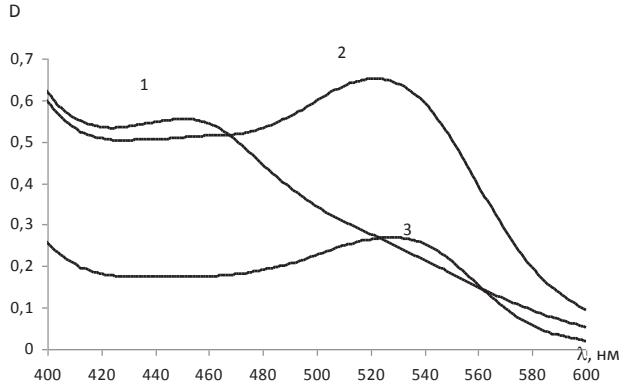


Рис. 6. Спектры поглощения жидких образцов в 1 % растворе кислоты хлористоводородной на 70 % спирте этиловом в видимой области (в области поглощения антоцианов): 1 – выжимки калины, 2 – выжимки брусники, 3 – выжимки лимонника

Флавоноиды в бруснике, согласно полученным дифференциальным спектрам (рис. 3, 4), определяли в пересчете на кверцетин, так как максимум поглощения кверцетина практически совпадает с максимумом поглощения исследованных проб. Однако для сопоставления данных по всем образцам необходимо иметь показатели, полученные при пересчете на один и тот же стандартный образец. Кроме того, рутин более принят в аналитических методиках в качестве стандартного образца. Использование рутина в данном случае вполне допустимо. Далее приведены данные в пересчете как на рутин, так и на кверцетин.

Несмотря на отсутствие данных по содержанию флавоноидов в плодах лимонника [2, 8], тем не менее, был получен спектр экстракта лимонника с комплексообразователем алюминия хлоридом, в котором обнаружена полоса поглощения при 411 нм. В связи с

этим, было рассчитано содержание веществ фенольной природы (в пересчете на рутин), поглощающих в данной области.

Проведенные исследования позволили получить достаточные сведения о содержании основных питательных и биологически ценных веществ в плодово - ягодных выжимках (таблица 5), полученных после прямого прессования при производстве сока. Плоды шиповника не подвергаются прессованию, учитывая особенности анатомо - морфологического строения и химического состава. Они подвергаются сушке, как одному из способов консервирования и в последующем дальнейшей переработке.

При высушивании важно соблюдать температурные режимы для наибольшей сохраняемости компонентов. Следует отметить высокое содержание белков и жиров, что нехарактерно для свежих ягод и плодов, но это объясняется содержанием семян в выжимках. В дальнейшей переработке (например, экстракции) они могут и не участвовать.

Дикорастущие плоды и ягоды по качественному и количественному содержанию танинов, или дубильных веществ, не уступают даже чаям. Танины плодов представлены преимущественно катехинами, среднее содержание которых в плодах достигает 4,6 % в шиповнике, 2,7 % в лимоннике, 4,2 % в бруснике, 3 % в калине.

Таблица 5 – Содержание биологически активных веществ и показатели качества плодово - ягодных выжимок, %

Наименование показателя	Выжимки			Плоды шиповника
	брусники	калины	лимонника	
Массовая доля влаги	12,8±0,3	14±0,1	11,4±0,3	13,2±0,1
Массовая доля органических кислот	2,7±0,3	2,9±0,2	3,4±0,1	1,9±0,3
Массовая доля углеводов	73,6±0,3	68,48±0,2	20,48±0,3	55,2±0,2
Массовая доля белков	3,84±0,1	10,24±0,3	8,32±0,1	10,24±0,3
Массовая доля жиров	3,2±0,2	2,56±0,1	1,92±0,1	3,84±0,1
Массовая доля золы общей	4,6±0,1	2,3±0,2	3,8±0,1	1,6±0,1
Витамин С, мг	39,8	46,8	57,7	547,7
β - каротин, мг	0,28	-	-	17,2
Сумма флаваноидов (в пересчете на рутин), %	0,68 ± 0,02	0,62 ± 0,04	0,22* ± 0,01	0,79±0,1
Сумма дубильных веществ, %	2,00 ± 0,01	5,71 ± 0,02	1,24 ± 0,01	5,8±0,1
Сумма фенольных соединений, %	11,3 ± 1,02	17,67±1,24	10,11± 0,95	13,48±0,2
Сумма антоцианов, %	0,320 ± 0,014	-	0,082 ± 0,004	0,76±0,1

По показателям безопасности выжимки и плоды плодово - ягодного дикорастущего сырья соответствовали требованиям ТР ТС 021 / 2011 (таблица 6) [14]. По микробиологическим показателям отклонений также не выявлено.

Таким образом, проведенные исследования, показали целесообразность использования плодово - ягодных выжимок для обогащения пищевых продуктов биологически активными веществами.

Таблица 6 – Содержание токсичных элементов в плодово - ягодном сырье

Показатель	Плоды шиповника	Выжимки брусники	Выжимки калины	Выжимки лимонника	Требования ТР ТС 021 / 2011, не более
Тяжелые элементы, мг / кг					
Свинец	0,009	0,0235	0,01	0,048	0,5
Кадмий	0,01	0,013	0,011	0,012	0,05
Ртуть	0,001	0,012	0,009	0,011	0,02
Мышьяк	0,013	0,014	0,016	0,015	1,0
Микотоксины (патулин)	не обнар.	не обнар.	не обнар.	не обнар.	0,05
Активность радионуклидов, Бк / кг:					
Cs - 137	1,12	2,95	0,92	1,72	120
Sr - 90	0	0	6,41	7,42	40
Остаточное содержание суммы пестицидов, мг / кг:					
изомеров ГХЦГ	0,0009	0,0011	0,0051	0,0021	0,5
ДДТ и его метаболитов	не обнар.	не обнар.	0,00009	0,0001	0,01

В целом, проведенные исследования позволили охарактеризовать плодово - ягодное сырье с точки зрения химического состава, дать подробную товароведную характеристику, а также рекомендовать сырьё к использованию в производстве функциональных пищевых продуктов. Также объектом внимания могут быть и другие виды плодов и ягод эндемичные на Дальнем Востоке, например актинидия коломикта, которая обладает оригинальными органолептическим характеристиками и уникальным химическим составом.

Список использованной литературы:

1. Brown, E., Gill, C., Stewart, D., McDougall, G. Lingonberries (Vaccinium vitis - idaea L) and blueberries (Vaccinium corymbosum) contain discrete epicatechin anthocyanin derivatives linked by ethyl bridges // Journal of Berry Research – 2016 – vol. 6 – no.1 – P. 13 - 23.

2. Panossian, A., Wilkman, G.Pharmacology of Schisandra chinensis Bail.: An overview of Russian research and uses in medicine // Journal of Ethnophamacology – Vol. 118, Issue 2, 23 July 2008, - P. 183 - 212.

3. Алешков, А.В., Жебо, А.В., Окара, А.И,, Земляк К.Г. Дикорастущие растения и продукты вторичной переработки – новые сырьевые источники на Дальнем Востоке (тезисы на англ. языке) Северо - Восточный азиатский академический форум (North - East Asia Acadevic Forum. _ – 2011. – С. 75 - 76.

4. Алешков, А.В., Жебо, А.В., Окара, А.И,, Земляк К.Г. Повышение качества продовольствия за счёт дальневосточных дикоросов и побочных продуктов пищевых производств (научная статья) (Materialy VIII mezinarodnivedecko - praktika conference “Dny vedy - 2012”. - Dil 79. Zemedelstvi: Praha.Publishing House “Education and Science” s.r.o. – s. 74 - 77.).

5. Государственная фармакопея СССР. 11 - е изд. М., 1987. Вып. 1. – 333 с. : М., 1990. Вып. 2. – 398 с.

6. Жебо, А.В., Окара, А. И. Напитки функционального назначения из дикорастущих плодов и ягод на основе молочной сыворотки: технология и потребительские свойства (научная статья) Товаровед продовольственных товаров. – 2013. - №8. – С. 51 - 54.

7. Зеленков, В. Н., Колбасина, Э. И. Содержание макро - и микроэлементов в лимоннике китайском Schisandra Chimensis (turcz) baill // Нетрадиционное использование плодово - ягодных растений (г. Киев). – 2001. – вып. 6. – С. 173 - 176.

8. Куркин, В.А. Лимонник китайский: итоги и перспективы создания лекарственных средств: монография / В.А. Куркин, Ф.Ш. Сатдарова. - Самара: ООО «Офорт»; ГОУ ВПО «СамГМУ Росздрава», 2010 – 193 с.

9. Лупандин, А. В., Лапаев, И. И. Лимонник. – Хабаровск : Кн.Изд, 1981. – 181 с.

10. Нечаев, А.А. Дикорастущие съедобные ягодные растения Хабаровского края: видовое разнообразие, ресурсы, освоение // Лесной вестник – 2014. – №4. – С. 84 - 91.

11. Нечаев, А.А. Продуктивность и освоение некоторых дикорастущих ягодных и лекарственных растений Дальнего Востока : метод. рекомендации. – Хабаровск : ФГУ "ДальПИИЛХ", 2005 – 38 с.

12. Растительные ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование; Семейства Magnoliaceae - Limoniaceae – Л.: Наука, 1984. – С. 14 - 15.

13. Сухомиров Г. И. Таёжное природопользование на Дальнем Востоке / Г. И. Сухомиров . – Хабаровск : РИОТИП, 2007 – 384 с.

14. ТР ТС 021 / 2011 Технический регламента таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» введ. 01.07.2013г.

15. Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник / Под ред.член - корр. МАИ, проф. И. М. Скурихина и академика РАМН, проф. В. А. Тутельяна. М.: ДеЛипринт, 2002. – 236 с.

© А.В. Жебо, 2017

УДК 62

Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Жумашев К.Ж., Мусина А.Е.
к.х.н.; к.т.н.; д.т.н.
Химико - металлургический институт им. Ж. Абишева
г. Караганда, Республика Казахстан

ОКИСЛИТЕЛЬНО - ХЛОРИРУЮЩИЙ ОБЖИГ НИЗКОСОРТНЫХ МЕДНЫХ СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Аннотация.

Проведены многофакторные эксперименты по окислительно - хлорирующему обжигу гранулированных черновых медных сульфидных концентратов. Получены математические модели, которые использованы для определения оптимальных областей проведения обжига

и использованы для расчета кажущейся энергии активации методом Киссенгера. Установлены технологические режимы процесса сернокислотного выщелачивания обожженного серебросодержащего сульфидного концентрата. На основе частных функций получены математические модели, позволяющие определить оптимальные условия выщелачивания обожженного концентрата при широкой вариации.

Ключевые слова

гранулы, поверхностное натяжение, прочность, окислительно - хлорирующий обжиг, шахтная печь, многофакторная модель.

В настоящее время в сферу промышленного производства вовлекаются серебросодержащие материалы самых разнообразных типов. Далеко не из всех материалов серебро извлекается полно теми процессами, которые используются в современной промышленности. Особенно низко извлечение серебро из так называемых упорных руд, доля которых в добыче непрерывно возрастает.

Для Жезказганского региона восполнение сырьевой базы – важнейшая социально - экономическая проблема, т.к. сокращение объемов производства неизбежно приведет к потере рабочих мест. Так, во втором полугодии 2013 г. произошло закрытие действующих рудников. С этим появляется заинтересованность предприятий в переходе на переработку упорных забалансовых руд, в особенности с достаточно высоким содержанием серебра, которая по известным гидрометаллургическим схемам не дает высокого извлечения ценных компонентов в промпродукты.

К числу перспективных процессов, способных решить задачу полного и комплексного извлечения ценных компонентов, относится процесс хлорирующего обжига (спекания). Хлорирование осуществляется за счет добавления к обжигаемому материалу галита с целью полного хлорирования основных металлов, что исключает образование свободного хлора и сернистого ангидрида. Важным свойством галита при разработке технологии переработки минерального сырья является относительно меньшая его активность по отношению к компонентам пустой породы. Используя это свойство, можно обеспечить комплексное извлечение только ценных компонентов с одновременным их отделением от основной пустой массы сырья с регенерацией реагентов и тем самым значительно упростить всю технологию.

Для исследований использовали черновой концентрат, полученный путем переработки (методом флотации) забалансовой медной сульфидной руды Жезказганского месторождения (Карагандинская область, Казахстан), с содержанием класса - 74 мкм 70,4 % с насыпной массой 1,33 г / $см^3$. Химический состав концентрата представлен в таблице 1. Фазовый и минеральный составы чернового концентрата представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 1 – Содержание основных компонентов в черновом концентрате

Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %
Ag, г / т	87,2	SiO_2	60,68
Cu	4,73	Zn	0,75
Fe	5,46	K_2O	1,20
Mg	1,16	Al_2O_3	8,64
S	2,97	Ti	0,4
Na_2O	1,63	Pb	0,548

Таблица 2 – Результаты фазового анализа чернового концентрата на содержание форм меди

Найдено в % по меди	абс.	отн.
Сульфата	<0,2(<0,01)	
Карбонатов	<0,2(0,09)	2,3
Оксидов, силикатов	<0,2	
Вторичных сульфидов (ковеллин, халькозин, борнит)	4,1	86,68
Халькопирита	0,63	13,32
Суммарно	4,73	100,0

Таблица 3 - Минеральный состав сульфидного концентрата, %

$CuFeS_2$ (халькопирит)	Cu_5FeS_4 (борнит)	Cu_2S (халькозин)
1,87	1,58	3,70

Необходимым условием подготовки сырья к обжигу является гранулирование исходного материала. При этом большое значение имеет получение гранул, прочностные характеристики которых позволяют выдерживать нагрузки, возникающие при транспортировке и перегрузках, а также при переработке в обжиговой печи.

Для оценки прочности гранул использовали одну из известных моделей энергостохастической прочности (проф. В.П. Малышева) [1], которая основана на вероятностном характере разрушения под действием любых нагрузок (статических, ударных, термических). Вероятность разрушения связывается с долей разрушенного материала, а вероятность сохранности - с долей оставшегося целым. Предложены формулы для расчета статической и ударной прочности гранул:

$$P_c = 0{,}5^{\left(\frac{2m_G g}{\pi d \rho_c}\right)^6}, \; P_y = 0{,}5^{\left(\frac{2d\gamma gh}{\pi \rho_y}\right)^6},$$

где P_c, P_y – выход целых гранул, д.е.; h – высота падения гранулы, м; ρ_c, ρ_y – энергия поверхности разрушения гранулы при статической и ударной нагрузках, Дж / м^2, m_G – масса приложенного груза, кг; g – ускорение силы тяжести, м / с^2; d – диаметр гранулы, м.

Физическая сущность энергостохастической прочности непосредственно связывается с энергией вновь образованной поверхности разрушенного материала в размерности Дж / м^2, либо в тождественно равной ей силе поверхностного натяжения, Н / м. Этой энергии противопоставляется соответствующая энергия нагрузки, и их соотношением определяется увеличение или уменьшение выхода разрушенных или целых кусков.

Исследования по прочности гранулированного сульфидного медного чернового концентрата проводили с использованием в качестве связующего раствора хлорида натрия 3 % [2, 3]. Окатывание шихты концентрата с хлоридом натрия 10 % от массы (на 100 % медного концентрата) вели на лабораторном грануляторе с подачей связующего разбрызгиванием. Фракции гранул размером + 5 - 10 мм отсеивали на ситах.

Максимальная относительная убыль массы гранул (W_{105}), диаметром + 5 - 10 мм в процессе их сушки при 105 ^{0}C, которую проводили до прекращения изменения массы

гранул, составляет 9,8 % . Насыпная масса влажных гранул составила 1,135 г / $см^3$. Технологическая схема получения гранул приведена на рисунке 1.

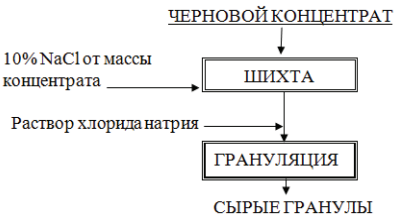


Рисунок 1 – Технологическая схема грануляции чернового концентрата

Для определения выхода целых гранул в каждом независимом опыте путем фиксирования нагрузки отбирали по 25 окатышей. Полученные результаты статической и динамической прочности для сырых гранул приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Зависимость выхода целых гранул от статической и динамической нагрузок

Масса груза, кг	P_c, д.е.	%	Высота падения, м	P_y, д.е.	%
2,845	0,90	90	5	0,92	92
4,603	0,72	72	6	0,86	86
4,042	0,65	65	7	0,82	82
5,192	0,30	30	8	0,58	58

На основании данных таблицы 4 были определены энергетические показатели прочности при статической и динамической нагрузках, ρ_c и ρ_y. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты опытов по определению эффективного поверхностного натяжения ρ_c и ρ_y Н / м, или энергии поверхности разрушения, Дж / $м^2$ с использованием для окатывания гранул раствора галита

m_G, кг	2,845	4,003	4,0042	5,192	Среднее
ρ_c, Дж / $м^2$	2432,6	3211,9	2733,1	2958,0	2833,9
h, м	5	6	7	8	Среднее
ρ_y, Дж / $м^2$	504,5	548,5	611,3	590,4	563,7

Известно, что поваренная соль является хорошим поглотителем влаги, и при резком нагревании влажная соль растрескивается, поэтому снижение ее содержания в шихте должно привести к уменьшению растрескивания гранул при обжиге.

После проведения экспериментов по статической и динамической прочности, полученные энергетические характеристики ρ_c и ρ_y, обрабатывали на зависимости от массы груза или высоты падения гранул для получения математических моделей статической и

ударной прочности гранул по методу [1] с определением допустимой высоты слоя окатышей в обжиговой печи.

Допустимую высоту слоя гранул при загрузке бункера, контейнера, на транспортерные ленты и т.п. при заданной (необходимой) степени сохранности, т.е. при определенном значении P_y можно обосновать с учетом их размера при допустимом содержании мелочи перед загрузкой в шахтную обжиговую печь. В промышленных условиях высота бункеров может доходить до 6 и более метров.

В нашем случае необходимо проанализировать сохранность гранул различного размера, образующихся в промышленных грануляторах, при загрузке и хранении в бункерах и конвейерных перегрузках на малых высотах.

Сохранность гранул от статической нагрузки в расчетном варианте примет вид

$$P_c = 0{,}5^{\left(\frac{2d\gamma g h_c}{\pi p_c}\right)^6} = 0{,}5^{\left(\frac{2d\,11359{,}807 h_c}{\pi \cdot 28339}\right)^6} = 0{,}5^{(2{,}5018 d h_c)^6} \quad (1)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Зависимость сохранности влажных гранул из медной шихты с использованием в качестве связующего раствора галита от их диаметра и высоты слоя по формуле (1) с переводом в %

d, м	P_c (%) при h_c, м									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,003	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100
0,004	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100
0,005	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100
0,006	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100
0,007	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100
0,008	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100
0,009	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	99,99
0,010	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	99,99	99,98
0,011	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	99,99	99,98	99,97
0,012	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	99,99	99,99	99,97	99,95
0,013	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	99,99	99,98	99,96	99,92
0,014	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	99,98	99,97	99,93	99,87
0,015	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	99,98	99,95	99,9	99,81
0,016	100,0	100,0	100,0	100,0	100	99,99	99,97	99,93	99,85	99,72
0,017	100,0	100,0	100,0	100,0	100	99,98	99,95	99,89	99,78	99,59
0,018	100,0	100,0	100,0	100,0	100	99,97	99,93	99,85	99,69	99,42
0,019	100,0	100,0	100,0	100,0	100	99,96	99,91	99,79	99,58	99,2
0,020	100,0	100,0	100,0	100,0	100	99,95	99,87	99,72	99,42	98,92
0,021	100,0	100,0	100,0	100,0	99,99	99,93	99,83	99,62	99,23	98,55
0,022	100,0	100,0	100,0	100,0	99,99	99,91	99,77	99,5	98,98	98,09
0,023	100,0	100,0	100,0	100,0	99,99	99,88	99,7	99,34	98,67	97,52
0,024	100,0	100,0	100,0	100,0	99,99	99,85	99,62	99,15	98,29	96,8
0,025	100,0	100,0	100,0	100,0	99,98	99,81	99,51	98,92	97,82	95,94

По данным таблицы 6 видно, что статическую нагрузку выдерживают гранулы в бункере глубиной 10 м, только крупные гранулы диаметром 23 - 25 мм в нижнем слое разрушатся на 4 % .

Для динамической прочности в расчетном варианте формула примет вид

$$P_y = 0{,}5^{\left(\frac{2d\gamma gh}{\pi\varphi_y}\right)^6} = 0{,}5^{\left(\frac{2d11359{,}807h}{\pi\cdot 563{,}7}\right)^6} = 0{,}5^{(12{,}58dh)^6} \quad (2)$$

Результаты расчета приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Зависимость ударной прочности влажных гранул с использованием в качестве связующего раствора галита от их диаметра и высоты падения по формуле (2) с переводом в % . Выделены области сохранности каждой фракции более чем на 90 %

d, м	P_y (%) при h, м									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,003	100,0	100	100	100	100	99,99	99,98	99,95	99,89	99,8
0,004	100,0	100	100	100	99,98	99,95	99,87	99,71	99,4	98,88
0,005	100,0	100	100	99,98	99,93	99,8	99,5	98,88	97,75	95,8
0,006	100,0	100	99,99	99,95	99,8	99,4	98,51	96,7	93,42	87,98
0,007	100,0	100	99,98	99,87	99,5	98,51	96,27	91,89	84,24	72,41
0,008	100,0	100	99,95	99,71	98,88	96,7	91,89	82,82	68,23	48,71
0,009	100,0	99,99	99,89	99,4	97,75	93,42	84,24	68,23	46,08	23,27
0,010	100,0	99,98	99,8	98,88	95,8	87,98	72,41	48,71	23,27	6,433
0,011	100,0	99,97	99,65	98,03	92,69	79,71	56,45	27,97	7,554	0,00
0,012	100,0	99,95	99,4	96,7	87,98	68,23	38,14	11,68	1,286	0,00
0,013	100,0	99,92	99,04	94,72	81,31	53,91	21,05	3,107	0,00	0,00
0,014	100,0	99,87	98,51	91,89	72,41	38,14	8,8	0,00	0,00	0,00
0,015	100,0	99,8	97,75	87,98	61,37	23,27	2,53	0,00	0,00	0,00
0,016	100,0	99,71	96,7	82,82	48,71	11,68	0,00	0,00	0,00	0,00
0,017	100,0	99,58	95,29	76,24	35,53	4,551	0,00	0,00	0,00	0,00
0,018	100,0	99,4	93,42	68,23	23,27	1,286	0,00	0,00	0,00	0,00
0,019	100,0	99,18	91,02	58,94	13,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,020	100,0	98,88	87,98	48,71	6,433	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,021	100,0	98,51	84,24	38,14	2,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,022	100,0	98,03	79,71	27,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,023	100,0	97,43	74,37	18,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,024	100,0	96,7	68,23	11,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,025	100,0	95,8	61,37	6,433	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Эти данные (таблица 7) свидетельствуют о наилучших условиях гранулирования шихтования концентрата с галитом, благодаря которому снижается расход реагента, а вместе с этим и расход тепла на его нагревание при обжиге, увеличивается вместимость

шихты в обжиговый аппарат. При этом качество гранул по размерам, прочности и влажности не ухудшается.

Из практики работы печей с фильтрующим слоем известно, что нормальная газопроницаемость слоя будет обеспечиваться при содержании разрушенных до пылевидного состояния гранул не более 10 % , т.е. при сохранности целых гранул на 90 % и более. Если известен фракционный состав загружаемого в печь материала, то можно с помощью данных таблицы 7 определить для каждой высоты падения насколько соблюдается это условие по формуле для любой средневзвешенной величины [1].

Для предварительной оценки среднего выхода целых гранул при содержании всех одинаковых долей фракций, т.е. $\alpha_i = 1 / n$ и $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$ использовали формулу [1]:

$$P_{ср} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} P_i \,. \quad (3)$$

Результаты расчета по этой формуле среднего выхода целых гранул для широкой фракции 4 - 20 мм (n = 25) по данным таблицы 7 представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты расчета допустимой высоты падения гранул диаметром 4 - 20 мм в емкости

h, м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{ср}$, %	100,0	99,5	95,2	81,3	65,3	54,1	46,1	40,1	35,4	31,7

В этом случае использовать емкости (бункера, контейнеры и т.п.) глубиной более 3 м будет нецелесообразно.

Если ограничить верхний размер диаметром 12 мм, то в том же приближении будут получены следующие результаты (для n = 12) (таблица 9).

Таблица 9 - Результаты расчета допустимой высоты падения гранул диаметром 4 - 12 мм в емкости

h, м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{ср}$, %	100,0	100,0	99,9	99,6	98,5	95,7	90,3	82,3	73,7	66,0

Здесь допустимой высотой падения гранул оказывается 6 м, что вполне приемлемо для промышленных условий технологической транспортировки и хранения гранул.

Таким образом, гранулы, полученные из шихты чернового медного сульфидного концентрата и хлорида натрия (галита) по своей прочности пригодны для переработки в шахтной печи в виде фракции 4 - 12 мм.

В работах [4 - 7] практическое осуществление низкотемпературного окислительно - хлорирующего обжига рассмотрено на сульфидных медных концентратах с добавлением NaCl и KCl в муфельных печах или во вращающихся трубчатых печах на дисперсной шихте.

Известно, что технология обжига медных сульфидных концентратов в смеси с хлоридом натрия (галит) идет в присутствии кислорода воздуха с выделением тепла и частичным переходом серы из сульфида железа (пирита) в газовую фазу в виде

сернистого ангидрида [4]. Поэтому для ее проведения требуется обеспечить контакт частиц концентрата с галитом и доступ кислорода при непрерывном движении смеси.

Новые возможности для работы всех современных обжиговых печей предоставляет окатывание шихты с получением гранулированного материала, в котором частицы шихты находятся в наилучшем контакте в составе каждой гранулы. Однако размер гранул, выходящих из промышленных грануляторов, отличается широкой фракцией от 2 - 3 до 18 - 20 мм. В трубчатых печах такие гранулы частично разрушаются при пересыпании, как в мельницах при этом самоизмельчение и пылеунос остаются на том же уровне. В печах КС тонкие фракции гранул выносятся с газовым потоком, а крупные оседают на подине газораспределительной решетки, приводя к необходимости ее чистки. Кроме того, гранулы среднего класса растрескиваются с образованием до 30 - 40 % мелких осколков и они выносятся из печи с отходящими газами. Поэтому наилучшими обжиговыми аппаратами для гранулированных материалов являются шахтные печи. В них гранулированный материал находится в состоянии плотного слоя, через который подаваемый газ (воздух) фильтруется и обеспечивает наибольшую скорость химических реакций и наиболее полный теплообмен материала с газом. Слой опускается в шахте только под действием силы тяжести за счет работы узла разгрузки по шахте в виде тарельчатого или лоткового питателя. В наиболее известной конструкции шахтной печи воздух или топочные газы подаются через боковые фурмы.

В работах [8, 9] предложена шахтная печь с каскадом наклонных решеток, по которым материал пересыпается с одной на другую, меняя направление и тем самым перемешиваясь по всей поверхности решеток, а газы подводятся через беспровальные распределительные решетки специальной конструкции. При этом распределение температуры в слое характеризуется ее максимумом. С этой целью проведено изучение перегрева шихты за счет химических реакций при хлорирующем обжиге чернового медносульфидного концентрата и для выбора обжигового агрегата с обеспечением допустимых экзотермических температурных условий хлорирования концентрата.

Процесс обжига идет в присутствии кислорода воздуха в два этапа.

В первую очередь происходит хлорирование меди, серебра и железа по реакциям обмена, которые протекают с поглощением тепла:

$Cu_2S_т + 2NaCl_т = 2CuCl_ж + Na_2S_т$, (4)

$Ag_2S_т + 2NaCl_т = 2AgCl_т + Na_2S_т$, (5)

$FeS_т + 2NaCl_т = FeCl_{2т} + Na_2S_т$. (6)

Образующийся при хлорировании сульфид натрия в присутствии кислорода окисляется с выделением тепла до сульфата натрия по реакции:

$Na_2S_т + 2O_{2г} = Na_2SO_{4т}$. (7)

Суммарно хлорирование происходит по следующим реакциям (с выделением тепла):

$Cu_2S_т + 2NaCl_т + 2O_{2г} = 2CuCl_ж + Na_2SO_{4т}$, (8)

$Ag_2S_т + 2NaCl_т + 2O_{2г} = 2AgCl_т + Na_2SO_{4т}$, (9)

$FeS_т + 2NaCl_т + 2O_{2г} = FeCl_{2т} + Na_2SO_{4т}$. (10)

За счет того, что реакции хлорирования, происходящие в процессе обжига, идут с поглощением тепла, распределение температуры в зоне обжига происходит более равномерно. Суммарные реакции проходят с выделением тепла, но его количества недостаточно для обеспечения автогенности процесса, т.е. для ведения обжига требуется дополнительное количество энергии.

В процессе хлорирующего обжига помимо меди и железа металлов одновременно происходит хлорирование – серебра (Ag до AgCl), которое при последующем выщелачивании в избытке хлор - ионов (солянокислое или солевое выщелачивание) образует комплексные хлор - анионы, растворимые в воде. Таким образом, серебро вместе с медью переходит в раствор выщелачивания и извлекается из него посредством сорбции с последующим получением товарного продукта – металлического серебра.

Исследования проводили в шахтной электропечи, имеющей реактор из кварцевой трубки диаметром 40 мм. Вовнутрь реактора помещали корзинку с влажными гранулами, в середине слоя гранул и снизу корзины находились термопары. Воздух подавали с температурой от 370 до 500 ^{0}C. Рост температуры за счет выделения тепла химических реакций фиксировали по времени с одновременным определением максимально достигнутой температуры.

Прекращение эксперимента осуществлялось по мере снижения температуры навески до начальной заданной температуры воздуха. Эксперименты проводили путем последовательного изучения действующих факторов. Изучали влияние содержания серы в концентрате β_S, % (таблица 10); заданной температуры воздуха $t_в$, ^{0}C, размера гранул d, мм, расхода воздуха V, м / с, на экзотермичность процесса обжига в виде изменения температуры навески в процессе хлорирующего обжига с понижением ее до заданной температуры воздуха. Фиксировали зависимость температуры в объеме навески по продолжительности обжига при воздействии той или иной комбинации учитываемых факторов. Такие зависимости соответствуют кривым нагревания, регистрируемым при дифференциально - термическом анализе, но в данном случае для более крупной навески и при более широкой вариации условий обжига. Результаты экспериментов приведены на рисунке 2.

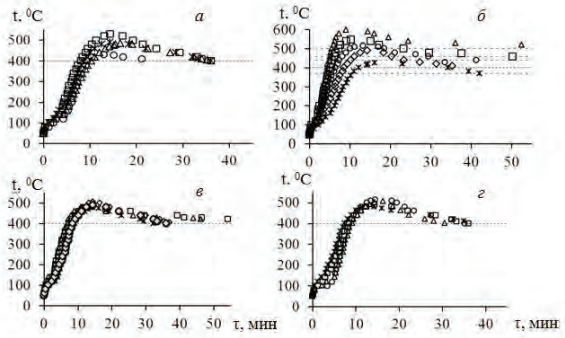
Таблица 10 - Содержание основных компонентов
в серебросодержащих сульфидных концентратах, %

Ag, г / т	Cu	S	Fe
14,2	0,8	1,0	5,04
30,5	3,91	2,95	4,69
87,2	4,73	2,97	5,46
91,0	5,38	4,87	7,82

По данным рисунка 2, температура пика больше всего зависит от заданной температуры воздуха (рис.2 б), и увеличение ее приводит к повышению максимальной температуры. Эти данные были использованы для определения энергии активации процесса по подобию с обработкой данных таких же неизотермических процессов, фиксируемых ДТА – анализом по методу Киссингера [10, 11]:

$$\frac{1}{T_m} = A - \frac{R}{E} \ln в,$$

где T_m – температура пика, ^{0}K; $в$ – скорость нагревания, град / сек; R– газовая постоянная; A – константа.



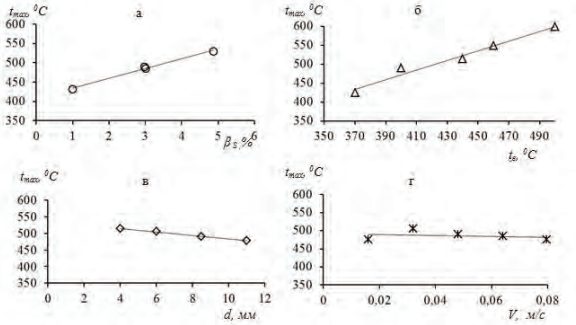
а – влияние содержания серы в концентрате; *б* – влияние заданной температуры воздуха ; *в* – влияние расхода воздуха при t = 400 ^{0}C и V = 0,048 м / с; *г* – влияние размера гранул; Штриховая линия – заданная температура воздуха.

Рисунок 2 – Влияние различных факторов на экзотермичность обжига гранулированного медного концентрата с галитом

Кажущаяся энергия активации составила 28,316 кДж / моль. Она свидетельствует о протекании процесса в диффузионном режиме и контролируется доступом кислорода воздуха вовнутрь гранулы.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рисунке 3. Из них следует, что наиболее сильно действующим факторами оказываются, как и следовало ожидать, содержание серы и заданная температура воздуха. Увеличение размера гранул также закономерно приводит к уменьшению температуры максимума, что согласуется с лимитированием процесса внутренней диффузией.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 11.



а – влияние содержания серы в концентрате; б – заданной температуры воздуха; в – размера гранул; г – расхода воздуха;

Рисунок 3 – Влияние различных факторов на максимальную температуру хлорирующего обжига гранулированного чернового серебросодержащего сульфидного концентрата с галитом

Таблица 11 – Коэффициент корреляции R и его значимость t_R для частных функций максимальной температуры хлорирующего обжига

Функции	R	Условие t_R>2
$t_{max} = 25{,}346\beta_S + 409{,}22$	0,9932	103,30>2
$t_{max} = 1{,}2723t_в - 36{,}172$	0,9818	47,11>2
$t_{max} = -5{,}363d + 536{,}56$	0,9986	490,80>2
$t_{max} = -124{,}52V + 491{,}97$	0,0634	0<2

Полученные уравнения для максимальной температуры окислительно - хлорирующего обжига с учетом значимых функций для описания совокупности действующих факторов [12, 13] обобщаются в виде их произведения с нормировкой по центральному экспериментальному значению 482,7 ^{0}C. Обобщенное уравнение примет вид

$$t_{max} = 4{,}293 \cdot 10^{-6}(25{,}346\beta_S + 409{,}22)(1{,}272t_{в.} - 36{,}172)(-5{,}363d + 536{,}56). \quad (11)$$

При сопоставлении результатов эксперимента и расчета получены значения коэффициента нелинейной множественной корреляции R и ее значимости t_R [14 - 15], которые составили R=0,9691 и t_R=52,76>2, что подтверждает адекватность описания данных эксперимента настоящим уравнением.

Полученное обобщенное уравнение позволяет выявить совместное влияние действующих факторов с помощью многофакторной номограммы (таблица 12, выделены опасные области по условию t_{max}>650 ^{0}C). При хлорирующем обжиге максимальная температура процесса ограничивается и по условиям спекания гранул при температуре более 700 ^{0}C [6, 7]. Как отмечено в работе [5] для достижения высокой степени хлорирования в присутствии минерализатора необходимо повышенные температуры, но при этом велика вероятность выбросов сернистых газов в атмосферу.

Таблица 12 - Многофакторная номограмма по влиянию на максимальную температуру хлорирующего обжига изученных действующих факторов с выделением опасных (курсив) и запретных (полужирных) режимов процесса

$t_в$, ^{0}C	d, мм	β_S,%								
		1	2	3	4	5	6	8	10	12
360		405,4	429	452,7	476,3	500	523,6	570,9	618,2	665,5
	6	397	420,1	443,3	466,4	489,6	512,7	559	605,3	651,6
	8	388,5	411,2	433,8	456,5	479,1	501,8	547,1	592,4	637,8
	10	380,1	402,2	424,4	446,6	468,7	490,9	535,2	579,6	623,9
	12	371,6	393,3	415	436,7	458,3	480	523,4	566,7	610,1
	14	363,2	384,4	405,5	426,7	447,9	469,1	511,5	553,8	596,2
380	4	429,8	454,9	480	505,1	530,1	555,2	605,3	655,5	**705,6**
	6	420,9	445,4	470	494,5	519,1	543,6	592,7	641,8	690,9
	8	411,9	436	460	484	508,1	532,1	580,1	628,2	676,2
	10	403	426,5	450	473,5	497	520,5	567,5	614,5	661,5
	12	394	417	440	463	486	509	554,9	600,9	646,8

	14	385,1	407,6	430	452,5	474,9	497,4	542,3	587,2	632,2
400	4	454,3	480,8	507,3	533,8	560,3	586,8	639,8	692,8	**745,8**
	6	444,8	470,8	496,7	522,7	548,6	574,6	626,5	678,3	**730,2**
	8	435,4	460,8	486,2	511,6	537	562,3	613,1	663,9	**714,7**
	10	425,9	450,8	475,6	500,4	525,3	550,1	599,8	649,5	699,2
	12	416,5	440,7	465	489,3	513,6	537,9	586,5	635,1	683,6
	14	407	430,7	454,5	478,2	502	525,7	573,2	620,6	668,1
420	4	478,8	506,7	534,6	562,5	590,4	618,4	674,2	**730,1**	**785,9**
	6	468,8	496,1	523,5	550,8	578,2	605,5	660,2	**714,9**	**769,5**
	8	458,8	485,6	512,3	539,1	565,9	592,6	646,1	699,7	**753,2**
	10	448,8	475	501,2	527,4	553,6	579,7	632,1	684,5	**736,8**
	12	438,9	464,5	490,1	515,7	541,3	566,9	618,1	669,3	**720,4**
	14	428,9	453,9	478,9	504	529	554	604	654	**704,1**
440	4	503,2	532,6	561,9	591,3	620,6	650	**708,7**	**767,4**	**826,1**
	6	492,7	521,5	550,2	578,9	607,7	636,4	693,9	**751,4**	**808,8**
	8	482,2	510,4	538,5	566,6	594,8	622,9	679,1	**735,4**	**791,6**
	10	471,8	499,3	526,8	554,3	581,8	609,3	664,4	**719,4**	**774,4**
	12	461,3	488,2	515,1	542	568,9	595,8	649,6	**703,4**	**757,2**
	14	450,8	477,1	503,4	529,7	556	582,3	634,9	687,5	**740**
460	4	527,7	558,4	589,2	620	650,8	681,5	**743,1**	**804,6**	**866,2**
	6	516,7	546,8	576,9	607,1	637,2	667,3	**727,6**	**787,9**	**848,2**
	8	505,7	535,2	564,7	594,2	623,7	653,2	**712,1**	**771,1**	**830,1**
	10	494,7	523,5	552,4	581,3	610,1	639	696,7	**754,4**	**812,1**
	12	483,7	511,9	540,1	568,3	596,6	624,8	681,2	**737,6**	**794**
	14	472,7	500,3	527,9	555,4	583	610,6	665,7	**720,9**	**776**
500	4	576,6	610,2	643,8	677,5	**711,1**	**744,7**	**812**	**879,2**	**946,5**
	6	564,6	597,5	630,4	663,3	696,3	**729,2**	**795,1**	**860,9**	**926,8**
	8	552,6	584,8	617	649,2	681,5	**713,7**	**778,1**	**842,6**	**907,1**
	10	540,5	572,1	603,6	635,1	666,7	698,2	**761,2**	**824,3**	**887,3**
	12	528,5	559,4	590,2	621	651,8	682,7	**744,3**	**806**	**867,6**
	14	516,5	546,7	576,8	606,9	637	667,2	**727,4**	**787,7**	**847,9**
520	4	601	636,1	671,1	**706,2**	**741,2**	**776,3**	**846,4**	**916,5**	**986,6**
	6	588,5	622,8	657,2	691,5	**725,8**	**760,1**	**828,8**	**897,4**	**966,1**
	8	576	609,6	643,2	676,8	**710,4**	**744**	**811,1**	**878,3**	**945,5**
	10	563,5	596,3	629,2	662,1	694,9	**727,8**	**793,5**	**859,3**	**925**
	12	551	583,1	615,2	647,4	679,5	**711,6**	**775,9**	**840,2**	**904,4**
	14	538,4	569,8	601,2	632,7	664,1	**695,5**	**758,3**	**821,1**	**883,9**
540	4	625,5	662	698,4	**734,9**	**771,4**	**807,9**	**880,8**	**953,8**	**1027**
	6	612,4	648,2	683,9	**719,6**	**755,3**	**791,1**	**862,5**	**933,9**	**1005**
	8	599,4	634,4	669,3	**704,3**	**739,3**	**774,2**	**844,2**	**914,1**	**984**
	10	586,4	620,6	654,8	689	**723,2**	**757,4**	**825,8**	**894,2**	**962,6**
	12	573,4	606,8	640,3	673,7	**707,1**	**740,6**	**807,5**	**874,3**	**941,2**
	14	560,3	593	625,7	658,4	**691,1**	**723,8**	**789,1**	**854,5**	**919,8**

В целом можно отметить, что ввиду отсутствия ограничений по полноте обжига вплоть до 700 ^{0}C [5, 6] область допустимых режимов оказалась более широкой. Вместе с тем абсолютные значения максимумов температуры при хлорирующем обжиге являются более высокими и при содержании серы более 8 % могут достигать 900 - 1000 ^{0}C.

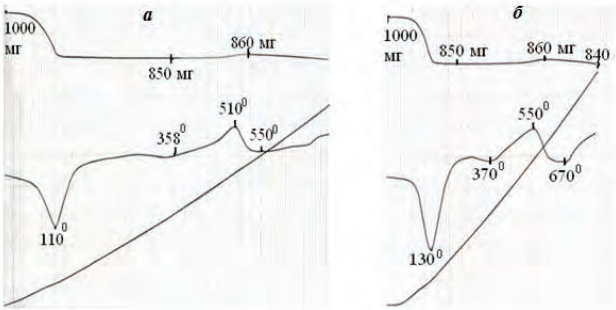
Таким образом, с целью выявления влияния температуры воздуха и его скорости фильтрации через навеску, размера гранул, содержания серы в концентрате на максимальную температуру обжига впервые проведены многофакторные эксперименты по окислительно - хлорирующему обжигу черновых серебросодержащих сульфидных концентратов. С помощью математической модели установлено распределение температуры по продолжительности процесса с выделением максимума температур и определением оптимальных областей проведения обжига с точки зрения попадания в зону допустимых температур по условиям недопущения спекания материала. При этом установлена возможность осуществления процесса в более широком диапазоне температур, 400 - 700 ^{0}C.

Одним из методов исследования процессов, последовательно протекающих при повышении температуры и получивших широкое распространение, является метод термического анализа.

Для изучения процессов, протекающих при нагреве чернового медного концентрата, необходимо знание кинетических параметров, в частности, значений кажущейся энергии активации. В связи с этим был проведен дифференциально - термический анализ гранул чернового серебросодержащего сульфидного концентрата с использованием дериватографа Derivatograf Q - 1000 фирмы «MOM» системы F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey.

Для дериватографической съемки использовалась навеска шихты 1000 мг, которую помещали в кварцевую ячейку с отверстиями для свободного непринудительного прохождения воздуха. Съемка проводилась при скоростях нагревания 5 и 10 град / мин.

Дериватограммы ДТА и ТГ дисперсной шихты приведены на рисунке 12.



а - 5 град / мин; б - 10 град / мин

Рисунок 4 – Дериватограммы шихты с галитом

Как видно из рисунка 4, на дериватограммах четко выделен эндотермический эффект, сопровождаемый потерей массы до 850 мг. Температура пика при скорости нагревания 5 град / мин составляет 110 ^{0}C, при 10 град / мин – 130 ^{0}C. Потеря массы в данном случае отнесена к удалению влаги в объеме 15 % .

Это несколько превышает вышеуказанную влажность шихты 7 % , что может быть связано с гигроскопичностью хлорида натрия при хранении шихты на открытом воздухе после проведения химического анализа.

Выделен экзотермический эффект с пиком при температуре 510 ^{0}C для скорости нагревания 5 град / мин и при 550 ^{0}C для скорости 10 град / мин.

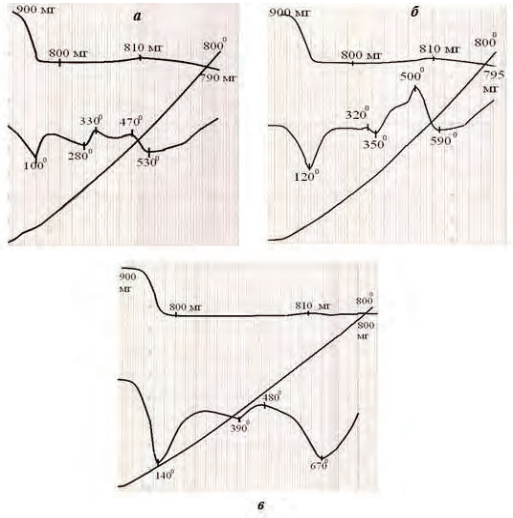
Начало пика относится к температуре 350 – 358 ^{0}C, что соответствует началу возгорания дисперсных сульфидов [7]. Эффект сопровождается незначительным увеличением массы навески, примерно на 10 мг, что соответствует 1 % от массы шихты. Вероятно, это связано с образованием сульфатов при окислительном хлорировании сульфидов. Конец эффекта относится к температуре 590 – 670 ^{0}C.

Дополнительно рассмотрена дериватограмма хлорида натрия при скорости нагревания 10 ^{0} / мин. Из нее следует, что вплоть до температуры плавления 800 ^{0}C с галитом ничего существенного не происходит кроме удаления адсорбированной влаги при 150 ^{0}C, и весь диапазон взаимодействия с черновым концентратом, 350 - 670 ^{0}C, находится в области кристаллического состояния хлорида натрия.

Аналогично проведены исследования ДТА и ТГ гранулированной шихты чернового концентрата с галитом, которую окатывали в грануляторе, имеющем чашу диаметром 0,4 м, с подачей разбрызгиванием раствором галита.

Для исследований использовали окатыши +2 - 3 мм с влажностью 8 % . Навеску гранул средней массой 900 мг помещали в кварцевую ячейку с отверстиями для свободного непринудительного прохождения воздуха, скорость нагревания составляла 5, 10 и 20 град / мин.

Дериватограммы гранул чернового медного концентрата с галитом представлены на рисунке 5.



а - скорость нагревания 5 град / мин; б - 10 град / мин; в - 20 град / мин

Рисунок 5 – Дериватограммы гранул серебросодержащего чернового концентрата с галитом

На дериватограммах (рисунка 5) первый сложный эффект является эндотермическим с пиками при 109, 120, 140 ^{0}C и соответственно относится к удалению различных форм влаги из гранул(капиллярной, сорбционной, кристаллогидратной).

Поскольку известно, что окисление сульфидов до сульфатов начинается при температурах порядка 350 ^{0}C [7], первый экзотермический эффект может быть отнесен к реакции общего вида

$MeS + 2O_2 = MeSO_4$. (12)

Второй экзотермический эффект относится к суммарной реакции хлорирования сульфатов, которая осуществляется при более высокой температуре и сопровождается выделением тепла [7]:

$MeSO_4 + 2NaCl = MeCl_2 + Na_2SO_4$. (13)

Оба процесса проходят на фоне слабо выраженного увеличения массы (порядка 12 %).

При второй и третьей скоростях нагревания оба эффекта почти полностью совмещаются, поэтому не могут быть использованы для расчета энергии активации. Тем не менее, они свидетельствуют о стадиальности окислительного хлорирования сульфидов с реализацией первой стадии сульфатообразования металлов и второй – их хлорирования. При этом подтверждается общий экзотермический характер процесса, при котором, судя по сопоставлению площадей эндотермического и экзотермических эффектов, осуществление окислительного хлорирования черновых медных сульфидных концентратов может осуществляться в значительной мере автогенно, с компенсацией затрат тепла на испарение влаги за счет прихода тепла от обжиговых процессов.

Исследования по окислительно - хлорирующему обжигу проводили на черновом концентрате с содержанием меди 4,73 % , серебра 87 г / т, химический состав концентрата представлен в таблице 1. Принципиальная технологическая схема окислительно - хлорирующего обжига чернового концентрата представлена на рисунке 6.

Рисунок 6 – Принципиальная технологическая схема
окислительно - хлорирующего обжига чернового концентрата

Эксперименты по окислительно - хлорирующему обжигу гранул проводили путем последовательного изучения действующих факторов методом Зейделя - Гаусса - Малышева [12, 13]. Изучали влияние расхода галита (γ_{Nacl}, %) в интервале от 0 до 15 % от массы концентрата и при грануляции 3 % , т.е. в сумме от 3 до 18 % ; продолжительности обжига (τ, мин) от 30 до 120 минут; температуры обжига (t, ^{0}C) от 300 до 700 ^{0}C при постоянном расходе воздуха V=0,048 м / с на извлечение меди (ε_{Cu}, %) и серебра (ε_{Ag}, %) в раствор.

Концентрат шихтовали с хлоридом натрия (галитом) и окатывали на грануляторе с подачей связующего раствора галита (3 %) разбрызгиванием. Фракции гранул размером +8 - 10 мм отсеивали на ситах, средний размер гранул составил 9 мм влажностью 8 % .

Изучение окислительно - хлорирующего обжига гранулированного чернового концентрата проводили в шахтной печи имеющей реактор из кварцевой трубки. Вовнутрь

реактора помещали корзинку с высушенными гранулами (m=40 г), снизу корзины находились термопары. Заданная температура воздуха поддерживалась на всем протяжении опыта. Выщелачивание огарка проводилось в термостатированной ячейке при перемешивании механической мешалкой в растворе серной кислоты 100 г / л с добавлением галита, при отношении Ж:Т=4:1, температуре 80 ^{0}C.

Условия и полученные результаты экспериментов представлены на рисунке 7.

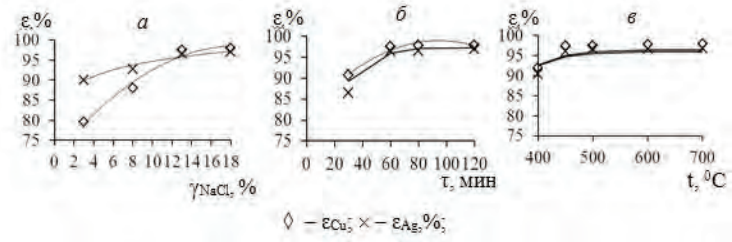


Рисунок 7 - Зависимости извлечения меди и серебра в раствор из огарка от исследованных факторов

Результаты опытов показали, что обжиг целесообразно проводить при температуре 450 ^{0}C, расходе галита 13 % , что обеспечивает извлечение меди и серебра в раствор не менее 98 % .

Зависимости для извлечения меди и серебра в раствор от температуры обжига имеет экстремум при температуре 450 °C, что объясняется спецификой твердофазных реакций, сопровождающих хлорирующий обжиг, что вполне согласуется с литературными данными [7, 16]. Частные функции извлечения меди и серебра в раствор после окислительно - хлорирующего обжига с определением коэффициента нелинейной множественной корреляции R и его значимости t_R представлены в таблицах 13, 14.

Таблица 13 – Частные функции извлечения меди в раствор после окислительно - хлорирующего обжига с определением коэффициента нелинейной множественной корреляции R и его значимости t_R

Функция извлечения меди в раствор, %	R	Условие t_R>2
$\varepsilon_{Cu} = 2{,}9413\gamma_{NaCl} - 0{,}0787\gamma_{NaCl}^2 + 71{,}03$	0,9838	43,22>2
$\varepsilon_{Cu} = 75{,}711\tau^{0{,}0568}$	0,8260	3,676>2
$\varepsilon_{Cu} = 97{,}88\left[1 - \exp(-1{,}027 \cdot 10^{-5} \cdot t^{2{,}117})\right]$	0,820	4,335>2

Полученные уравнения (таблица 13) для извлечения меди в раствор при окислительно - хлорирующем обжиге с учетом значимых частных функций для описания совокупности действующих факторов обобщаются согласно [12].

Произведение с нормировкой по центральному значению 96,30 % примет вид

$$\varepsilon_{Cu} = 0{,}79(2{,}94\gamma_{NaCl} - 0{,}079\gamma_{NaCl}^2 + 71{,}03)\tau^{0{,}0568}\left[1 - \exp(-1{,}03 \cdot 10^{-5} \cdot t^{2{,}117})\right], \quad (13)$$

При сопоставлении результатов эксперимента и расчета получены значения R= 0,9529 и t_R=34,37>2, что подтверждает адекватность описания данных эксперимента настоящим уравнением.

Таблица 14 – Частные функции извлечения серебра в раствор с определением коэффициента нелинейной множественной корреляции R и его значимости t_R

Функция извлечения серебра в раствор, %	R	Условия t_R>2
$\varepsilon_{Ag} = 85{,}503\gamma_{NaCl}^{0{,}0442}$	0,951	18,21>2
$\varepsilon_{Ag} = 96{,}97\left[1-\exp(-2{,}6242\cdot10^{-2}\cdot\tau^{1{,}3379})\right]$	0,9231	8,823>2
$\varepsilon_{Ag} = 96{,}8\left[1-\exp(-7{,}656\cdot10^{-6}\cdot t^{2{,}163})\right]$	0,8189	4,31>2

Аналогично получено обобщенное уравнение для извлечения серебра в раствор при окислительно - хлорирующем обжиге с нормировкой по центральному значению 95,92 % :

$$\varepsilon_{Ag} = 1{,}02(85{,}50\gamma_{NaCl}^{0{,}044})\left[1-\exp(-2{,}62\cdot10^{-2}\cdot\tau^{1{,}338})\right]\left[1-\exp(-7{,}65\cdot10^{-6}\cdot t^{2{,}163})\right].$$

R=0,9325, t_R = 23,70>2 (14)

Результаты хлорирующего обжига показали, что обжиг необходимо проводить при температуре 450 ^{0}C.

Таблица 15 – Многофакторная матрица по извлечению меди и серебра (ε_{Cu} / ε_{Ag}), % , после окислительно - хлорирующего обжига гранул с использованием в качестве связующего раствора галита. Выделены результаты, где оба показателя выше 95 %

τ, мин	t, ^{0}C		γ_{NaCl}, %							
			3	5	7	10	13	15	18	20
40	350	ε_{Cu}	71,01	75,16	78,74	83,06	86,1	87,43	88,36	88,27
		ε_{Ag}	81,4	83,26	84,51	85,85	86,86	87,41	88,11	88,52
	400	ε_{Cu}	74,57	78,92	82,68	87,22	90,41	91,8	92,78	92,68
		ε_{Ag}	85,76	87,71	89,03	90,44	91,5	92,08	92,82	93,26
	450	ε_{Cu}	76,28	80,74	84,59	89,22	92,49	93,92	94,91	94,82
		ε_{Ag}	87,86	89,87	91,22	92,66	93,75	94,34	**95,10**	**95,55**
	500	ε_{Cu}	77	81,5	85,39	90,07	93,37	94,81	**95,81**	**95,71**
		ε_{Ag}	88,75	90,77	92,13	93,6	94,69	**95,29**	**96,06**	**96,51**
	600	ε_{Cu}	77,35	81,87	85,78	90,48	93,79	**95,24**	**96,25**	**96,15**
		ε_{Ag}	89,17	91,2	92,57	94,04	95,14	**95,74**	**96,52**	**96,97**
	650	ε_{Cu}	77,38	81,9	85,8	90,51	93,82	**95,27**	**96,28**	**96,18**
		ε_{Ag}	89,2	91,23	92,6	94,07	95,17	**95,77**	**96,55**	**97,00**
80	350	ε_{Cu}	73,86	78,18	81,91	86,4	89,56	90,94	91,9	91,81
		ε_{Ag}	83,57	85,47	86,76	88,13	89,16	89,73	90,45	90,88
	400	ε_{Cu}	77,56	82,09	86,01	90,72	94,04	95,49	**96,5**	**96,41**
		ε_{Ag}	88,03	90,04	91,39	92,84	93,93	94,52	**95,29**	**95,73**
	450	ε_{Cu}	79,35	83,98	87,98	92,81	**96,21**	**97,69**	**98,72**	**98,62**
		ε_{Ag}	90,2	92,26	93,64	95,13	**96,24**	**96,85**	**97,63**	**98,08**

	500	ε_{Cu}	91,1	93,18	94,58	96,08	**97,2**	**97,82**	**98,61**	**99,07**
		ε_{Ag}	80,1	84,77	88,82	93,68	**97,12**	**98,61**	**99,66**	**99,56**
	600	ε_{Cu}	80,46	85,16	89,22	94,11	**97,56**	**99,06**	**100**	**100**
		ε_{Ag}	91,54	93,63	95,03	96,54	**97,67**	**98,28**	**99,08**	**99,54**
	650	ε_{Cu}	80,49	85,19	89,25	94,14	**97,59**	**99,09**	**100**	**100**
		ε_{Ag}	91,56	93,66	95,06	96,57	**97,7**	**98,32**	**99,11**	**99,57**
120	350	ε_{Cu}	75,58	80	83,81	88,41	91,65	93,06	94,04	93,95
		ε_{Ag}	83,57	85,48	86,76	88,14	89,17	89,74	90,46	90,88
	400	ε_{Cu}	79,37	84	88,01	92,83	96,24	97,72	**98,75**	**98,65**
		ε_{Ag}	88,04	90,05	91,4	92,85	93,94	94,53	**95,3**	**95,74**
	450	ε_{Cu}	81,19	85,94	90,03	94,97	**98,45**	**99,96**	**101**	**100,9**
		ε_{Ag}	90,2	92,26	93,65	95,14	**96,24**	**96,86**	**97,64**	**98,1**
	500	ε_{Cu}	81,96	86,75	90,89	**95,87**	**99,38**	**100,9**	**102**	**101,9**
		ε_{Ag}	91,11	93,19	94,59	**96,09**	**97,21**	**97,83**	**98,62**	**99,08**
	600	ε_{Cu}	82,33	87,14	91,3	**96,3**	**99,83**	**101,4**	**102,4**	**102,3**
		ε_{Ag}	91,55	93,64	95,04	**96,55**	**97,68**	**98,3**	**99,09**	**99,55**
	650	ε_{Cu}	82,36	87,17	91,33	**96,33**	**99,87**	**101,4**	**102,5**	**102,4**
		ε_{Ag}	91,57	93,67	95,07	**96,58**	**97,71**	**98,33**	**99,12**	**99,58**

Наиболее оптимальными условиями грануляции является шихтование концентрата с 10 % от массы концентрата и грануляция насыщенным раствором хлорида натрия. При этом через раствор вводится дополнительное количество NaCl - 3 % . Таким образом, суммарный расход NaCl составляет 13 % , что соответствует теоретическому расходу, при этом извлечение меди в раствор составляет не менее 98 % .

В результате проведенных исследований разработаны многофакторные модели процесса окислительно - хлорирующего обжига гранулированного серебросодержащего концентрата, выявлены области оптимальных режимов процесса, обеспечивающие извлечение меди и серебра свыше 95 % .

При изучении окислительно - хлорирующего обжига применяли агло - шахтную печь размерами шахты: h (высота шахты) = 500 мм (из них 100 мм зона сушки), L_1 = 100мм (ширина шахты), L_2= 150 мм [17]. Толщина слоя материала равна L_2= 150 мм, что соответствует толщине слоя в полупромышленной установки. Самое главное, для обеспечения свободного соотношение размера гранул и толщины слоя не менее 1:10 для обеспечения движения материала в шахте печи под собственной весом. В нашем случае оно соответствует 1:18 (средний размер гранул 8,5 мм).

Удельная производительность печи (при площади дутья L_1=1м^2) по результатам компоновки полупромышленного модуля 4дм^2·1,5дм при насыпной массе гранул 1,1 кг / дм^3, равна 165 кг / (м^2·ч)

$q = L_1\,[25 \cdot 1{,}1 \cdot 6\text{дм}^3] \cdot т / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}) = 165\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. (15)

Подача горячего воздуха с температурой 280 ^{0}С осуществлялась со скоростью 5 м^3 / ч на площадь шахты печи 5 дм^2 с помощью ФЭНа в динамическом режиме. Время нахождения материала в шахте печи составило 55 минут. Эскиз опытной шахтной печи и общий вид обожженных гранул представлены на рисунке 8.

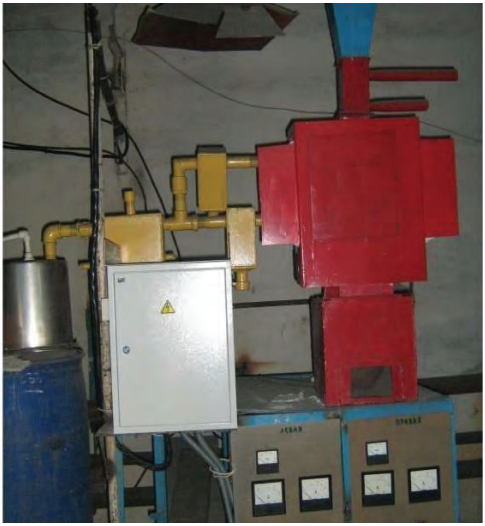


Рисунок 8 - Эскиз опытной шахтной печи и общий вид обожженных гранул

После усреднения полученного огарка отбирались пробы для определения оценки качества. Результаты химического состава огарка представлены в таблице 16.

Таблица 16 - Содержание основных элементов в огарке, %

Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %
Ag	84,0 г / т	SiO_2	53,0
Cu	3,98	ZnO	0,4
Fe	4,37	K_2O	1,7
MgO	0,4	Al_2O_3	9,1
Pb	0,45	TiO_2	0,6

Общая площадь вертикального сечения шахтной печи (F) для обеспечения суточного объема в промышленных условиях (П) равна

$$F = \frac{П}{q} = \frac{4384}{15} = 292 \text{ м}^2. \quad (16)$$

Число печей обозначим как n, тогда площадь вертикального сечения одной печи составит

$$F_1 = F / n = 292 / n, \text{ м}^2. \quad (17)$$

Очень важным показателем непрерывного процесса обжига является линейная скорость движения слоя по решетке, которая при одной и той же продолжительности процесса (60 мин) зависит от длины пути движения слоя в зоне обжига, т.е. высоты шахты печи – H.

При разной высоте шахты изменяется линейная скорость движения гранул (W) и производительность печи. Расчетная производительность печи и линейная скорость движения материала от высоты шахты представлена в таблице 17 (при ширине шахты L_1=2м^2).

Таблица 17 - Расчетная производительность печи
и линейная скорость движения материала от высоты шахты

$П_1$, т / ч	0,3	3	6	9	15
H, м (L_1=2м^2)	1	10	20	30	50
$S_{об}$, м^2(площадь)	2	20	40	60	100
W, см / мин	0,83	8,3	16,6	24,9	41,5

Часовая производительность одной промышленной печи рассчитывается по формуле:

$П_1 = П / n = 182 / n$, т / ч. (18)

Полученные в укрупннено - лаброраторной печи результаты, могут быть использованы для проектирования промышленных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определен химический состав чернового сульфидного концентрата: Ag = 87,2 г / т, Cu = 4,73 % , основной состав сульфидного концентрата, % : $CuFeS_2$ – 1,87, Cu_5FeS_4 – 1,58, Cu_2S – 2,70.

Определены энергетические показатели прочности гранул при статической нагрузке для гранул с использованием для окатывания технологической воды. И эффективное поверхностное натяжение составило ρ_c = 2697Дж / м^{2}и с использованием для окатывания раствора галита - 2833,9 Дж / м^2.

Получены математические модели статической и ударной прочности гранул, которые позволили определить допустимую высоту слоя гранул в обжиговой печи. Установлено, что допустимая высота падения гранул составила 6 м в виде фракции 4 - 12 мм, что вполне приемлемо для промышленных условий технологической транспортировки и хранения окатышей.

Проведены многофакторные эксперименты по окислительно - хлорирующему обжигу черновых серебросодержащих сульфидных концентратов с целью выявления влияния температуры воздуха и его скорости фильтрации через навеску, размера гранул, содержания серы в концентрате на максимальную температуру обжига. С помощью математической модели, установлено распределение температуры по продолжительности процесса с выделением максимума температур и определением оптимальных областей проведения обжига с точки зрения попадания в зону допустимых температур по условиям недопущения спекания материала. При этом установлена возможность осуществления процесса в более широком диапазоне температур, 400 - 700 ^{0}C.

Впервые политермы обжига, полученные в результате многофакторных экспериментов, использованы по подобию с методом обработки данных ДТА по Киссенгеру для определения энергии активации процессов обжига, которая составила 28,316 кДж / моль. Она свидетельствует о протекании процесса в диффузионном режиме [16] и контролируется доступом кислорода воздуха вовнутрь гранулы.

При дифференциально - термическом анализе шихты чернового серебросодержащего сульфидного концентрата и гранул выделен экзотермический эффект с пиком при температуре 510 ^{0}C для скорости нагревания 5 град / мин и при 550 ^{0}C для скорости 10 град / мин.

В результате проведенных исследований разработаны многофакторные модели процесса окислительно - хлорирующего обжига гранулированного серебросодержащего концентрата, выявлены области оптимальных режимов процесса, обеспечивающие извлечение меди и серебра свыше 95 % .

Проведены укрупненно - лабораторные испытания процесса обжига гранулированного серебросодержащего сульфидного концентрата в шахтной печи с удельной производительностью 165 кг.

Работа выполнена в рамках проводимых исследований по теме 2059 / ГФ - 4 «Исследование и разработка технологии вскрытия упорных серебросодержащих низкосортных медных сульфидных концентратов».

Список использованной литературы:

1. Малышев В.П., Телешев К.Д., Нурмагамбетова А.М. Разрушаемость и сохранность конгломератов. - Алматы: НИЦ «Ғылым», 2003. - 336 с.

2. Юн А.Б., Захарьян С.В., Чен В.А., Каримова Л.М., Терентьева И.В. Комплексная переработка лежалых хвостов Жезказганской обогатительной фабрики // Материалы Межд. науч. ассоциации «Science &Genesis». - Копенгаген, 2014. - С. 7 - 13.

3. Yun A., Zakharyan S., Chen V., Terentyeva I., Karimova L. Cranules strength and chloridizing roasting of tailing concentrate at Zhezkazgan concentrator // Chemical Engineering Journal. – 2014. - Vol.1, №2. – P. 1 - 7.

4. Медведев А.С., Со Ту. Особенности электрохимических реакций, сопровождающих хлорирующий обжиг сульфидных медных концентратов // Изв. Вузов. Цветная металлургия. - 2012. №3. - С.3 - 6.

5. Медведев А.С., Со Ту, Хамхаш А., Птицын А.М. Вариант переработки сульфидного медного концентрата комбинированным способом // Цветные металлы. - 2010. - № 1. - С. 33 - 36.

6. Со Ту. Физико - химические основы комбинированного способа переработки сульфидного медного концентрата Удоканского месторождения: автореф. дисс.канд. техн. наук: М.:МИССиС, 2011. - 25 с.

7. Смирнов В.И., Тихонов А.И. Обжиг медных руд и концентратов. - Свердловск: Металлургиздат, 1958. - 280 с.

8. Инновационный пат. 29308 РК. Обжиговая шахтная печь для непрерывной сушки, обжига и охлаждения гранулированных материалов. / Малышев В.П., Юн А.Б., Жумашев К.Ж., Лариков В.А., Захарьян С.В., Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Чен В.А., Терентьева И.В., Назаренко И.А., Макашева А.М., Айбеков Н.Ж.; опубл. 15.12.14, Бюл. № 12. – 2с: ил.

9. Инновационный пат. 29606 РК. Способ комплексной переработки серебросодержащих забалансовых сульфидных руд и концентратов / Юн А.Б., Захарьян С.В., Каримова Л.М., Чен В.А., Терентьева И.В; опубл. 16.03.2015, бюл. №3.

10. Kissinger H.E. Кинетика реакций и ДТА // Analyt. Chem. 1957. V. 29. №11.

11. Kissinger H.E. Изменение температурного пика в зависимости от скорости нагрева в ДТА // Nat.Bur.of Standards Res. 1956. V.57. P 2712.

12. Малышев В.П. Математическое описание результатов многофакторного эксперимента, проведенного по методу Зейделя - Гаусса // Вестник АН Каз ССР. - 1978. - № 4. - С. 31 - 38.

13. Малышев В.П. Кинетический и технологический анализ обобщающих математических моделей химико - металлургических процессов // Доклады Национальной академии наук РК. - 2008. - №2. - С. 13 - 18.

14. Дукарский О.М., Закурдаев А.Г. Статистический анализ и обработка данных на ЭВМ «Минск - 22». - М.: Статистика, 1971. - 179 с.

15. Сиськов В.И. Корреляционный анализ в экономических исследованиях. - М.: Статистика, 1975. - 168 с.

16. Эммануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974. 400 с.

17. Инновационный патент РК 2010 / 1431.1 от 24.11.2010 / Жумашев К.Ж., Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Токбулатов Т.Е., Юн А.Б. Способ комплексной переработки бедных забалансовых сульфидных руд и концентратов. Бюл.№ 12 от 20.12.2011.

© Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Жумашев К.Ж., Мусина А.Е. 2017

УДК 547:873

Миронович Л.М.
профессор, д.х.н.
ФГБОУ ВО Юго - Западный государственный университет
г. Курск, Российская Федерация
Иванов С.М.
сотрудник
Институт органической химии имени Н.Д. Зелинского РАН
г. Москва, Российская Федерация
L.M. Mironovich
professor, д.х.н.
Southwest State University
Kursk, Russian Federation
S. M. Ivanov
Researcher, Laboratory of Chemistry of Heterofunctional Compounds (N25)
N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences
Moscow, Russian Federation

ПИРАЗОЛО[1,2,4]ТРИАЗИНЫ: СИНТЕЗ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

PYRAZOLO[1,2,4]TRIAZINES: SYNTHESIS AND REACTIVITY

Аннотация

Рассмотрено получение пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов на основе солей пиразол - 3(5) - диазония и 4 - амино - 1,2,4 - триазинов, а также других представителей пиразоло[1,2,4] триазинов. Представлены химические превращения пиразоло[1,2,4] триазинов и их биологическая активность.

Ключевые слова
пиразоло[1,2,4]триазины, соли пиразол - 3(5) - диазония, 1,2,4 - триазины, диазотирование, конденсация

Abstract
Preparations of various pyrazolo[1,2,4]triazines started from pyrazole - 3(5) - diazonium salts, 4 - amino - 1,2,4 - triazines and other compounds, chemical properties and biological activity of the corresponding derivatives are described.

Key worlds:
pyrazolo[1,2,4]triazines, pyrazole - 3(5) - diazonium salts, 1,2,4 - triazines, diazotization, ring closure condensation

Введение

Производные 1,2,4 - триазина исследуются химиками более 100 лет. Бурное развитие химия 1,2,4 - триазинов получила в 60 - е годы прошлого столетия, в связи с получением ряда пестицидов, на их основе. Разнообразие биологической активности и химических превращений ряда 4 - амино - 1,2,4 - триазинов представлено в обзоре [1]. Способы получения и химические превращения неконденсированных 1,2,4 - триазинов до 1990 года рассмотрены в обзоре [2]. В последнее время исследования в области изучения реакционной способности 1,2,4 - триазинов направлены на получение конденсированных систем на их основе, вследствие высокой их биологической активности. На основе 4 - амино - 1,2,4 - триазинов получены многообразные конденсированные системы, в том числе пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазины. Высокая биологическая активность производных ряда 1,2,4 - триазинов и конденсированных систем на их основе привлекает внимание химиков - синтетиков к расширению базы соединений на их основе.

Широко изучено получение производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов, обладающих спектром биологической активности [3 - 7]. Так, производные пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазина проявляют противоопухолевую [8] и противомикробную активности [8,9]. В качестве антиоксидантов в настоящее время нашли применение производные пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов [18].

Известна биологическая активность для производных пиразоло[1,5 - *d*][1,2,4]триазина [10], пиразоло[1,5 - *b*][1,2,4]триазина [11], пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазина [12 - 14].

Производные пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазина, содержащие сульфонамидную группу, активны против кожных заболеваний и являются ингибиторами тирозиназы для предотвращения постоянной пигментации радужной оболочки, что препятствует развитию глаукомы [15], а также проявляют противоопухолевую активность, являются хорошими ингибиторами ангидразы и используются в настоящее время как диуретики [16]. Пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазины схожи по своей структуре с пуриновыми нуклеозидами, которые находят широкое применение в фармакологии [17].

Разнообразие химических свойств конденсированных систем, содержащих пиразоло[1,2,4]триазиновый фрагмент, привлекает внимание химиков для получения новых функционально - замещенных и гетероконденсированных систем на их основе.

Методы получения пиразоло[1,2,4]триазинов

Методы получения данного класса соединений многообразны и зависят от химического строения пиразоло[1,2,4]триазинов. Наиболее распространены и изучены пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазины.

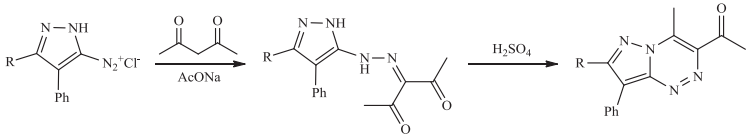
Существует два принципиальных подхода к получению пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов:

а) синтоном построения является пиразол;

б) синтоном построения является 1,2,4 - триазин.

Распространена схема [4+2] аннелирования 1,2,4 - триазина с использованием солей пиразол - 3(5) - диазония. Классическим методом получения пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов является азосочетание пиразолдиазониевых солей с 1,3 - дикетонами, 3 - кетоэфирами, метиленактивными соединениями и соединениями, содержащими активную С - Н - группу. Можно использовать взаимодействие между пиразолдиазониевой солью и фторсодержащими несимметричными бензоилкетонами для замыкания нового цикла [19 - 24]. Так, соль 4 - (3,4 - диметоксифенил) - 3 - этилпиразол - 5 - диазония легко сочетается с ацетилацетоном с образованием пиразолилгидразонов, циклизация которых в серной кислоте на холоду приводит к пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинам (схема 1) [19]. Карбоновые кислоты легко декарбоксилируются. Некоторыми авторами показано, что эфиры малоновой кислоты с трудом вступают в реакции азосочетания с хлоридами пиразолдиазония.

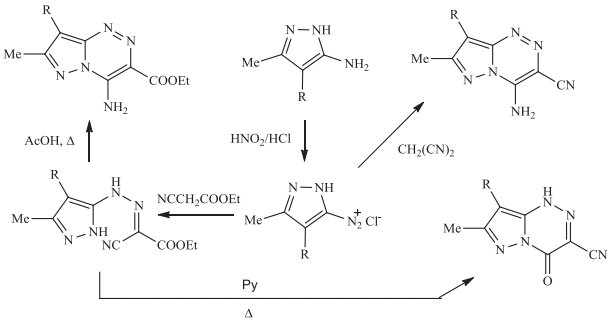
Схема 1



Описано азосочетание соли пиразолдиазония с бензоилацетоном с выделением 3 - бензоил - 4 - метил - 8 - фенилпиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазина [20].

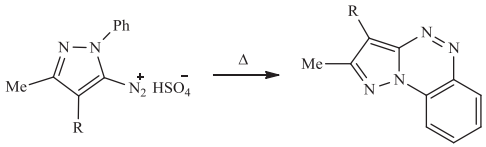
Предложены методы получения новых производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов [26 - 28]. В качестве циклизующего агента применяют метиленактивные соединения, в том числе β - кетонитрилы. При взаимодействии диазотированных соединений с малонодинитрилом или цианоуксусным эфиром при нагревании в ледяной уксусной кислоте через образование промежуточных соединений выделили 7 - аминопиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазины (схема 2) [29]. При нагревании промежуточного гидразона в пиридине в результате внутримолекулярной гетероциклизации выделяют сответствующий 4 - оксо - 1,4 - дигидропиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин. [30]. Реакции можно проводить кипячением в этаноле, разбавленных минеральных кислотах и выделять смесь производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазина. Описано, что действием нитрита натрия (серная кислота) на 5 - амино - 4 - гетарил - 3 - метил - 1*H* - пиразол с последующим взаимодействием продукта диазотирования с метиленактивными соединениями получены соответствующие пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4] - триазины [6].

Схема 2



Соли арендиазония, содержащие в *орто* - положении к диазогруппе активный к электрофильной атаке заместитель, малоустойчивы и самопроизвольно вступают в реакцию внутримолекулярной циклизации с образованием гетероконденсированных систем. Впервые таким методом пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]бензотриазин был получен Е.Мором [31]. Производные пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]бензотриазина можно получать и при обработке пиразол - 5 - диазониевых солей в условиях термической циклизации (схема 3) [32].

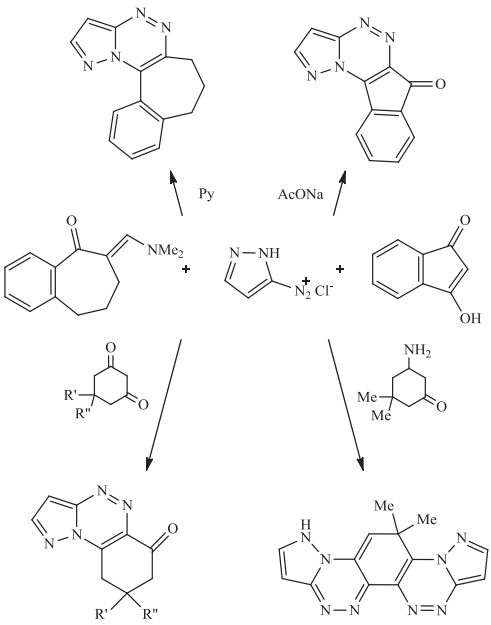
Схема 3



Для получения пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов взаимодействием солей пиразол - 3(5) - диазония с агентами применяют несимметричные β - дикетоны, перфторалкилсодержащие 1,3 - дикетоны, гетерилкетоны, β - кетокарбоновые кислоты, гетерилацетонитрилы, непредельные нитрильные соединения.

Описаны реакции азосочетания солей пиразол - 3(5) - диазония с циклическими азокомпонентами: циклогексан - 1,3 - дионом, димедононом, 2 - этоксикарбонилциклопентанононом, бензосубероном, 1,3 - индандионом, α - пиридонами [33].

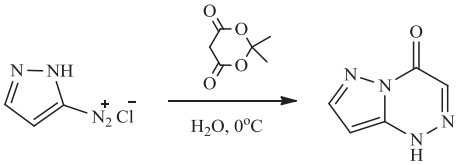
Схема 4



Некоторые примеры получения гетероконденсированных систем приведены на схеме 4. Взаимодействие соли пиразолия с циклогексан - 1,3 - дионом приводит производному пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]безотриазинону, в случае енаминона образуется пентациклическая система, с участием производного бензосуберона проходит реакция Яппа - Клингемана, а в случае 1,3 - индандиона образуется производное индено[1,2 - *e*]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 6 - она.

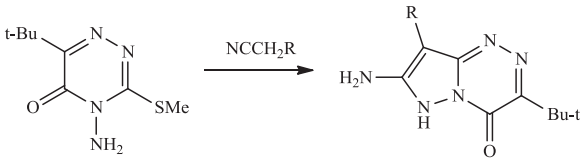
Описано применение кислоты Мельдрума для получения производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазина с участием соли пиразол - 3(5) - диазония (схема 5) [34]. Реакция протекает через образование промежуточных продуктов с образованием соответствующей кислоты, декарбоксилирование которой приводит к конечному продукту.

Схема 5



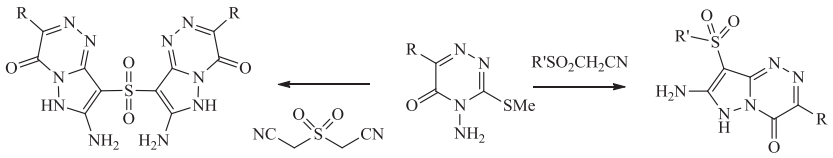
Иным подходом к получению производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов является использование в качестве синтона замещенных 1,2,4 - триазина, среди которых применяют 4 - амино - 3 - метилмеркапто - 6 - R - 1,2,4 - триазин - 5(4*H*) - оны. Классическим методом получения пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов является использование в качестве синтона триазинового кольца. Конденсации 4 - амино - 3 - метилмеркапто - 6 - R - 1,2,4 - триазин - 5(4*H*) - она с метиленактивными соединениями (малонодинитрилом, цианоуксусным эфиром) в среде пиридина при кипячении приводит к производным пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазина, имеющим функциональные группы, такие как амино - , циано - , этокси - оксо - , а также атомы азота гетероцикла, способные к участию в реакциях ацилирования, нуклеофильного замещения, алкилирования, диазотирования, нуклеофильного присоединения - отщепления, внутримолекулярной конденсации (схема 6) [35]. В ИК спектрах соединений валентное колебание C^4=O расположено при 1640 - 1660 $см^{-1}$. При 2270 $см^{-1}$ находится характеристическое колебание группы CN. В спектре ^{1}H ЯМР синглет протонов *трет* - бутильной группы расположен при 1.32 - 1.34 м.д., а синглет протонов аминогруппы расположен при 6.25 - 6.28 м.д. Отнесение атомов углерода 7 - амино - 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 6*H* - пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4] - триазин - 8 - карбонитрила в спектре ЯМР ^{13}C, δ, м.д.: 27,89 (C - $(CH_3)_3$); 37,11 (C - $(CH_3)_3$); 112,59 (C≡N); 124,31 (C - 8) ; 136,72 (C - 7); 146,6 - 146,68 (C - 4); 148,85 - 149,63 (C - 3); 159,3 (C - 9).

Схема 6



Описано получение пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4 - онов при действии СН - кислот, таких как 3 - оксопропантиоамидов [36], цианометиларилсульфонов [37], 1,3 - дикарбонильных соединений [38] на 4 - амино - 3 - метилсульфанил - 6 - R - 4,5 - дигидро - 1,2,4 - триазин - 5 - оны. В случае цианометиларилсульфона получают 7 - амино - 3 - R - 8 - (R' - сульфонил) - 1,4 - дигидропиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4 - оны, а в случае *бис* - цианометилсульфона выделяют бис[7амино - 3 - *трет* - *бутил* - 4 - оксо - 1,4 - дигидропиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 8 - ил]сульфон (схема 7) [37].

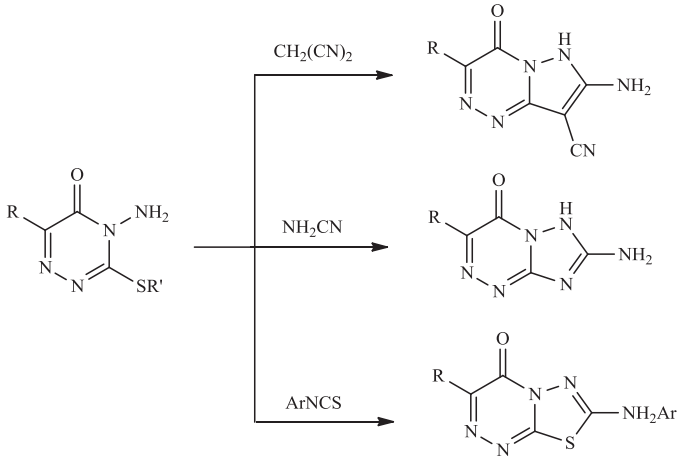
Схема 7



В зависимости от атакующего реагента на 4 - амино - 1,2,4 - триазин получают бициклические соединения различного строения, в том числе имеющих иные гетероатомы (S,O) в гетероциклической системе, а также позволяющие получать триазоло[1,2,4]триазины, тиадиазоло[1,2,4]триазины и другие гетероконденсированные системы.

Так, кипячение 4 - амино - 3 - меркапто - 6 - R - 1,2,4 - триазин - 5(4*H*) - она с CS_2 в щелочной среде (полярный растворитель) приводит к выделению производного [1,3,4]тиадиазоло[2,3 - *c*][1,2,4] - триазина, а при его взаимодействии с малонодинитрилом получают пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 8 - карбонитрилы (схема 8) [39].

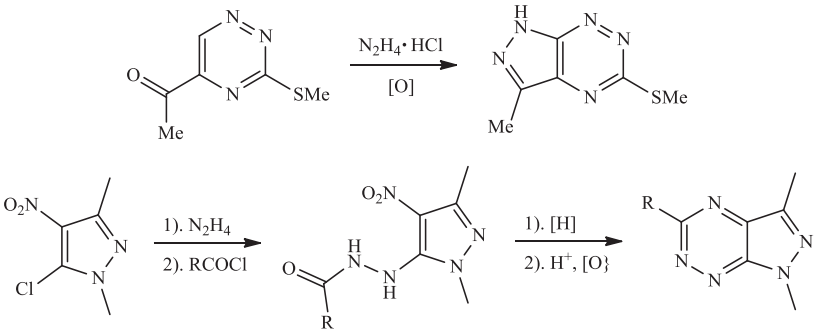
Схема 8



Пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазины получают также окислительной конденсацией 1,2,4 - триазина с различными агентами. Так, 3 - метил - 5 - метилсульфанил - 1*H* - пиразоло[4,3 -

e][1,2,4]триазин получен реакцией 5 - ацетил - 3 - метилсульфонил - 1,2,4 - триазина с гидрохлоридом гидразина (схема 9) [40].

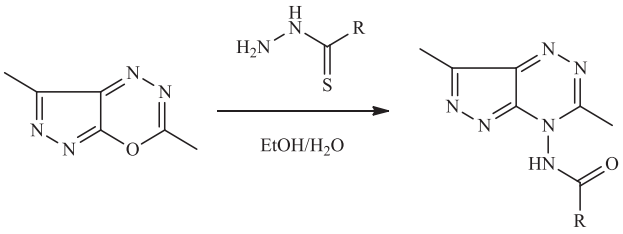
Схема 9



Реакцией 1,3 - диметил - 5 - хлоро - 4 - нитропиразола с N_2H_4 в EtOH с последующим ацилированием RCOCl (ТГФ, от 0 до 20°) и восстановлением NO_2 - группы (N_2H_2, Ni - Ренея, MeOH) получают 1,3 - диметил - 4 - амино - 5 - (2 - R - карбонилгидразино)пиразолы, из которых в результате внутримолекулярной окислительной циклизации в присутствии полифосфорной кислоты (ПФК) синтезируют 5 - R - 1,3 - диметилпиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазины, выход составляет 20 - 32 % [17].

Можно использовать бициклические системы, которые под действием различных агентов раскрывают цикл и последующая циклоконденсация идет с замыканием пиразолотриазинового цикла. Так, описан синтез пиразолопроизводных 1,2,4 - триазина конденсацией 3,7 - диметилпиразоло[4,3 - *e*]оксадиазина с замещенными тиосемикарбазида при нагревании (60°C) в течение 3 ч (схема 10) [41]. Выход продукта составляет 50 % .

Схема 10



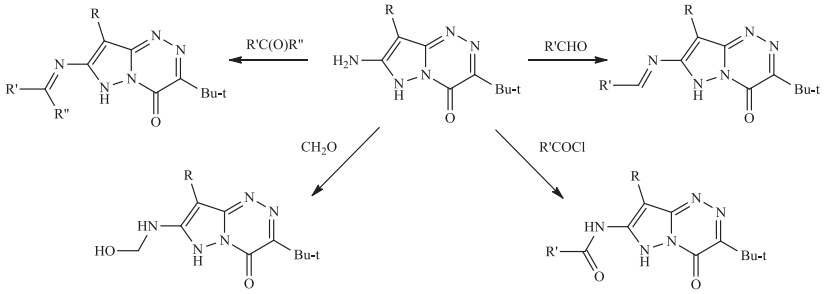
Химические превращения в ряду пиразоло[1,2,4]триазинов

Химические превращения в ряду пиразолотриазинов многообразны и обусловлены наличием реакционноспособных функциональных групп.

Аминогруппа в производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинах вступает в реакции с альдегидами и кетонами, галогенангидридами и ангидридами кислот, взаимодействует с формальдегидом (схема 11) [42 - 46].

7 - (R - метилиденамино) - пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазины получают кипячением в спирте производных пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазинов с альдегидами в присутствии кислотного катализатора (в спектрах ^{1}H ЯМР синглет группы CH расположен при 8 – 8.2 м.д.). Отсутствие кислотного катализатора не приводит к желаемому результату.

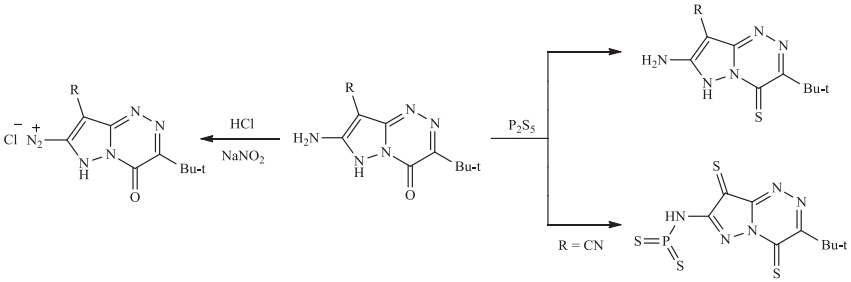
Схема 11



На основе аминопроизводных пиразолотриазинов получены соли диазония. Диазотирование проводят нитритом натрия в солянокислой среде при 0^{o}C в течение 30 мин и выделяют кристаллические устойчивые соли диазония (ИК спектр: 2238 см$^{-1}$ (N≡N)) [47].

Оксогруппа в положение C - 4 пиразолотриазина замещается на тиоксогруппу при действии пентасульфида фосфора в среде пиридина при кипячении (R H, Me, COOH, $C(O)NH_2$, C)O)OEt, $C(O)NHNH_2$). Наличие цианогруппы в гетероцикле приводит к одновременному замещению оксо - и цианогруппы на тиоксогруппу с выделением N - (3 - *трет* - бутил - 4,8 - дитиоксопиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 7 - ил)амида метадитиофосфорной кислоты**.** Одновременно происходит фосфорилирование аминогруппы (схема 12) [47].

Схема 12

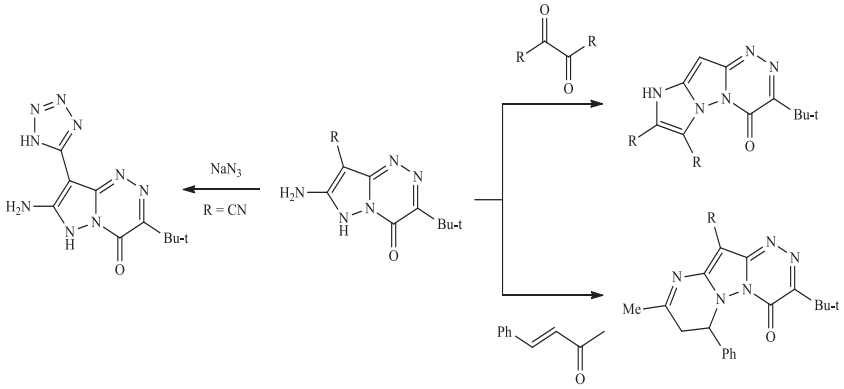


Типичными являются реакции внутримолекулярной конденсации под действием различных агентов (схема 13).

При взаимодействии бензальацетона с пиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазинами в спиртовой среде при кипячении выделены соответствующие пиримидо[2,3:2`,3`]пиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазины с выходами 55 - 61 % [41].

При действии азида натрия на 7 - амино - 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 6*H* - пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 8 - карбонитрил в присутствии хлористого аммония получен 7 - амино - 3 - *трет* - бутил - 8(2*H* - тетразол - 5 - ил)пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*) - он [48].

Схема 13

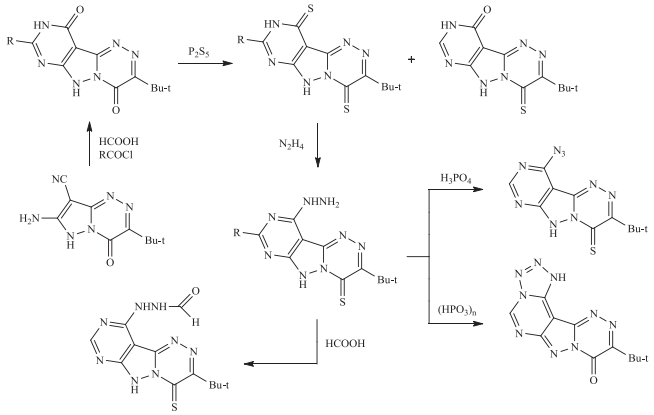


Кипячение 7 - амино - 3 - *трет* - бутилпиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазин - 4(6*H*) - она с α - дикетонами в ледяной уксусной кислоте с избытком ацетата аммония приводит к 3 - *трет* - бутил - 7 - R,8 - R - 9*H* - имидазо[1',2':2,3]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4 - ону, сигналы атомов углерода в спектре ^{13}C ЯМР соответствуют структурной формуле – 10,10 (CH_3); 24,16 (CH_3); 27,58 - 27,79 (C - (CH_3)$_3$); 36,76 (C - (CH_3)$_3$); 83,49 (C - 11); 142,44 (C - 3); 146,59 - 147,22 (C - 4); 148,45 (C - 12); 158,9 (C - 8); 163,64 (C - 7), 179,23 (C - 10) [49].

Взаимодействием карбоновых кислот или хлорангидридов кислот с 7 - амино - 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 6*H* - пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 8 - карбонитрилом получены 3 - *трет* - бутил - 9 - R - пиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*),11(10*H*) - дионы. Рассчитаны энергии активации реакции конденсации в условиях термического и микроволнового излучения, которые составили соответственно 91,454 и 58,198 (муравьиная кислота); 44,341 и 22,170 (хлористый бензоил) [50].

Многообразие химических превращений пиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*),11(10*H*) - диона приведено на схеме 14. Кипячение с пентасульфидом фосфора в среде безводного пиридина приводит к выделению 3 - *трет* - бутилпиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*),11(10*H*) - дитиона, в качестве побочного продукта получен 3 - *трет* - бутилпиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 11(10*H*) - он - 4(6*H*) - тион. Гидразинолиз по тиоксогруппе в положении С - 11 гетероцикла (гидразинолиз тиоксогруппы в положении С - 4 гетероцикла не проходит) дает возможность выделить 3 - *трет* - бутил - 11 - гидразино - 9 - R - пиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*) - тионы, кипячение которых с избытком муравьиной кислоты приводит к формилированию по гидразиновой группе, а обработка $NaNO_2$ при 0^{o}C в полифосфорной кислоте позволило выделить 3 - *трет* - бутил - 13*H* - тетразоло[1",5":3',4'] пиримидо[5',6':3,4]пиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазин - 4 - он.

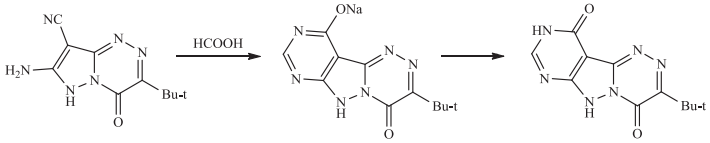
Схема 14



Проведение реакции в ортофосфорной кислоте при 0°С привело к получению 3 - *трет* - бутил - 11 - азидопиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*) - тион [45, 51 - 53]

Кипячение 7 - амино - 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 6*H* - пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4] триазин - 8 - карбонитрила в избытке муравьиной кислоты с дальнейшей нейтрализацией реакционной смеси раствором гидроксида натрия привело к выделению 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 6*H*,9*H*,10*H* - пиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4] триазин - 11 - оат натрия, представляющего собой серые кристаллы с т.пл. 291 - 294°С, который при обработке кислотой переходит в 3 - *трет* - бутилпиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 4(6*H*),11(10*H*) - дион (схема 15).

Схема 15



Все неводородные атомы аниона, за исключением *трет* - бутильного заместителя, лежат в плоскости с точностью 0.02 Å (рис.1).

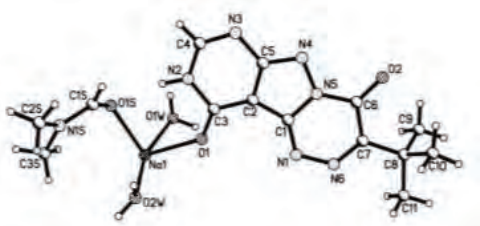
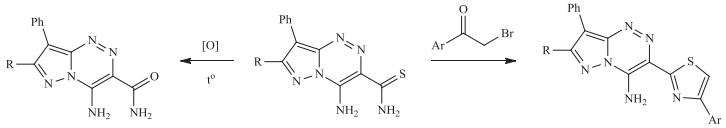


Рисунок 1. Молекулярное строение 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 6*H*,9*H*,10*H* - пиримидо[4',5':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4] триазин - 11 - оата натрия

Трет - бутильный заместитель развернут таким образом, что связь C(8) - C(11) антиперипланарна эндоциклической связи C(6) - C(7) (торсионный угол C(6) - C(7) - C(8) - C(11) 176.0(2)°).

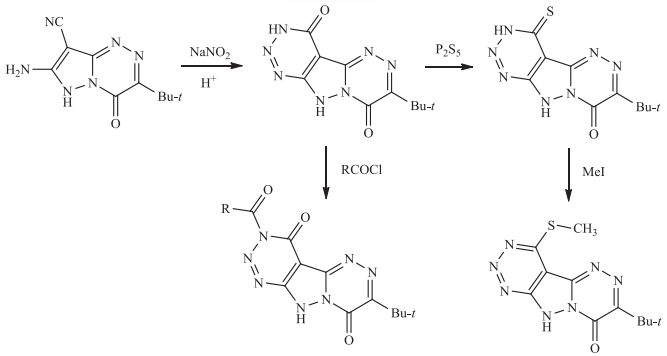
Описана функционализация 4 - аминопиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазин - 3 - карботиоамидов действием фенацилбромидов (по типу реакции Ганча) с образованием тиазолилпиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазинов, а окисление пероксидом водорода при 40 - 50°C приводит к 4 - аминопиразоло[5,1 - c][1,2,4]триазин - 3 - карбоксамиду (схема 16) [19 - 21].

Схема 16



Диазотированием 7 - амино - 3 - *трет* - бутил - 4 - оксо - 4,6 - дигидропиразоло[5,1 - *c*][1,2,4] - триазина - 8 - карбонитрила нитритом натрия в солянокислой среде получен 7 - *трет* - бутил[1,2,4]триазино[4',3':1,5]пиразоло[3,4 - *d*][1,2,3]триазин - 4,8(3*H*,10*H*) - дион, который ацилируется по атому N - 3 гетроцикла галогенангидридами кислот.

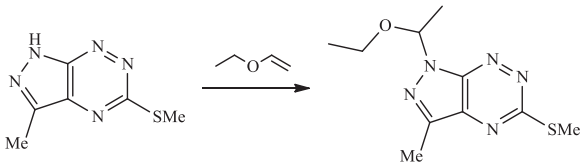
Схема 17



Замещение оксогруппы проходит в положение 4 гетероцикла с образованием тиона. Проведено алкилирование по тиоксогруппе йодистым метилом, галогеналканами в водно - метанольном растворе щелочи при комнатной температуре (схема 17) [46,54].

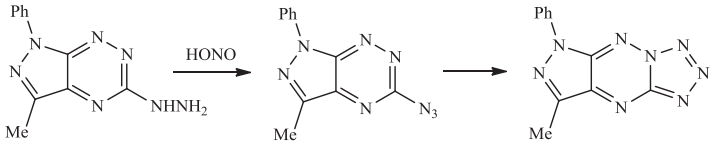
Взаимодействие пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазина с виниловым эфиром привело к выделению 1 - (1 - этоксиэтил) - 3 - метил - 5 - метилсульфанил - 1*H* - пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазина (схема 18) [40].

Схема 18



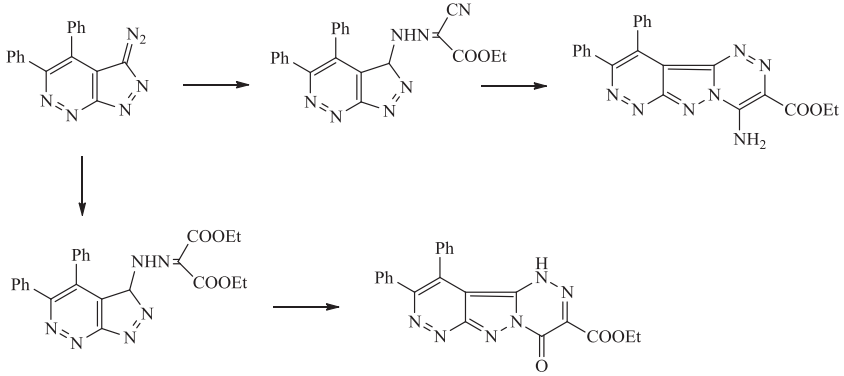
В связи проявлением пиразоло[4,3 - *e*][1,2,4]триазинов биологической активности исследована его реакционная способность. Так, при кипячении 5 - азидопроизводного в этаноле выделен 7 - метил - 5 - фенил - 1*H* - пиразоло[4,3 - *e*]тетразоло[4,5 - *b*][1,2,4]триазин (схема 19) [55].

Схема 19



Описано получение производных пиридазино[3',4':3,4]пиразоло[5,1 - *c*] - [1,2,4]триазинов. Нагреванием алифатического гидразина в концентрированной соляной кислоте при 70°C в течение 10 мин получен этил 4 - амино - 9,10 - дифенилпиридазино[3',4':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 3 - карбоксилат. Нагревание диэтил 4,5 - дифенил - 1H - пиразоло[3,4 - *c*]пиридазин - 3 - илгидразономалоната в ледяной уксусной кислоте в течение 3 ч приводит к образованию 9,10 - дифенил - 1,4 - дигидро - 4 - оксопиридазино[3',4':3,4]пиразоло[5,1 - *c*][1,2,4]триазин - 3 - карбоксилата (схема 20) [56].

Схема 20



Выводы

В представленной работе описаны основные методы получения пиразолотриазинов различного строения и их фармакологическая активность. Приведены реакции функционализации и гетероконденсации в ряду пиразолотриазинов.

Список использованной литературы:

1.Wafaa S. Hamama, Ghada G. El - Bana, Saad Shaaban, O. M. O. Habib and Hanafi H. Zoorob. RSC Adv. – 2016. – Vol. 6. – 24010 - 24049.

2. Миронович Л.М., Промоненков В.К. Итоги науки и техн. ВИНИТИ. Сер. Орг. Хим. 1990. – 22, 267 с.

3.T. Gucky, I.Frysova, J. Slouka, M. Hajduch, P. Dzubak. European Journal of Medicinal Chemistry. – 2009. – N 44. – P. 891 - 900.

4. W. M. Al - Adiwish, M.I.M. Tahir, A. Siti - Noor - Adnalizawati, S. F. Hashim, N.Ibrahim, W.A. Yaacob. European Journal of Medicinal Chemistry. – 2013. – N 64. – P. 464 - 476.

5. K.Sztanke, K.Pasternak, B.Rajtar, M. Sztanke, M.Majekc, M. Polz - Dacewicz. Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2007. – N 15. – P. 5480–5486.

6. F. Karcı, F. Karcı. Dyes and Pigments. – 2008. – N 76. – P. 97 - 103.

7. A. S. Shawali Journal of Advanced Research. – 2012. – N3. – P.185 - 188.

8. Riyadh S. M., Nabila K. A., Asiry A. M. Journal Monatshefte für Chemie. 2013. – Bd. 10. – S. 1559.

9. Миронович Л.М., Костина М.В. ЖОХ. 2013 – Т.83, № 1. – С.161 - 163.

10. R. W. Carling, M. G. Russell, K.W. Moore, A. Mitchinson, A. Guiblin, A.Smith, K. A. Wafford, G. Marshall, J.R. Atack, L. J. Street. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters . –2006. – N 16. – P. 3550–3554.

11. G. G. Danagulyan, A. P. Boyakhchyan, A. K. Tumanyan, A. G. Danagulyan, V. G. Kirakosyan. Chemistry of Heterocyclic Compounds. – 2011. – N 3. – P. 386 - 389.

12. Mojzych, V. Subertová, A. Bielawska, K. Bielawski, V. Bazgier, K. Berka, T. Gucký , E.Fornal, V. Krystof. European Journal of Medicinal Chemistry. – 2014. – № 78. – P.217 - 224.

13. G. Ciciani, M. Coronnello, G. Guerrini, S. Selleri, M. Cantore, P. Failli, E. Mini, A. Costanzo. Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2008. – N 16. – P. 9409–9419.

14. M. Mojzych, Z. Karczmarzyk, W. Wysocki, Z. Urbanczyk - Lipkowska, N.Zaczek. Journal of Molecular Structure. – 2014. – N 1067. – P. 147 - 153.

15. Mojzycha M., Dolashkib A., Voelterc W. Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2014. – Vol. 22, N 23. – P. 6616–6624.

16. Mojzycha M., Cerusob M., Bielawskad A., Bielawskid K., Fornale E., Supuranb C.T. Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2015. – Vol. 23, N 13. – P. 3674–3680.

17. K.A. Safieh, A.M. Abu Mahthieh, M.M. El - Abadelah, M.T. Ayoub, W. Voelter. Monatshefte fur Chemie - Chemical Monthly. – 2007. – N 2. – P. 157 - 160.

18. M. A. Gouda. J. Heterocyclic Chem. – 2014. – Vol. 48, N 1. – P. 1 - 10.

19. В.В. Диденко, В.А. Воронкова, Х.С. Шихалиев. Журнал органической химии. – 2009. – №2. – С. 223 - 226.

20. В.В. Диденко, И.В. Леденёва, А.С. Шестаков, Х.С. Шихалиев. Вестник ВГУ. Серия Химия. Биология. Фармация. – 2010. - №1. –С.7 - 10.

21. I. V. Ledenyova, V. V. Didenko, A. S. Shestakov, Kh. S. Shikhaliev. J Heterocyclic. Chem. – 2013. – Vol. 50. – P. 573 - 578.

22. Partridge M. W., Stevens M. F.G. J. Chem. Soc.(C). – 1966. – Vol.12. – P.1127.

23. Elnagdi M.H., Elmoghayar M.R.H. J. Heterocycl.Chem. – 1977. –Vol.14. – P. 227.

24. Joshi K. C., Dubey K. Ind. J. Chem. – 1979. – Vol.17B – P.52.

25. A. G. A. Elagamey, F. M. A. El - Taweel, F. A. Amer. Collect. Czech. Chem. Commun – 1986. – Vol. 51. – P. 2193.

26. N.A. Hamdy, H.A. Abdel - Aziz, A.M. Farag, I.M.I. Fakhr. Monatsh. Chem. – 2007. – Vol. 138, N 10. – P. 1001 - 1010.

27. Пат. 6960583 США, МПК[7] C 07 D 487 / 04. Pyrazolotriazines as CRF antagonists. / Gilligan P. J., Wilde R. G.; Bristol - Myers Squibb Co. – № 10 / 803115; Заявл. 18.03.04; Опубл. 01.11.05; НПК 514 / 243.

28. F. El - Mariah, M. Hosny, A. Deeb. Phosph., Sulfur and Silicon and Relat. Elem. – 2006. – Vol. 181, N 11. – P. 2505 - 2517.

29. F. Karcı. Dyes and Pigments. – 2008. – N 76. – P. 97 - 103.

30. E. J. Gray, M. F. G. Stevens, G. Tennant, R. J. S. Vevers, J. Chem. Soc., Perkin Trans.1. – 1976. – N14. – P.1496.

31. E. Mohr. J. Prakt. Chem. – 1914. – Bd. 90. – S. 223.

32. Y. Ahmad, P. A. S. Smith. J. Org. Chem. – 1971. – Vol. 36. – P. 2972.

33. И. В. Леденева, В.В.Диденко, Х. С. Шихалиев. Химия гетероциклических соединений. – 2014. - №9. –С.1318 - 1349.

34. J. Farras, E. Fos, R. Ramos, J. Vilarrasa. J. Org. Chem. – 1988. – Vol. 53. – P. 887.

35. Л. М. Миронович, М.В. Костина. Химия гетероциклических соединений. – 2011. – №10. – С.1555 - 1559.

36. В. Н. Брицун, А. Н. Есипенко, М. О. Лозинский, Укр. хим. журн. – 2007. – 73, № 4 – С. 114.

37. В. Н. Брицун, И. М. Базавова, А. Н. Есипенко, М. О. Лозинский. Химия гетерцикл. соединений. – 2003. – С.1844.

38. A. A. El - Barbary, M. A. El - Badawi, Y. M. Loksha. J. Heterocyclic Chem. – 2001. – Vol.38. – P. 711.

39. Mullick P., Khan S.A., Begum T., Verma S., Kaushik D., Alam O. Acta Pol. Pharm. Drug Res. – 2009. – № 66. – P. 379 - 385.

40. Mojzych M., Rykowski A., Wierzchowski J. Molecules. – 2005. – № 10. – P.1298 - 1306.

41. S. Singh, K. Husain, F. Athar, A. Azam. European Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2005. – № 25. – P. 255 - 262.

42. Миронович Л.М., Костина М.В. Журнал органической химии. – 2011. – Т.47, № 12. – С.1878 - 1879.

43. Миронович Л.М., Костина М.В., Божок А.В. Журнал органической химии. – 2012. - Т.48, № 9. – С.1227 - 1229.

44. Миронович Л.М., Щербинин Д.В. Журнал органической химии. – 2015. – Т. 51, №2. – С. 302 - 304.

45. Миронович Л.М., Костина М.В., Подольникова А.Ю. // Журнал органической химии. – 2013. – Т 49, №5. – С. 775 - 777.

46. Миронович Л.М., Щербинин Д.В. Журнал органической химии. – 2014. – Т 50, № 12. – С. 1876 - 1878.

47. Л. М.Миронович, А.Ю.Подольникова. Журнал органической химии. – 2016. – Т.52, Вып.3. – С.460 - 462.

48. Миронович Л.М., Щербинин Д. В. Журнал органической химии. – 2014. – Т. 50, №7. – С.1085 - 1086.

49. Миронович Л.М., Подольникова А.Ю. Журнал общей химии. – 2014. – Т 84, №12. – С. 2064 - 2066 .

50. Л. М.Миронович, П.В.Афанасьев, А.Ю.Подольникова. Известия ВУЗ. Химия и химическая технология. – 2016. – Т.59, вып.3. – С.74 - 78.

51. Миронович Л.М., Подольникова А.Ю. Журнал органической химии. – 2015. – Т 51, №3. – С. 411 - 414.
52. Миронович Л.М., Костина М.В., Подольникова А.Ю. Журнал органической химии. – 2013. – Т 49, №5. – С. 775 - 777.
53. Миронович Л.М., Костина М. В. Журнал общей химии – 2013 – Т. 83, №1 – С.161 - 163.
54. Л.М. Миронович, Д.В. Щербинин. Журнал органической химии. – 2016. – Т.52. № 2. – С. 310 - 312.
55. M. Mojzych, Z. Karczmarzyk, A. Rykowski. Journal of Chemical Crystallography. – 2005. – № 2. – P. 151 - 155.
56. A. Deeb, M. Kotb. Heterocycles. – 2004. – Vol.63, № 5. – P.1143 - 1151.
© Л.М.Миронович, С.И.Иванов, 2017

УДК 621

В.Г. Сазыкин
Д.т.н., профессор кафедры применения электрической энергии
А.Г. Кудряков
К.т.н., доцент кафедры применения электрической энергии
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина
г. Краснодар, Российская Федерация

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ 6–10 кВ АПК

Аннотация
Рассмотрено состояние электрических сетей сельскохозяйственного назначения. Проанализированы направления повышения надежности линий электропередачи за счет установки секционирующих реклоузеров. Определена методика выбора места расположения реклоузеров. Приведены необходимые расчеты.
Ключевые слова
Реклоузер, децентрализованное управление, распределительная электрическая сеть, агропромышленный комплекс.

1 Секционирование воздушных линий

На базе агропромышленного комплекса (АПК) формируется и реализуется программа национальной продовольственной безопасности. Высокая степень интеграции агропромышленного производства и повышение его интенсивности привели к тому, что в настоящее время любая деятельность АПК практически невозможна без электроэнергии и зависит от безопасного, надежного и качественного электроснабжения [8]. Традиционно наиболее слабым звеном в системе электроснабжения являются воздушные распределительные сети 6–10 кВ – последний этап на пути электрической энергии к потребителю. Протяженность воздушных линий 6–10 кВ в России составляет более 1,5

млн. км – почти 45 % от общей протяженности линий электропередачи (ЛЭП) 0,4–110 кВ. Около 70 % всех нарушений электроснабжения происходит именно в сетях данного класса напряжения [3, 4].

На сегодняшний день около 40 % ЛЭП выработали нормативный ресурс и более 80 % нуждаются в техническом перевооружении. По данным различных источников, длительность отключений потребителей составляет порядка 70 ч в год на один фидер, что на два порядка выше, чем в технически развитых западных странах. Среднее число повреждений, вызывающих отключения ВЛ напряжением до 35 кВ, составляет 25 и более единиц на 100 км ЛЭП в год [3, 7].

Распределительные электрические сети (РЭС) напряжением 6–10 кВ по классификации относятся к электроустановкам среднего второго напряжения (СН - 2). Воздушные линии (ВЛ) СН - 2 в большинстве случаев построены по радиальному принципу с древовидной конфигурацией (рис. 1). Для повышения надежности электроснабжения на ВЛ при наличии возможности осуществляется секционирование – создаются резервные связи, выполненные в большинстве случаев с помощью *разъединителей QS* линейных с ручным приводом (РЛР) или *пунктов секционирования* (ячеек распределительных устройств с выключателями). Силовые коммутационные аппараты $Q_{ЦП}$ (маломасляные, вакуумные, элегазовые выключатели), управляемые устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА), устанавливаются в центрах питания (ЦП) на шинах СН - 2 районных подстанций (ПС) напряжением 35–110 / 6–10 кВ. В нормальном режиме работы часть секционных аппаратов находится в отключенном состоянии и РЭС имеют радиальную структуру, подключенную одному ЦП [1, 2, 4].

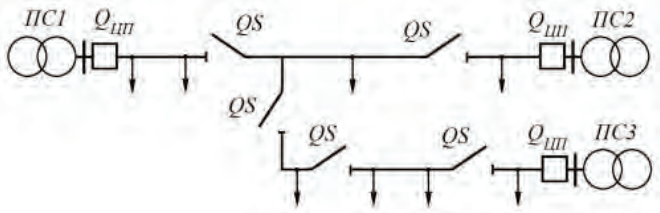


Рисунок 1. Схема секционирования распределительных сетей

Возможно несколько вариантов технической реализации и управления секционированием ВЛ.

1. *Централизованное секционирование* – управление секционированием, связанное с работой секционных разъединителей *QS* или пунктов секционирования, зависящее от решений диспетчера РЭС. Централизованное секционирование при управлении аварийным режимом РЭС подразделяется на *ручное* и *дистанционное*.

Централизованное ручное управление осуществляется по следующему алгоритму. При возникновении короткого замыкания (КЗ) на любой точке *K* ВЛ (рис. 2) происходит отключение выключателя $Q_{ЦП}$ на отходящем фидере и поврежденная ЛЭП обесточивается на длительное время. Для отыскания и локализации повреждения на отключенный фидер выезжает оперативная бригада и путем последовательных переездов и переключений

разъединителей *QS* вручную выделяет поврежденный участок ВЛ, отключая его с помощью РЛР. После этого включается секционный аппарат Q_C, подключающий оставшиеся неповрежденные участки сети к сетевому резерву другому ЦП.

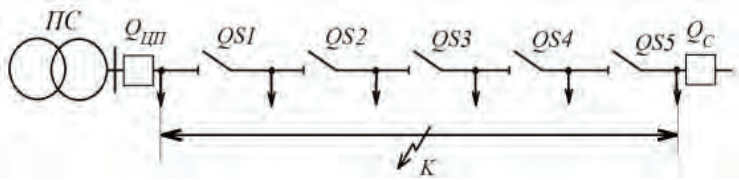


Рисунок 2. Схема секционирования участков РЭС
с помощью разъединителей *QS* и пункта секционирования Q_C

Подобный вариант схемной организации требует большого количества техники, персонала и времени для восстановления электроснабжения. Перерыв в электроснабжении отключенных потребителей может составлять от нескольких часов до суток.

Часть недостатков рассмотренного варианта устраняются схемой *дистанционного управления*. Для этого вместо РЛР устанавливаются телеуправляемые разъединители (ТЛР) или пункты секционирования с дистанционным управлением (рис. 3). Алгоритм локализации КЗ аналогичен предыдущему, однако, при этом все переключения в сети выполняются дистанционно без выезда оперативной бригады.

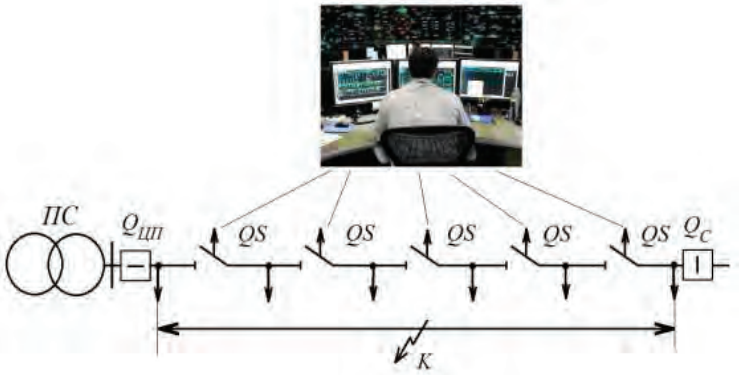


Рисунок 3. Централизованное управление режимами коммутации в РЭС

Явным преимуществом дистанционного управления является сокращение времени и затрат на локализацию повреждения участка сети. При этом существенным недостатком является необходимость обеспечения гарантированной связи диспетчера с каждым управляемым элементом РЭС. При выходе из строя канала связи РЭС становится неуправляемой и все преимущества телемеханизации разъединителей пропадают.

В рассмотренных вариантах управления при локализации аварийного повреждения большую роль играет человеческий фактор: решение о переключениях принимается

диспетчером, которому необходимо проанализировать схему повреждения и правильно принять решение о послеаварийной реконфигурации РЭС.

2. *Децентрализованное управление* позволяет устранить недостатки централизованного секционирования. При этом обеспечивается полная независимость работы коммутационных аппаратов в сети и пунктов секционирования от внешнего управления в послеаварийном режиме РЭС.

Важным фактором для РЭС становится замена РЛР и ТЛР коммутационными аппаратами со встроенной релейной защитой и сетевой автоматикой. В настоящее время такими коммутационными аппаратами являются реклоузеры [1, 2, 7].

Реклоузер Q_R, являясь интеллектуальным коммутационным устройством, анализирует режимы работы РЭС и автоматически производит ее реконфигурацию в послеаварийных режимах, осуществляя локализацию места повреждения и восстановление электроснабжения потребителей неповрежденных участков ЛЭП (рис. 4). В качестве пункта секционирования выступает реклоузер Q_{ABP}, выполняющий функцию автомата включения резерва (АВР).

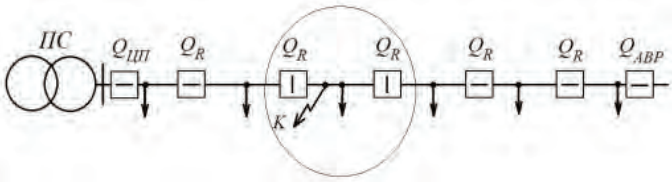


Рисунок 4. Децентрализованное управление послеаварийным режимом работы сети: Q_R – секционирующий реклоузер; Q_{ABP} – АВР – реклоузер

Существующая телемеханика ЛЭП не мешает выполнению основных функций пунктов секционирования в аварийных и послеаварийных режимах и носит вспомогательный характер (оперативное управление, контроль параметров сети и т.д.), а, следовательно, требования к надежности каналов связи понижаются. Диспетчер получает отображение реконфигурации сети на мнемосхеме – локализованный участок ЛЭП, все переключения и переключения выполнены автоматически, без его участия. Задача диспетчера – это направить на поврежденный участок ремонтную бригаду.

Преимуществом децентрализованного подхода является быстрое автоматическое отключение короткого замыкания и локализация повреждения. Время восстановления питания на неповрежденных участках ЛЭП за счет РЗА реклоузеров сокращается до секунд, как следствие, снижается ущерб потребителям от недоотпуска электрической энергии.

2 Основные функции реклоузеров

Реклоузеры, реализующие децентрализованный подход, выполняют функции пунктов секционирования, имея в своем составе [7]:

- высоконадежный коммутационный аппарат с малым временем включения и отключения и значительным коммутационным ресурсом, способный нормально функционировать при многократных циклах АПВ;

- встроенную измерительную систему токов и напряжений для реализации необходимых функций защит и автоматики и контроля параметров режимов работы электрической сети;

- многофункциональную систему микропроцессорной РЗА с возможностью независимой работы с разными уставками при любых направлениях потока мощности и малыми ступенями селективности (0,1–0,2 с);

- систему самодиагностики и ведения журналов оперативных и аварийных событий в сети для анализа состояния самого аппарата и процессов, происходящих в линиях;

- надежную необслуживаемую систему бесперебойного питания от нескольких независимых источников;

- широкие возможности внешних коммуникаций, коммуникационные интерфейсы, поддержку международных протоколов передачи информации.

Вакуумный реклоузер представляет собой совокупность вакуумного коммутационного модуля Q_R со встроенной системой измерения токов *TA* и напряжения *TV*, а также шкафа управления с микропроцессорной системой релейной защиты и автоматики (рис. 5).

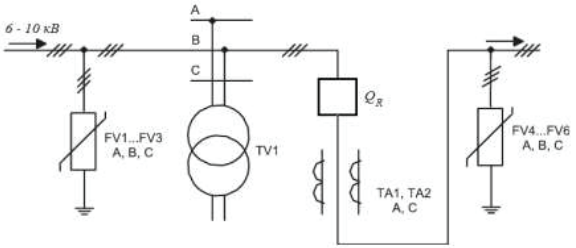


Рисунок 5. Принципиальная схема главных цепей секционирования ВЛ 6–10 кВ с односторонним питанием

Принципиальная электрическая схема включения реклоузера в РЭС определяется схемой электрической сети. Организация оперативного питания реклоузера предусматривается установку одного или двух трансформаторов собственных нужд *TV* мощностью не менее 200 В·А. Для защиты от перенапряжений используются ограничители перенапряжений *FV* наружной установки.

Реклоузер выполняет следующие операции: оперативные переключения в распределительной сети (местная и дистанционная реконфигурация); автоматическое отключение поврежденного участка; автоматическое повторное включение линии (АПВ); автоматическое выделение поврежденного участка; автоматическое восстановление питания на неповрежденных участках ЛЭП – АВР; автоматический сбор, обработку и передачу информации о параметрах режимов работы ЛЭП и состоянии собственных элементов.

Возможны различные алгоритмы функционирования реклоузеров для организации децентрализованного управления аварийными режимами работы распределительных сетей.

1. *Секционирование радиальной линии с односторонним питанием* с установкой реклоузеров на магистральном участке (рис. 5, 6). Сетевой резерв отсутствует. При возникновении КЗ в точке *K* срабатывает ближайший к месту повреждения реклоузер,

отключая следующие за ним участки сети. Схема эффективна в условиях значительной протяженности магистрали и невозможности обеспечить резервное питание. Подобная расстановка реклоузеров позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей, находящихся ближе к центру питания.

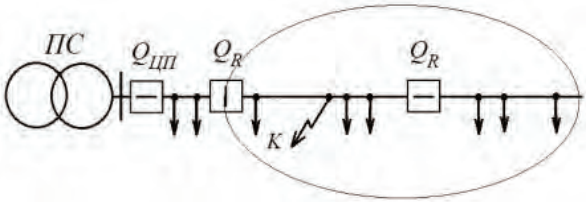


Рисунок 6. Секционирование РЭС с односторонним питанием

2. *Секционирование радиальной линии с двухсторонним питанием* организуется путем дополнительной установки на магистрали реклоузера Q_{ABP}, выполняющего функцию пункта АВР (рис. 4). При этом в случае возникновения короткого замыкания на любом из участков РЭС оно будет автоматически локализовано между двумя ближайшими реклоузерами, а потребители неповрежденных участков будут получать питание от двух источников (рис. 7). Схема эффективна для обеспечения высокой степени надежности электроснабжения потребителей целого фидера. В данном случае в реклоузерах используются направленные защиты, что позволяет также производится контроль напряжения на пункте АВР.

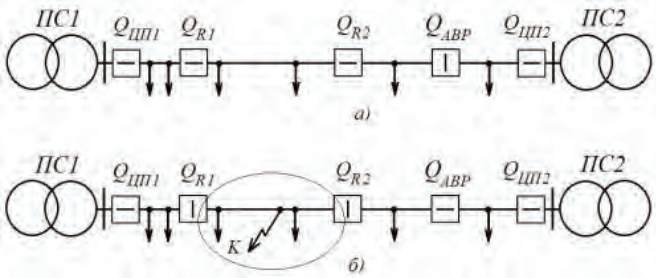


Рисунок 7. Секционирование РЭС с двухсторонним питанием:
а – нормальный режим; *б* – послеаварийный режим

Принцип действия реклоузеров состоит в следующем (действие АПВ не рассматривается). Например, КЗ произошло в точке *К*:

1) отключается реклоузер Q_{R1}, при этом головной выключатель $Q_{ЦП1}$ центра питания *ПС1* не отключается, поскольку уставка времени стабатывания релейной защиты, управляющей этим выключателем, больше уставки Q_{R1};

2) отключается реклоузер Q_{R2} под действием релейной защиты от минимального напряжения;

3) нормально отключенный реклоузер Q_{ABP} включается в соответствии с режимом работы релейной защиты от минимального напряжения.

Принципиальная электрическая схема включения реклоузера в РЭС с двухсторонним питанием (рис. 8) определяется функциональным назначением реклоузера: *секционированием* и / или *АВР* ВЛ 6–10 кВ (рис. 8, *а*) или только *секционированием* ВЛ 6–10 кВ (рис. 8, *б*).

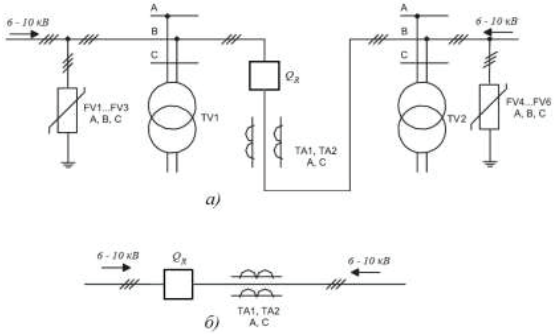


Рисунок 8. Принципиальная схема главных цепей секционирования ВЛ 6–10 кВ с двухсторонним питанием: *а* – полная схема; *б* – упрощенная схема без разрядников *FV* и трансформаторов напряжения *TV*

Поврежденный участок между реклоузерами Q_{R1} и Q_{R2} изолирован за меньшее время, чем при централизованной автоматике, когда для тех же целей применяются выключатели $Q_{ЦП}$ и их РЗА. При выполнении противоаварийных операций каналы связи не требовались. Диспетчерские каналы связи могут быть использованы для восстановления системы, а также для измерений или диагностики системы во время планового восстановления нормального режима работы ЛЭП.

3. *Другие схемы применения*. Реклоузер может также использоваться в качестве: головного выключателя на открытых распределительных устройствах и распределительных пунктах; средства для реализации сетевого резервирования (рис. 9); подключения новых потребителей при проблемах с субабонентами; в устройствах плавки гололеда на ВЛ.

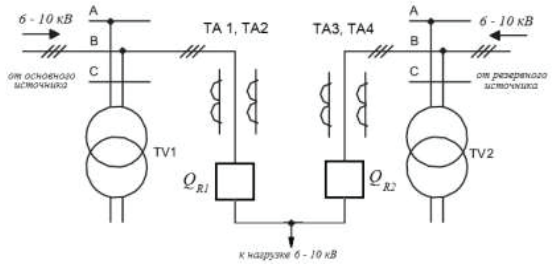


Рисунок 9. Принципиальная схема главных цепей сетевого резервирования

Реклоузеры снабжаются эффективными средствами РЗА и обладают широкими возможностями по диагностике параметров режимов работы РЭС. Способность интегрироваться в системы телемеханики позволяют применять реклоузеры для решения самых различных задач автоматизации аварийных режимов и управления распределительными сетями. В РЭС сетевых компаний наиболее целесообразны схемы секционирования ЛЭП с односторонним и двухсторонним питанием, требующие до 3–5 реклоузеров.

Для выбора схем автоматики используются традиционные подходы к расчету уставок РЗА. При двухстороннем питании необходимо использовать направленные защиты реклоузера с разными уставками в зависимости от направления потока мощности. Ступень селективности РЗА реклоузеров в пределах 0,1–0,2 с позволяет в большинстве случаев использовать стандартный ступенчатый принцип согласования защит по времени. В сложных случаях, например при малой выдержке времени защиты на головном участке, для селективной работы реклоузеров могут быть использованы специальные алгоритмы работы РЗА.

Основной эффект от применения реклоузеров в рассматриваемых случаях является снижение недоотпуска электрической энергии потребителям и, как следствие, снижение возможного искового требования потребителей за невыполнение обязательств сетевой компании. Сокращение времени поиска и локализации повреждения, а также выделение участка меньшей длины позволяет оптимизировать работу оперативного персонала.

3 Выбор мест установки реклоузеров. Общий подход

Выбор мест установки реклоузеров в РЭС состоит из следующих основных этапов: определение назначения установки реклоузеров; выбор варианта применения; выбор критерия оптимизации установки; оптимизация мест установки.

Определение назначения установки реклоузеров в сети может преследовать следующие цели: подключение новых потребителей; разграничение балансовой принадлежности; оптимизацию процесса резервирования потребителей; повышение надежности электроснабжения всех потребителей фидера в целом; повышение надежности электроснабжения отдельного потребителя или группы потребителей; оптимизацию процесса и сокращение затрат на поиск повреждения на линии; построение распределительных пунктов и распределительных устройств.

Выбор варианта применения в соответствии с назначением установки реклоузеров в РЭС выбирается вариант применения согласно п. 2 и [2, 5, 7]: секционирование в сети с односторонним питанием; секционирование в сети с сетевым резервом; секционирование с применением плавких предохранителей; разборка и сборка сети; открытое распределительное устройство; надежность электроснабжения отдельного потребителя; установка на границе балансовой принадлежности.

На выборе критерия оптимизации установки реклоузера и оптимизации мест установки необходимо остановиться для более подробного рассмотрения.

4 Выбор критерия оптимизации установки реклоузера

В зависимости от условий установки и выбранного варианта применения реклоузера часто возникает необходимость определения оптимальных мест расположения в ЛЭП. К таким случаям относятся задачи установки реклоузеров для повышения надежности электроснабжения потребителей. Для решения рассматриваемой многовариантной задачи

необходимо определение критерия оптимизации. Таким критерием является минимизация соответствующих показателей надежности после установки реклоузеров [1, 2, 4, 5, 7]: суммарный годовой недоотпуск электрической энергии; количество и длительность отключений потребителя или группы потребителей.

Суммарный годовой недоотпуск электрической энергии (ΔW_{HO}) используется в случае необходимости обеспечения повышения надежности потребителей фидера в целом. При этом оптимизация заключается в минимизации показателя по сети в целом. Целевая функция суммарного годового недоотпуска для сети записывается в виде [2, 7]:

$$\Delta W_{HO} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot L \cdot P_p \to \min, \quad (1)$$

$$P_p = S_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot k_3, \quad (2)$$

где ΔW_{HO} – годовой недоотпуск электроэнергии (кВт·ч / год); ω_0 – удельная частота повреждений ВЛ 6–10 кВ, единиц на 100 км в год; T – среднее время восстановления одного устойчивого повреждения, ч; L – длина участка линии, км; P_p – расчетная активная мощность нагрузки, кВт; $S_{ном}$ – полная номинальная мощность нагрузки, кВ·А; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; k_3 – коэффициент загрузки.

Количество и длительность отключений потребителя или группы потребителей ($\omega_П$, $T_П$) используются при адресном повышении надежности электроснабжения. Оптимизация заключается в минимизация показателей в отношении конкретного потребителя или группы потребителей. Показатели рассчитываются отдельно для потребителей в пределах одного участка между реклоузерами по выражениям [2, 7]:

$$\omega_П = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot L \to \min, \quad (3)$$

где $\omega_П$ – количество отключений потребителя в год, 1 / год.

$$T_П = \omega_П \cdot T \to \min, \quad (4)$$

где $T_П$ – длительность отключения потребителя в год, ч / год.

5 Методика расчета показателей надежности

Сравнение показателей надежности при различных вариантах установки реклоузеров проводится с базовым вариантом сети с установленными в ней коммутационными аппаратами или модель ВЛ 6–10 кВ с электромеханической РЗА, однократным АПВ в центрах питания и ручными разъединителями в ЛЭП (рис. 2).

Для выполнения расчета показателей надежности необходимо определить следующие исходные данные:

1) наличие в сети автоматических пунктов секционирования для корректировки базового варианта схемы сети;

2) наличие АПВ для определения степени влияния установки реклоузеров на количество отключений ЛЭП;

3) удельная частота повреждений ω_0 – значение устойчивых отключений на 100 км в ЛЭП, на которой планируется установка реклоузеров. Около 80 % повреждений в воздушных распределительных сетях, по своей природе являются неустойчивыми, поэтому целесообразно применять АПВ. Статистика показывает, что успешность первого цикла АПВ сокращает общее количество отключений на 60 % . В существующих распределительных сетях роль первого цикла АПВ, как правило, выполняет оперативная

бригада, которая производит первое пробное включение выключателя в центре питания при его аварийном отключении. Децентрализованная система секционирования двукратного АПВ позволяет в среднем сократить количество отключений еще на 20 % и на 25 % при трехкратном АПВ. Для оценки дополнительного эффекта в расчетные формулы показателей надежности вводится коэффициент $k_{НУ}$. Тогда выражения для расчета показателей надежности примут вид:

$$\Delta W'_{НО} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{НУ}) \cdot T \cdot L \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot k_З ; \quad (5)$$

$$\omega'_{П} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{НУ}) \cdot L ; \quad (6)$$

$$T'_{П} = \omega_{П} \cdot T , \quad (7)$$

где $k_{НУ}$ – коэффициент, учитывающий влияние децентрализованной системы секционирования линий на количество аварийных отключений. В практических расчетах $k_{НУ}$ может принимать следующие значения [7]:

- $k_{НУ}$= 0 – в исходной сети без реклоузеров и если в сети, где планируется установка реклоузеров, уже имеется АПВ или количество циклов АПВ на реклоузерах, в соответствии с принятым алгоритмом работы, равно количеству циклов АПВ на головном выключателе;

- $k_{НУ}$= 0,2 – если на реклоузере используется двукратное АПВ, а на головном выключателе АПВ однократное или выполняется вручную;

- $k_{НУ}$= 0,25 – если на реклоузере реализовано трехкратное АПВ;

4) среднее время восстановления электроснабжения T – среднее время, затрачиваемое на восстановление электроснабжения потребителей при одном устойчивом повреждении;

5) нагрузки потребителей и средние коэффициенты загрузки трансформаторных пунктов ТП 6–10 / 0,4 кВ;

6) протяженности магистральных участков ЛЭП и ответвлений.

Для расчета показателей надежности электроснабжения потребителей до и после установки реклоузеров необходимо представлять, каким образом автоматическое секционирование ЛЭП с применением реклоузеров может повлиять на эти показатели. Из выражений (1)–(3) видна линейная зависимость недоотпуска электрической энергии, количества и длительности отключений от составляющих: ω_0 – удельной частоты повреждений ЛЭП в год; T_{Σ} – общего времени восстановления электроснабжения в год; $T \cdot L \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot k_З$ – значения отключаемой нагрузки при одном отключении на участке длиной L.

Оценим возможное влияние автоматического секционирования реклоузеров на рассматриваемые составляющие и, как следствие, на показатели надежности электроснабжения потребителей.

Общее время восстановления электроснабжения. Процесс восстановления электроснабжения потребителей в существующих РЭС разделяют на несколько характерных этапов:

1) от момента отключения линии до начала поиска – время, через которое диспетчеру поступит информация о наличии повреждения в ЛЭП;

2) поиск поврежденного участка – первое пробное включение выключателя $Q_{ЦП}$ (рис. 2.2) в центре питания (ручное повторное включение) и после этого последовательные переезды и ручные переключения разъединителей *QS* на линии до момента нахождения поврежденного участка (отключение *QS*4 – включение $Q_{ЦП}$ – $Q_{ЦП}$ отключается –

отключение *QS*3 – включение $Q_{ЦП} - Q_{ЦП}$ отключается – отключение *QS*2 – включение $Q_{ЦП} - Q_{ЦП}$ остается включенным – поврежденный участок найден);

3) локализация поврежденного участка – включение разъединителей между участком с повреждением и сетевым резервом (отключение $Q_{ЦП}$ – включение *QS*4);

4) включение потребителей неповрежденных участков – ввод сетевого резерва (включение Q_C с подачей питания до *QS*2);

5) обход поврежденного участка – поиск непосредственно места повреждения на локализованном участке;

6) ремонт поврежденного участка – выполнение ремонтных работ в зависимости от вида повреждения.

Общее время восстановления электроснабжения колеблется от 3 до 10 и более часов. При этом около 60 % времени тратится на поиск и локализацию поврежденного участка (этапы 1–4) и только 40 % – непосредственно на выполнение ремонтных работ (этапы 5–6).

При внедрении децентрализованной автоматизации (рис. 4) выделение участка повреждения и включение резервного питания происходит автоматически, за считанные секунды. Таким образом, общее время восстановления электроснабжения фактически сокращается до величины времени, затрачиваемого непосредственно на обход и ремонт поврежденного участка. Количественно оценить этот эффект достаточно сложно, поскольку требуется значительный объем исходной информации: принятый алгоритм переездов оперативных бригад при локализации поврежденного участка, рельеф местности и средние скорости передвижения оперативных бригад. Поэтому для укрупненных расчетов эффективности можно оперировать средним показателем – 40 % . Для оценки эффекта в расчетных выражениях (2)–(4) вводится дополнительный коэффициент k_{BB}. Выражения для расчета показателей надежности примут вид:

$$\Delta W_{HO}^{//} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{HУ}) \cdot T \cdot k_{BB} \cdot L \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot k_З ; \quad (8)$$

$$\omega_П^{//} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{HУ}) \cdot L ; \quad (9)$$

$$T_П^{//} = \omega_П \cdot T \cdot k_{BB} , \quad (10)$$

где k_{BB} – коэффициент, учитывающий влияние децентрализованной системы секционирования на общее время восстановления электроснабжения.

На *значение отключенной нагрузки* (8) наиболее существенное влияние оказывает децентрализованная автоматизация. В расчетах показателей надежности этот эффект оценивается путем определения количества отключаемой нагрузки при повреждениях на отдельных участках между реклоузерами. За счет того, что в ремонт автоматически выводится конкретный участок сети, степень влияния повреждения на потребителей ограничена установленными в сети коммутационными аппаратами Q_R (рис. 4).

6 Расчет показателей надежности РЭС

Использование методики расчета показателей надежности РЭС целесообразно проиллюстрировать на типичных примерах различных вариантов автоматического секционирования РЭС.

1. *Схема местного секционирования линии с двухсторонним питанием с помощью разъединителей (базовый вариант, используемый для сравнения).* Пусть известны следующие исходные данные по исследуемой сети (рис. 10):

- на каждой отпайке длиной $L_{отп} = 2$ км находится по два трансформаторных пункта 10 / 0,4 кВ;
- номинальная мощность каждого ТП $S_{ном} = 160$ кВ·А;

- средние коэффициенты загрузки трансформаторных пунктов $\cos\varphi = 0{,}85$; $k_З = 0{,}735$, тогда расчетная мощность каждого ответвления будет равна $P_{ротв} = 2 \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot k_З = 200$ кВт;

- протяженность ЛЭП по магистрали – $L_{маг\Sigma} = 15$ км;

- протяженность магистрального участка ЛЭП между секционирующими устройствами SQ – $L_{маг} = 5$ км;

- удельная частота повреждений – $\omega_0 = 40$ единиц на 100 км [3];

- среднее время восстановления электроснабжения – $T = 6$ часов.

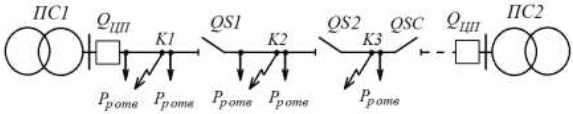


Рисунок 10 – Базовый вариант схемы местного секционирования фидера с помощью разъединителей: *QSC* – разъединитель сетевого резерва

Вероятность отключения потребителей по всей протяженности фидера одинакова поскольку при КЗ в любой из точек *K1*, *K2* или *K3* релейная защита отключает головной выключатель $Q_{ЦП}$ центра питания *ПС1* и электроснабжение прекращается для всех потребителей. Вероятность или количество отключений фидера определяется его суммарной протяженностью (15 км по магистрали и 10 км по ответвлениям). Показатели надежности электроснабжения потребителей практически не зависят от принадлежности к отдельным участкам ЛЭП и также определяются из вероятности повреждения всего фидера.

Годовой недоотпуск электроэнергии согласно (1) составит:

$$\Delta W_{НО} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot (L_{отв} + L_{маг}) \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{ротвi} \quad . (11)$$

$$\Delta W_{НО} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 6 \cdot (5 \cdot 2 + 15)[(200 + 200) +$$
$$+ (200 + 200) + 200] = 60000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Количество отключений потребителя в год согласно (3):

$$\omega_П = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot (L_{отв} + L_{маг}) = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (10 + 15) = 10 \text{ год}^{-1}.$$

Длительность отключения потребителя в год по (4):

$$T_П = \omega_П \cdot T = 10 \cdot 6 = 60 \text{ ч/год}.$$

2. *Последовательное секционирование РЭС с односторонним питанием и использованием реклоузеров* (рис. 11). Для исследования использованы основные исходные данные из первого примера. Фидер разделен на три участка установленными автоматическими реклоузерами Q_{R1}, Q_{R2}.

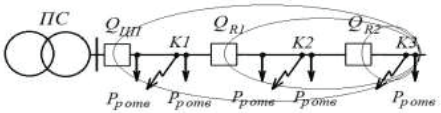


Рисунок 11 – Схема последовательного секционирование ЛЭП с односторонним питанием

В рассматриваемой схеме вероятность отключения потребителей определяется вероятностью возникновения повреждения на каждом отдельном участке. При анализе не будем учитывать влияния децентрализованной системы секционирования на количество отключений и на время восстановления электроснабжения.

При КЗ на участке от головного выключателя $Q_{ЦП}$ центра питания *ПС* до реклоузера Q_{R1} (точка *К1*) электроснабжение, как и в первом примере, теряют все потребители. При КЗ на участке от Q_{R1} до Q_{R2} (точка *К2*) отключатся только потребители, расположенные за реклоузером Q_{R1}, и в случае КЗ на участке за Q_{R2} (точка *К3*) питание сохранят все потребители, за исключением потребителей третьего участка.

Следовательно, при последовательном секционировании линии с односторонним питанием надежность потребителей отдельных участков уже не одинакова и тем выше, чем ближе секционированный участок, на котором находится потребитель, к центру питания.

Показатели надежности необходимо учитывать отдельно по каждому *j* - участку, а суммарный недоотпуск электрической энергии определяется как сумма недоотпусков при КЗ на разных участках линии.

Годовой недоотпуск электроэнергии согласно (1) составит:

$$\Delta W_{НО} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot \{\sum_{j=1}^{m}(L_{отвj} + L_{магj}) \cdot [\sum_{i=1}^{n} P_{ротвi}]\}. \quad (12)$$

$$\Delta W_{НО} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 6 \cdot \{(4+5)[(200+200)+(200+200)+200)] +$$

$$+ (4+5)[(200+200)+200] + (2+5)200\} = 37920 \ кВт \cdot ч/год.$$

Количество отключений потребителя в год согласно (3) и длительность отключения потребителя в год по (4) на отключаемых *j* - участках сети составит:

$$\omega_{П} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot \sum_{j=1}^{m} (L_{отвj} + L_{магj}). \quad (13)$$

$$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (5+4) = 3{,}6 \ год^{-1}; \ T_{П1} = \omega_{П1} \cdot T = 3{,}6 \cdot 6 = 21{,}6 \ ч/год.$$

$$\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot [(4+5)+(4+5)] = 7{,}2 \ год^{-1}; \ T_{П2} = 7{,}2 \cdot 6 = 43{,}2 \ ч/год.$$

$$\omega_{П3} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot ((4+5)+(4+5)+(2+5)) = 10 \ год^{-1}; \ T_{П3} = 10 \cdot 6 = 60 \ ч/год.$$

Полученные результаты показывают, что недоотпуск электрической энергии по сети в целом снизился по сравнению с базовым вариантом в 1,58 раза. При этом показатели надежности электроснабжения конкретных потребителей изменились не одинаково. Для потребителей первого участка общее количество и длительность отключений снизились в 2,8 раза, второго – в 1,4 раза, а для третьего остались прежними.

3. *Последовательное секционирование реклоузерами линии с двухсторонним питанием.* В этой схеме (рис. 12) имеется возможность автоматически включить резервное питание от независимого источника – смежной подстанции *ПС2*. При возникновении короткого замыкания в любой точке сети оно будет автоматически локализовано в пределах одного участка.

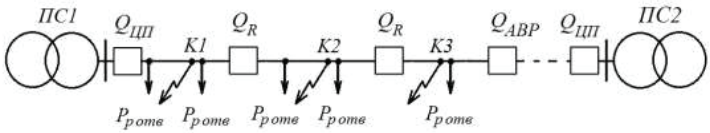


Рисунок 12 – Схема последовательного секционирование линии
с двухсторонним питанием с помощью реклоузеров: $Q_{АВР}$ – реклоузер АВР

В отличие от предыдущего примера появление КЗ на одном участке не влияет на надежность электроснабжения потребителей смежных участков. По сравнению с базовым вариантом вероятность отключения потребителей в пределах одного участка определяется не общей протяженностью фидера, а длиной отдельного j - участка между двумя реклоузерами.

Годовой недоотпуск электроэнергии согласно составит:

$$\Delta W_{HO} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot [\sum_{j=1}^{m} (L_{отв\,j} + L_{маг\,j}) \cdot P_{отв\,j}], \quad (14)$$

где $P_{отв\,j}$ – расчетная нагрузка j - участка.

$$\Delta W_{HO} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 6[(4+5) \cdot (200+200) + (4+5) \cdot (200+200) + (2+5) \cdot 200] = 20640 \ кВт \cdot ч / год.$$

$$\Delta W_{HO} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot L \cdot P_{ном} = 0{,}01 \cdot 10 \cdot 6 \cdot (5+4) \cdot (400+400) + 0{,}01 \cdot 10 \cdot 6 \cdot (5+4) \cdot (400+400) + 0{,}01 \cdot 10 \cdot 6 \cdot (5+2) \cdot 400 = 10320 \ кВт \cdot ч / год.$$

Количество отключений потребителя в год согласно (3) и длительность отключения потребителя в год по (4) на отключаемых j - участках сети составит:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (4+5) = 3{,}6 \ год^{-1}$; $T_{П1} = 3{,}6 \cdot 6 = 21{,}6 \ ч / год.$

$\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (4+5) = 3{,}6 \ год^{-1}$; $T_{П2} = 3{,}6 \cdot 6 = 21{,}6 \ ч / год.$

$\omega_{П3} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (2+5) = 2{,}8$ год$^{-1}$; $T_{П3} = 2{,}8 \cdot 6 = 16{,}8$ ч / год.

Результаты расчетов показывают, что недоотпуск электрической энергии снизился в 2,91 раза. При этом имеет место улучшение показателей надежности потребителей каждого секционированного участка фидера. В данном случае эффективность автоматического секционирования тем выше, чем меньше протяженность участка между двумя секционирующими устройствами. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета технической эффективности различных вариантов секционирования вариант секционирования

Вариант секционирования	Участок сети	Годовой недоотпуск, ΔW_{HO}, кВт·ч / год	Количество отключений потребителя, $\omega_П$, год$^{-1}$	Длительность отключения потребителя, $T_П$, ч / год
1. Ручное–местное	1 2 3	60000	10	60
2. Последовательное в сети с односторонним питанием	1 2 3	37920	3,6 7,2 10	21,6 43,2 60
3. Последовательное в сети с двухсторонним питанием	1 2 3	20640	3,6 3,6 2,8	21,6 21,6 16,8

Проведенные расчеты не учитывали влияния децентрализованной системы секционирования на количество и длительность отключений. Поэтому для определения реального эффекта результаты расчетов табл. 1 целесообразно уточнить, применяя коэффициенты $k_{НУ}$ и $k_{ВВ}$. Примем значение $k_{НУ} = 0{,}2$ в предположении наличия двукратного АПВ на реклоузерах и однократного АПВ в центре питания. Значение $k_{ВВ} = 0{,}6$ принимается в предположении 40 % эффективности. Пересчет результатов из табл. 1 проводится по выражениям (8)–(10). Результаты уточненных расчетов сведены в табл. 2.

Для сравнительной оценки эффективности между расчетным (*Р*) и базовым (*Б*) вариантами найдем относительное процентное значение показателей: $\Delta W_{отн}$, $\omega_{Потн}$ и $T_{Потн}$, определяемых по выражениям:

$$\Delta W_{отн} = \frac{\Delta W_Б - \Delta W_Р}{\Delta W_Б} 100\,, \%\,; (15)$$

$$\omega_{Потн} = \frac{\omega_{ПБ} - \omega_{ПР}}{\omega_{ПБ}} 100\,, \%\,; (16)$$

$$T_{Потн} = \frac{T_{ПБ} - T_{ПР}}{T_{ПБ}} 100\,, \%\,; (17)$$

В зависимости от выбранного варианта автоматического секционирования линий суммарный годовой недоотпуск электрической энергии по сети в целом снижается на 69,7–83,5 % . Из этого следует, что по сравнению с базовым вариантом (сеть с ручным местным секционированием) надежность электроснабжения по сети в целом повышается.

Таблица 2.2 – Уточненные результаты расчета технической результативности вариантов секционирования

Вариант секционирования	Участок сети	$\Delta W''_{НО}$, кВт·ч / год	$\Delta W_{отн}$, %	$\omega''_П$, год$^{-1}$	$\omega_{Потн}$, год$^{-1}$	$T''_п$, ч / год	$T_{Потн}$, %
1. Ручное–местное	1 2 3	60000	-	10	-	60	-
2. Последовательное в сети с односторонним питанием	1	18201,6	69,7	2,88	71,2	12,96	78,4
	2			5,76	42,4	25,92	56,8
	3			8	20	36	40
3. Последовательное в сети с двухсторонним питанием	1	9907,2	83,5	2,88	71,2	12,96	78,4
	2			2,88	71,2	12,96	78,4
	3			2,24	77,6	10,08	83,2

Результаты расчета показателей надежности электроснабжения потребителей отдельных участков РЭС показывают, что при различных вариантах автоматического

секционирования надежность электроснабжения конкретных потребителей изменяется не пропорционально изменению суммарного годового недоотпуска электрической энергии. В зависимости от выбранного критерия оптимизации следует придерживаться следующих подходов к выбору мест установки реклоузеров в сети.

1. При использовании в качестве критерия суммарного годового недоотпуска электрической энергии для целей повышения надежности электроснабжения потребителей фидера в целом целесообразно разделить линию на отдельные участки путем установки реклоузеров таким образом, чтобы произведения длины и нагрузки каждого отдельного участка были примерно равны между собой. Эффективность будет тем выше, чем меньше протяженность линии в пределах одного участка или чем больше количество секционированных участков РЭС.

2. При использовании в качестве критерия количества и длительности отключений конкретного потребителя или группы потребителей для адресного повышения надежности целесообразно устанавливать реклоузеры максимально приближенно к данному потребителю.

7 Определение оптимального места установки реклоузера в радиальной ВЛ

Одним из эффективных вариантов реконструкции радиальных сетей сельскохозяйственного назначения с целью повышения их надежности и снижения недоотпуска электроэнергии от повреждений является установка секционирующего реклоузера. Для протяженных линий с множеством ответвлений возникает задача определения места для оптимальной его установки. Поскольку каждая сеть имеет ряд индивидуальных особенностей, то подобную оптимизационную задачу для уяснения общего подхода удобно проиллюстрировать на типовом примере.

Рассмотрим воздушную РЭС напряжением 6–10 кВ со следующими техническими данными: линия получает электроэнергию от центра питания – районной подстанции ПС; головной выключатель $Q_{ЦП}$ отходящего от ПС фидера оснащен максимальной токовой релейной защитой и системой АПВ однократного действия; общая протяженность линии – 25 км; на каждом из i - ответвлений $L_{отвi} = 2$ км, разделяющих линию на пять равных магистральных участков $L_{магi} = 5$ км, установлены потребители мощностью $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 200$ кВт; удельная частота повреждений ВЛ 6–10 – $\omega_0 = 40$ единиц на 100 км в год; среднее время восстановления линии при повреждении – $T_L = 6$ час.; среднее время восстановления при повреждении одного магистрального участка линии с ответвлением – $T_{Li} = 1{,}2$ час.; устанавливаемый реклоузер снабжен максимальной токовой релейной защитой и системой АПВ двукратного действия.

Используем рассмотренные выше критерии оптимизации: минимум недоотпуска электроэнергии $\Delta W_{НО}$ при повреждениях линии (1); количество отключений потребителей $\omega_П$ (3); длительность их отключений $T_П$ (4).

Определим и сравним численные значения критериев при различных вариантах установки реклоузера в сети.

Рассмотрим варианты технических характеристик сети при установке реклоузера *после точки подключения* соответствующего ответвления.

1. *Реклоузер установлен за точкой присоединения ответвления 1*, разделяя ВЛ на две части (рис. 13). Первая часть линии L_1 защищена от короткого замыкания *К1* релейной

защитой, воздействующей на головной выключатель фидера $Q_{ЦП}$, вторая часть L_2 защищена от КЗ *К2* релейной защитой, воздействующей на выключатель реклоузера Q_R.

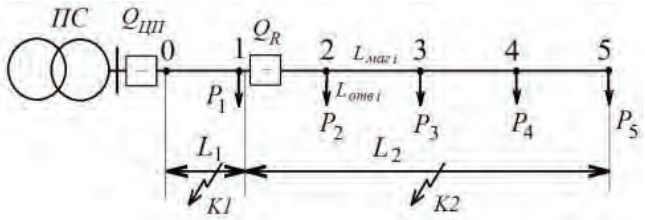


Рисунок 13 – Секционирующий реклоузер установлен за точкой 1

Недоотпуск электроэнергии при КЗ на участках L_1 и L_2 определяется согласно выражению (1). Учитывая влияние децентрализованной системы секционирования на количество и длительность отключений, используем коэффициенты $k_{НУ}$, $k_{ВВ}$ и выражение (8). Примем значение $k_{НУ} = 0{,}2$ в предположении наличия двукратного АПВ на реклоузерах и однократного АПВ в центре питания. Значение $k_{ВВ} = 0{,}6$ принимается в предположении величины эффекта 40 % , тогда недоотпуск электроэнергии на части линии можно определить по выражению:

$$\Delta W_{НОL} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{НУ}) \cdot T_L \cdot k_{ВВ} \cdot \sum_{i=1}^{n} L_{Li} \cdot P_{Li}\,, \quad (18)$$

где T_L – среднее время восстановления линии, ч; $L_{Li} = L_{отві} + L_{магі}$ – длина соответствующего i - участка части линии, км; $L_{отві}$ – длина i - ответвления, км; $L_{магі}$ – длина i - магистрального участка линии, км; P_{Li} – расчетная нагрузка i - ответвления линии, кВт.

Количество повреждений $\omega_П$ и длительность отключений потребителей $T_П$ рассчитываются отдельно по выражениям (3) и (4).

При коротком замыкании *К1* в первой части L_1 линии недоотпуск электроэнергии составляет:

$$\Delta W_{НО1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}6 \cdot (2+5) \cdot 200 = 323 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

При коротком замыкании *К2* во второй части линии L_2 недоотпуск электроэнергии составляет:

$$\Delta W_{НО2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 4{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot (8+20) \cdot (200+200+200+200) = 20644 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$$\Delta W_{НО\Sigma} = \Delta W_{НО1} + \Delta W_{НО2} = 323 + 20644 = 20967 \text{ кВт·ч / год}.$$

Годовое количество отключений:

$$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (2+5) = 2{,}8 \text{ год}^{-1};\ \omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (8+20) = 11{,}2 \text{ год}^{-1}.$$

Годовая длительность отключений потребителей:

$$T_{П1} = \omega_{П1} \cdot T_1 = 2{,}8 \cdot 1{,}2 = 3{,}36 \text{ ч / год};\ T_{П2} = \omega_{П2} \cdot T_2 = 11{,}2 \cdot 4{,}8 = 53{,}76 \text{ ч / год};$$

$$T_{П\Sigma} = T_{П1} + T_{П2} = 57{,}12 \text{ ч / год}.$$

2. *Реклоузер установлен за точкой присоединения ответвления 2* (рис. 14).

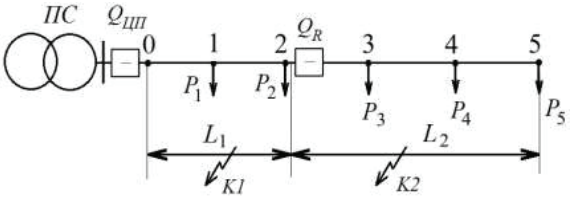


Рисунок 14 – Секционирующий реклоузер установлен за точкой 2

При коротком замыкании *K1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$\Delta W_{HO1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 2{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot (4+10) \cdot (200+200) = 2580$ кВт · ч/год.

При коротком замыкании *K2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$\Delta W_{HO2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot (6+15) \cdot (200+200+200) = 8709$ кВт · ч/год.

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$\Delta W_{HO\Sigma} = 2580 + 8709 = 10789$ кВт·ч / год.

Годовое количество отключений:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (4+10) = 5{,}6$ год$^{-1}$; $\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (6+15) = 8{,}4$ год$^{-1}$.

Годовая длительность отключений потребителей:

$T_{П1} = 5{,}6 \cdot 2{,}4 = 13{,}44$ ч / год; $T_{П2} = 8{,}4 \cdot 3{,}6 = 30{,}24$ ч / год; $T_{П\Sigma} = 43{,}68$ ч / год.

3. *Реклоузер установлен за точкой присоединения ответвления 3* (рис. 15).

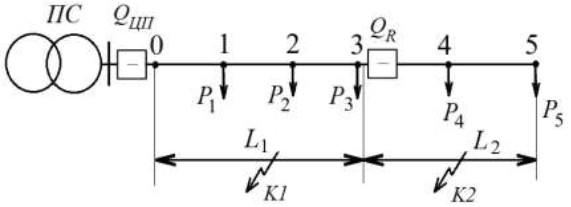


Рисунок 15 – Секционирующий реклоузер установлен за точкой 3

При коротком замыкании *K1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$\Delta W_{HO1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot (6+15) \cdot (200+200+200) = 8709$ кВт · ч/год.

При коротком замыкании *K2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$\Delta W_{HO2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 2{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot (4+10) \cdot (200+200) = 2580$ кВт · ч/год.

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$\Delta W_{HO\Sigma} = 8709 + 2580 = 10789$ кВт·ч / год.

Годовое количество отключений:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (6+15) = 8{,}4$ год$^{-1}$; $\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (4+10) = 5{,}6$ год$^{-1}$.

Годовая длительность отключений потребителей:

$T_{П1} = 8{,}4 \cdot 3{,}6 = 30{,}24$ ч / год; $T_{П2} = 5{,}6 \cdot 2{,}4 = 13{,}44$ ч / год; $T_{П\Sigma} = 43{,}68$ ч / год.

4. *Реклоузер установлен за точкой присоединения ответвления 4* (рис. 16).

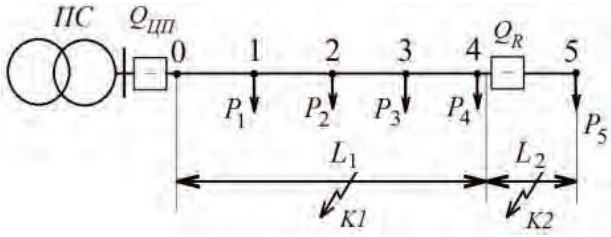


Рисунок 16 – Секционирующий реклоузер установлен за точкой 4

При коротком замыкании *К1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$$\Delta W_{НО1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 4{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot (8+20) \cdot (200+200+200+200) = 20644 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

При коротком замыкании *К2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$$\Delta W_{НО2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}6 \cdot (2+5) \cdot 200 = 323 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$$\Delta W_{НО\Sigma} = 29644 + 323 = 20967 \text{ кВт·ч / год}.$$

Годовое количество отключений:

$$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (8+20) = 11{,}2 \text{ год}^{-1};\ \omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (2+5) = 2{,}8 \text{ год}^{-1}.$$

Годовая длительность отключений потребителей:

$$T_{П1} = 11{,}2 \cdot 4{,}8 = 53{,}76 \text{ ч / год};\ T_{П2} = 2{,}8 \cdot 1{,}2 = 3{,}36 \text{ ч / год};\ T_{П\Sigma} = 57{,}12 \text{ ч / год}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Рассмотрим варианты технических характеристик сети при установке реклоузера *перед точкой подключения* соответствующего ответвления.

1. *Реклоузер установлен перед точкой присоединения ответвления 1*, разделяя ВЛ на две части (рис. 17).

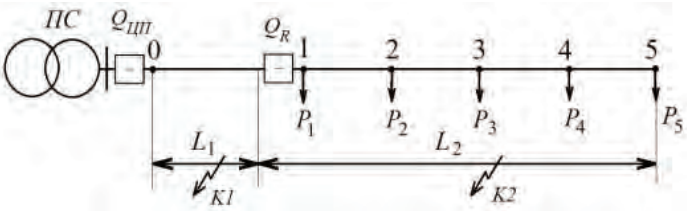


Рисунок 17 – Секционирующий реклоузер установлен перед точкой 1

При коротком замыкании *К1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$$\Delta W_{НО1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}2 \cdot 5 \cdot (200+200+200+200+200) = 1152 \text{ кВт·ч / год}.$$

При коротком замыкании *К2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$$\Delta W_{НО2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 4{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot (10+20) \cdot (200+200+200+200+200) =$$

$$= 27648 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$\Delta W_{HO\Sigma} = 1152 + 27648 = 28800$ кВт·ч / год.

Годовое количество отключений:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot \omega_0 \cdot L_1 = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 5 = 2$ год$^{-1}$; $\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (10 + 20) = 12$ год$^{-1}$.

Годовая длительность отключений потребителей:

$T_{П1} = \omega_{П1} \cdot T_1 = 2 \cdot 1{,}2 = 2{,}4$ ч / год; $T_{П2} = \omega_{П2} \cdot T_2 = 12 \cdot 4{,}8 = 57{,}6$ ч / год;

$T_{П\Sigma} = T_{П1} + T_{П2} = 60$ ч / год.

2. *Реклоузер установлен перед точкой присоединения ответвления 2* (рис. 18).

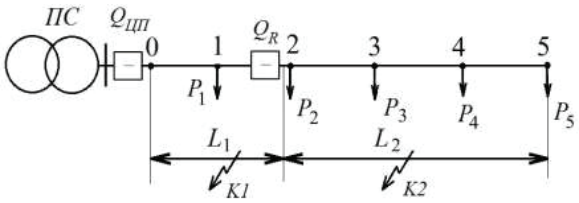


Рисунок 18 – Секционирующий реклоузер установлен перед точкой 2

При коротком замыкании *K1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$\Delta W_{HO1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 2{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot (2 + 10) \cdot 200 = 1106$ кВт · ч/год.

При коротком замыкании *K2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$\Delta W_{HO2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot (8 + 15) \cdot (200 + 200 + 200 + 200) = 12718$ кВт · ч/год.

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$\Delta W_{HO\Sigma} = 1106 + 12718 = 13824$ кВт·ч / год.

Годовое количество отключений:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (2 + 10) = 4{,}8$ год$^{-1}$; $\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (8 + 15) = 9{,}2$ год$^{-1}$.

Годовая длительность отключений потребителей:

$T_{П1} = 4{,}8 \cdot 2{,}4 = 11{,}52$ ч / год; $T_{П2} = 9{,}2 \cdot 3{,}6 = 33{,}12$ ч / год; $T_{П\Sigma} = 44{,}64$ ч / год.

3. *Реклоузер установлен перед точкой присоединения ответвления 3* (рис. 19).

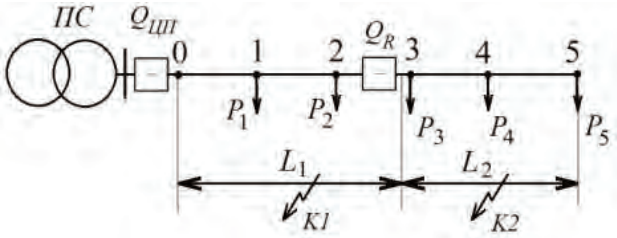


Рисунок 19 – Секционирующий реклоузер установлен перед точкой 3

При коротком замыкании *K1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$\Delta W_{HO1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}6 \cdot (4 + 15) \cdot (200 + 200) = 5253$ кВт · ч/год.

При коротком замыкании *К2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$$\Delta W_{HO2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 2{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot (6+10) \cdot (200+200+200) = 4424 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$$\Delta W_{HO\Sigma} = 5253 + 4424 = 9677 \text{ кВт·ч / год}.$$

Годовое количество отключений:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (4+15) = 7{,}6$ год$^{-1}$; $\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (6+10) = 6{,}4$ год$^{-1}$.

Годовая длительность отключений потребителей:

$T_{П1} = 7{,}6 \cdot 3{,}6 = 27{,}36$ ч / год; $T_{П2} = 6{,}4 \cdot 2{,}4 = 15{,}36$ ч / год; $T_{П\Sigma} = 42{,}72$ ч / год.

4. *Реклоузер установлен перед точкой присоединения ответвления 4* (рис. 20).

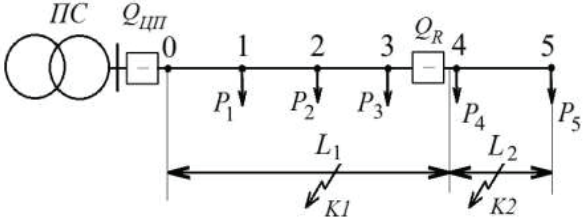


Рисунок 20 – Секционирующий реклоузер установлен перед точкой 4

При коротком замыкании *К1* недоотпуск электроэнергии на участке L_1:

$$\Delta W_{HO1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 4{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot (6+20) \cdot (200+200+200) = 14377 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

При коротком замыкании *К2* недоотпуск электроэнергии на участке L_2:

$$\Delta W_{HO2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot 0{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}6 \cdot (4+5) \cdot (200+200) = 829 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Суммарный недоотпуск электроэнергии:

$$\Delta W_{HO\Sigma} = 143777 + 829 = 15206 \text{ кВт·ч / год}.$$

Годовое количество отключений:

$\omega_{П1} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (6+20) = 10{,}4$ год$^{-1}$; $\omega_{П2} = 0{,}01 \cdot 40 \cdot (4+5) = 3{,}6$ год$^{-1}$.

Годовая длительность отключений потребителей:

$T_{П1} = 10{,}4 \cdot 4{,}8 = 49{,}92$ ч / год; $T_{П2} = 3{,}6 \cdot 1{,}2 = 4{,}32$ ч / год; $T_{П\Sigma} = 54{,}24$ ч / год.

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 2.3 – Изменение показателей надежности РЭС в зависимости от варианта установки секционирующего реклоузера

Номер точки ответвления	Показатели надежности вариантов на участках L_1 / L_2 (суммарное значение показателя)					
	ΔW_{HO}, кВт·ч / год	$\omega_П$, год$^{-1}$	$T_П$, ч / год	ΔW_{HO}, кВт·ч / год	$\omega_П$, год$^{-1}$	$T_П$, ч / год
	Реклоузер установлен за точкой подключения ответвления			Реклоузер установлен до точки подключения ответвления		
1	323 / 20644 (20967)	2,8 / 11,2 (14)	3,36 / 53,76 (57,12)	1152 / 27648 (28800)	2 / 12 (14)	2,4 / 57,6 (60)

2	2580 / 8709 (10789)	5,6 / 8,4 (14)	13,44 / 30,24 (43,68)	1106 / 12718 (13824)	4,8 / 9,2 (14)	11,52 / 33,12 (44,64)
3	8709 / 2580 (10789)	8,4 / 5,6 (14)	30,24 / 13,44 (43,68)	5323 / 4424 (9677)	7,6 / 6,4 (14)	27,36 / 15,36 (42,72)
4	20644 / 323 (20967)	11,2 / 2,8 (14)	53,76 / 3,36 (57,12)	14377 / 829 (15206)	10,4 / 3,4 (14)	49,92 / 4,34 (54,24)

Для определения оптимального места установки построим графики зависимости рассчитанных значений суммарного недоотпуска электроэнергии при КЗ в функции варианта места установки реклоузера (рис. 21).

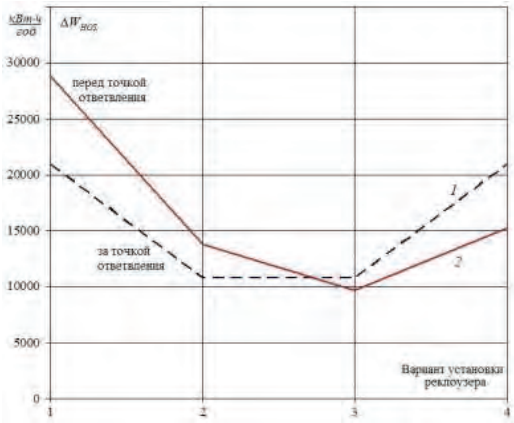


Рисунок 21 – Зависимости суммарного недоотпуска электроэнергии при КЗ в функции варианта места установки реклоузера в сети

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Построенные графики показывают, что место установки реклоузера в сети существенно влияет на недоотпуск электроэнергии при перерывах электроснабжения, связанных с поиском и ликвидацией повреждения.

При установке реклоузера *за точкой* присоединения ответвления (1–4) разность между максимальным и минимальным значением недоотпуска электроэнергии составляет 10178 кВт·ч / год.

При установке реклоузера *перед точкой* присоединения ответвления (1–4) разность между максимальным и минимальным значением недоотпуска электроэнергии составляет 19123 кВт·ч / год.

2. При установке реклоузера *за точкой* присоединения ответвления (1–4) минимальное значение недоотпуска электроэнергии соответствует двум вариантам (график 1) – за точками присоединения ответвлений 2 и 3 и составляет 10789 кВт·ч / год.

3. При установке реклоузера *перед точкой* присоединения ответвления (1–4) минимальное значение недоотпуска электроэнергии получается в одном варианте (график 2) – перед точкой присоединения ответвления 3 и составляет 9677 кВт·ч / год., что на 10,3 %

меньше, чем минимальное значение на первом графике. Следовательно, это и есть точка оптимальной установки реклоузера в равномерно загруженной радиальной линии.

4. В радиальных сетях с неравномерной загрузкой оптимальная точка установки реклоузера смещается к центру электрических нагрузок.

5. Годовое количество отключений в сети не зависит от места установки реклоузера и составляет 14 единиц в год.

6. Годовая длительность отключений потребителей (расчетная) при установке реклоузера в оптимальной точке минимальна и составляет 42,72 ч / год, что практически в 2 раза меньше, чем без использования реклоузера, когда на поиск и ликвидацию повреждений затрачивается 84 ч / год.

8 Определение оптимальных мест установки реклоузеров в замкнутых сетях

В качестве одного из способов определения оптимальных мест установки реклоузеров в замкнутых сетях может стать поиск минимума приведенных затрат в целевой функции *Ц* на эксплуатацию сети и электроснабжение потребителей [9]

$$Ц = \sum_k ((\Delta P_{pk} \cdot \beta_p + \Delta P_{nk} \cdot \beta_n) \cdot t_k + У + F_{Ш} + F_C, \quad (19)$$

где ΔP_{pk} – потери активной мощности в РЭС на k - й ступени графика нагрузки; β_p – стоимость потерь в сети 6–10 кВ; ΔP_{nk} – потери активной мощности в питающей сети на k - й ступени графика нагрузки; β_n – стоимость 1 кВт·ч потерь в питающей сети; $У$ – ущербы; $F_{Ш}$, F_C – функции штрафа ($F_{Ш}$ характеризует токовую перегрузку линий, F_C учитывается при ограничении емкостных токов замыкания на землю).

При этом используется следующий алгоритм решения задачи:

1) рассчитывается режим РЭС для неоптимизированного состояния схемы;

2) в РЭС случайным образом выбирается разрез – место установки реклоузера и также случайным образом перемещается на один из смежных участков сети с учетом технических ограничений задачи;

3) для нового состояния сети вычисляются скорректированные нагрузки на секциях шин центров питания основной сети, потери мощности в распределительной и питающей сетях и, при необходимости, штрафные функции $F_{Ш}$ и F_C;

4) вычисляется очередное значение целевой функции (19), и если оно уменьшилось, то выбранный разрез фиксируется и пункты 2–4 алгоритма повторяются.

Процесс случайного дискретного поиска продолжается до тех пор, пока в сети не останется ни одного перемещения разреза – места установки реклоузера, приводящего к улучшению целевой функции.

Потери мощности в распределительной сети определяются с учетом потерь мощности холостого хода потребительских трансформаторов. Мощности нагрузок ТП рассчитываются таким образом, чтобы ток на головном участке РЭС всегда был равен сумме токовых нагрузок ТП. Потери мощности в РЭС пересчитываются только в тех контурах, в которых имеет место перемещение разрезов.

Список использованной литературы:

1. Воротницкий В.Э., В.В. Воротницкий. Надежность распределительных электрических сетей 6 (10) кВ – автоматизация с применением реклоузеров // Новости электротехники. 2002. № 5. С. 22–25.

2. Воротницкий В., Бузин С. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6 (10) кВ // Новости электротехники. 2005. № 3 (33).

3. Годовой отчет по результатам работы ПАО «Кубаньэнерго» за 2015 год: [Электронный ресурс]. URL: http: // go2015.kubanenergo.ru / ru / download - 3.html (дата обращения: 22.12.2016).

4. Князев В.В. Основные направления повышения надежного электроснабжения потребителей в сельской местности // Электро. 2006. № 5. С. 11–15.

5. Максимов Б.К., В.В. Воротницкий. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей 6(10) кВ с применением реклоузеров с целью повышения надежности электроснабжения потребителей // Электротехника. 2005. №10. С. 7–22.

6. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. М.: ОАО «Россети», 2013. 196 с.

7. Реклоузер вакуумный серии РВА / TEL / Техническая информация ТШФГ 674153.101. Изменение № 6. М.: Российская группа компаний «Таврида электрик». 2007. – 82 с.

8. Сазыкин В.Г. Повышение энергобезопасности агропромышленных районов Кубани // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2011. № 1–3 (6–8). С. 160–164.

9. Фурсанов М.И., Золотой А.А., Макаревич В.В., Муха А.Н. Методические принципы расчета и анализа разомкнутых электрических сетей с несколькими источниками питания // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Научно - технический и производственный журнал. 2008. № 6. С. 23–32.

© В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков, 2017

УДК 621.43

Стрелков Ю. И., канд. техн. наук, профессор, старший научный сотрудник КВВУ
E - mail: yistrel@mail.ru
Горбенко А.Ю., инженер, начальник научно - исследовательской лаборатории КВВУ
Зеленков А.С., инженер, старший научный сотрудник КВВУ
г. Краснодар

ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

Аннотация

На основании выбора диагностического параметра для оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания предлагается алгоритм диагностирования и структурное построение устройств диагностирования.

Ключевые слова

Двигатель внутреннего сгорания, диагностирование технического состояния

При исследовании двигателя внутреннего сгорания как объекта технической диагностики необходимо определить, какие объекты двигателя подлежат диагностике, и какие параметры позволяют оценить техническое состояние двигателя и его элементов.

В настоящее время выбор объекта диагностирования осуществляется, как правило, на основе традиционных суждений о степени надёжности и значимости узла двигателя или его системы, либо в результате специального организованного экспертного опроса.

У двигателя внутреннего сгорания в первую очередь диагностические системы должны создаваться для следующих объектов:

- цилиндропоршневой группы (ЦПГ);
- газовоздушного тракта;
- топливной аппаратуры и системы топливоподачи;
- системы смазки;
- подшипников коленчатого вала;
- системы газораспределения,

при этом необходимо получить такой минимальный состав параметров, с помощью которого можно различать элементы с различной степенью изменения технического состояния наилучшим образом. Выбранные диагностические параметры должны содержать максимально возможное количество информации о состоянии объекта в целом. Представленная совокупность узлов и систем дизеля вместе с выбранным набором диагностических параметров образуют математическую модель дизеля. Модель адекватна объекту, если она включает структурную схему объекта, матрицы состояний и функции предпочтения проверок.

Из известных способов минимизации числа точек контроля [1,2,3,4] наиболее приемлемым является способ, основанный на информационном критерии:

$$I(X_K) = G(X_K) \cdot J(X_K), \quad (1)$$

где $G(X_K)$ - вес X_K - го параметра;

$J(X_K)$ - количество информации, приносимое параметром

о состоянии элемента в целом.

Наиболее ёмким следует признать тот параметр X_K, для которого величина $I(X_K)$ максимальна и значительно отличается от $I(X_K)$ для остальных параметров. Величина $I(X_K)$ определяется на основании статистических данных об изменении параметров технического состояния элементов конструкции двигателя.

Согласно статистическим данным по большой группе эксплуатируемых дизелей на рисунке 1 представлены результаты ранжирования, произведенного с целью выявления объектов с наибольшей энтропией как первоочередных для оборудования системами диагностики.

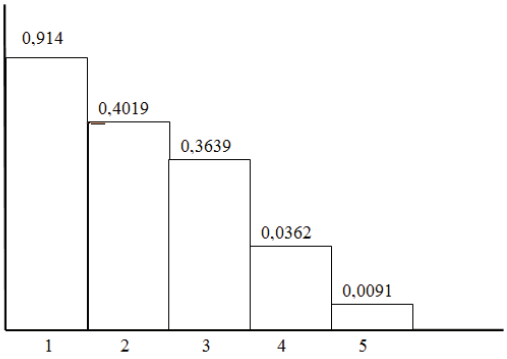


Рисунок 1 - Ранжирование объектов второго рода по значениям оценочных энтропий.
1 - топливная система; 2 - система смазки; 3 - система охлаждения;
4 – ЦПГ; 5 - коленчатый вал.

На материале располагаемой статистики могут быть, например, сделаны следующие выводы, которые следует рассматривать не как обобщение вопроса об объектах диагностирования дизеля, а лишь как анализ конкретного случая.

В данном примере наибольшие значения по величине оценочной энтропии, как объекты диагностирования, приобретают системы топливоподачи, маслоснабжения и жидкостного охлаждения, в соответствии с рисунком 1. Энтропии этих систем на порядок выше остальных объектов второго рода. Им должно быть уделено первостепенное внимание при дальнейшем анализе. Из объектов третьего рода, согласно с рисунком 2, особого внимания заслуживают форсуночные трубки, топливоподкачивающий насос, форсунки, топливный насос высокого давления (ТНВД), масляный трубопровод, теплообменники наддувочного воздуха и некоторые другие, которые легли в основу рассмотрения. Располагая подобным материалом, можно и дальше углублять его анализ.

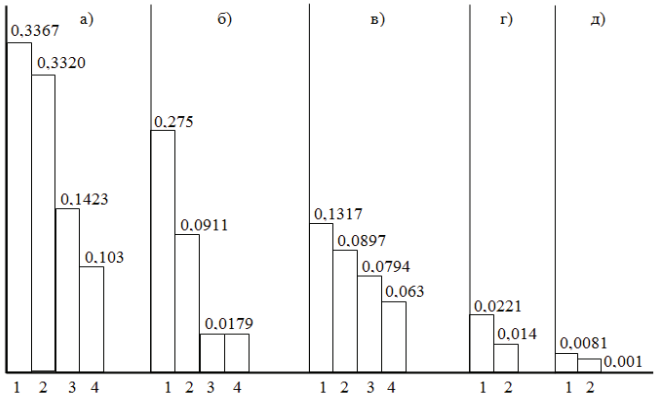


Рисунок 2 - Ранжирование объектов второго рода по значениям оценочных энтропий

а) - объекты топливной системы:

1 - форсуночные трубки; 2 – топливоподкачивающий насос; 3 - форсунки; 4 –ТНВД;

б) - объекты масляной системы:

1 - трубопровод; 2 - масляный насос; 3 - теплообменник; 4 - фильтр;

в) - объекты водяной системы: 1 - теплообменник надувочного воздуха; 2 - трубопроводы; 3 - теплообменник масла; 4 - насос водяной;

г) - объекты ЦПГ: 1 - клапаны; 2 - втулка - поршень;

д) - объекты коленчатого вала: 1 - подшипники; 2 - противовесы.

Вопрос об экономической целесообразности выбора объектов должен явиться предметом особого рассмотрения. Тогда в совокупности с энтропийным анализом могут быть получены окончательные выводы о рангах объектов и очередности разработок системы диагностирования.

Наибольшие значения оценочной энтропии имеют системы топливоподачи, смазки и охлаждения, у которых энтропия соответственно равна 0,914; 0,4019; 0,3639. Наибольшую

плотность вероятности отказов имеют топливная система, система газораспределения и ЦПГ. Техническое состояние этих систем можно оценить с помощью степени неравномерности вращения вала двигателя.

Величина степени неравномерности вращения вала двигателя зависит от характеристик двигателя и потребителя и может быть использована в диагностических целях.

Неравномерность вращения вала двигателя вызывается неравномерностью момента, функциональную зависимость которого можно представить в виде:

$$M = f(P_\theta; \omega; g_ц; \alpha; \eta_V; \eta_i; \eta_H ...), \quad (2)$$

где P_θ - среднее эффективное давление, Па;

ω - частота вращения коленчатого вала, Гц;

$g_ц$ - цикловая подача топлива, $м^3$ / с;

α - коэффициент избытка воздуха;

η_V - коэффициент наполнения;

η_i - индикаторный КПД;

η_H - механический КПД.

Следовательно, отклонения угловой частоты вращения, возбуждаемые силами, действующими на коленчатый вал, связаны с параметрами рабочего процесса, на который непосредственное и существенное влияние оказывает работа цилиндропоршневой группы. Любые отклонения от нормальной работы этих систем ведут к увеличению показателя неравномерности вращения коленчатого вала δ .

В настоящее время для оценки технического состояния отдельных цилиндров многоцилиндровых двигателей внутреннего сгорания используется величина степени неравномерности нагрузки по цилиндрам. Степень неравномерности нагрузки по цилиндрам двигателя может быть определена прямыми и косвенными методами. Прямые методы позволяют оценить величину неравномерности распределения нагрузки по результатам непосредственного измерения цилиндровых индикаторных мощностей или среднего индикаторного давления в цилиндре. Для определения цилиндровой индикаторной мощности применяют метод последовательного выключения цилиндров при работе двигателя параллельно с внешней сетью.

В связи с тем, что при параллельной работе с внешней сетью частота вращения остается постоянной, выключение одного из цилиндров снижает эффективную мощность двигателя N_E на величину индикаторной мощности N_{ik} отключенного k - го цилиндра. Этот метод измерения трудоемок, а его точность зависит от стабильности поддержания теплового состояния дизеля.

Для определения среднего индикаторного давления P_{ik} в k–ом цилиндре двигателя необходимо приборно реализовать следующую зависимость:

$$P_{ik} = k\int_0^T P_k(t)V_k(t)dt, \quad (3)$$

где k - коэффициент пропорциональности, учитывающий тактность работы двигателя и рабочий объем цилиндра V_h;

$P_k(t)$ - текущее по времени давление газов в цилиндре двигателя, Па / с;

$V_k(t)$ - величина изменения рабочего объема цилиндра во времени, $м^3$ / с;

T - период полного цикла работы двигателя, с.

Точность измерения среднего индикаторного давления зависит от точности привязки индикаторной диаграммы к верхней мертвой точке цилиндра. Кроме того, величина среднего индикаторного давления не позволяет вскрыть истинный характер протекания рабочего процесса в цилиндре. В связи с этим оценка технического состояния отдельных цилиндров двигателя по величине среднего индикаторного давления не обеспечивает требуемую точность контроля.

Высокая трудоемкость и низкая точность прямых методов оценки технического состояния цилиндров двигателя ограничивает их применение в системах диагностики. Более широко распространены в настоящее время косвенные методы оценки, базирующиеся на измерении таких параметров как максимальное давление сжатия, максимальное давление сгорания, скорость нарастания давления, температура отработавших газов и степень неравномерности вращения вала двигателя.

При оценке технического состояния отдельных цилиндров двигателя по величинам максимального давления сжатия P_{ck} и сгорания P_{zk} в k - ом цилиндре определяется герметичность цилиндра (по первому параметру) и качество рабочего процесса (по второму параметру). Однако величины Pck и Pzk не позволяют получить полную картину протекания рабочего процесса, так как при их определении не учитываются моменты достижения максимальных значений давления.

Оценка технического состояния отдельных цилиндров двигателя по величине температуры отработавших газов T_{2k} привлекает относительной простотой применяемой аппаратуры. Однако точность оценки по этому методу наиболее низкая. Это связано с тем, что на величину показаний при измерении температуры T_{2k} определяющее влияние оказывает место установки датчика температуры. У многоцилиндрового двигателя идентично установить датчики температуры в отдельных цилиндрах практически невозможно.

Оценка технического состояния отдельных цилиндров по величине степени неравномерности вращения вала двигателя интересна сравнительной простотой используемой аппаратуры и высокой точностью результатов. Степень неравномерности вращения определяют из соотношения

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{cp}}, (4)$$

где $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ - максимальное и минимальное значения угловой частоты вращения вала, Гц;

$\omega_{cp} = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2}$ - среднее значение угловой частоты вращения вала, Гц.

Для установившегося режима работы среднее значение крутящего момента M_{gcp} равно моменту нагрузки $M_н$. В случае, когда из - за неравномерности крутящего момента $M_g > M_{gcp} = M_н$ вал двигателя ускоряется и избыточная работа $L_{изб}$ на увеличение кинетической энергии валопровода

$$J_0 \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2}{2} = L_{изб}, (5)$$

где J_o - массовый момент инерции валопровода двигателя, генератора и маховика.

При $M_g < M_{gcp} = M_н$ вал двигателя замедляется и кинетическая энергия валопровода уменьшается.

Покажем, что степень неравномерности вращения вала двигателя зависит от характеристик двигателя (числа цилиндров, средней частоты вращения, тактности, максимальных значений газовых и инерционных сил) и характеристик потребителя (массового момента инерции его вращающихся деталей), т.е. что этот параметр можно использовать для оценки технического состояния отдельных цилиндров. Для этого запишем выражение (5) в виде

$$J_o \cdot \frac{(w_{\max} + w_{\min})(w_{\max} - w_{\min})w_{cp}}{2w_{cp}} = L_{изб}. \quad (6)$$

Сопоставляя (6) и (4), получим

$$\delta = \frac{L_{изб}}{J_o w_{cp}^2}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что величина степени неравномерности вращения вала двигателя определяется характеристиками двигателя и нагрузки и может быть использована для оценки технического состояния цилиндров двигателя. По величине степени неравномерности вращения вала двигателя, отнесенной к времени работы того или иного цилиндра двигателя, возможно проверить вклад каждого цилиндра в величину крутящего момента двигателя. Этот параметр особенно удобен для оценки технического состояния двигателя с большим числом цилиндров, у которых имеет место частотное перекрытие времени действия крутящих моментов отдельных цилиндров. Для шестнадцати или двадцати цилиндрового двигателя существенный дефект в одном цилиндре при диагностировании другими методами остается незамеченным и, в конце концов, может вызвать серьезные осложнения для работы всего двигателя.

Такой дефект может быть обнаружен только оценкой величины степени неравномерности вращения вала.

Рассмотрим основные способы определения величины степени неравномерности вращения вала двигателя и охарактеризуем целесообразность их применения. При определении величины δ в настоящее время используются способы, основанные на последовательном отключении одного или нескольких цилиндров двигателя, на определении максимальных или минимальных значений величин угловой частоты вращения отнесенных ко времени работы каждого из цилиндров, на измерении времени и пути разгона вала двигателя в заданном интервале частот вращения, на измерении ускорения вала двигателя. У первой группы способов [5,6] неравномерность вращения вала двигателя определяют путем замера величины частоты вращения при отключении нескольких [5] или одного [6] цилиндра.

В случае работы двигателя только на одном цилиндре имеет место значительная перегрузка оставшегося в работе цилиндра и в связи с этим неравномерность загрузки цилиндров существенно отличается от той, которая бывает при эксплуатационной загрузке двигателя. При отключении одного цилиндра работающие цилиндры догружают до максимальной мощности и измеряют частоту вращения вала двигателя, а затем производят повторный замер частоты вращения вала двигателя, предварительно включив ранее

выключенный цилиндр. Неравномерность частоты вращения определяют по результатам вторичных замеров, получаемых после подключения каждого из поочередно выключаемых цилиндров. Величина δ вычисляется при этом по следующей формуле:

$$\delta = 2 \cdot \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{max} + \omega_{min}}, \quad (8)$$

где ω_{max}, ω_{min} - соответственно максимальное и минимальное значение частоты вращения вала двигателя по результатам вторичных замеров, Гц.

Оценка неравномерности работы цилиндров двигателя, получаемая по результатам замеров при отключении одного цилиндра точнее, чем при отключении нескольких цилиндров. Однако способам, основанным на последовательном отключении одного или нескольких цилиндров присущ общий недостаток, связанный с трудоемкостью их реализации и необходимостью установки на двигатель специальных устройств, для выключения цилиндров.

Менее трудоемки способы, основанные на определении максимальных или минимальных значений угловой частоты вращения, отнесенных ко времени работы каждого из цилиндров двигателя. Эти способы в свою очередь можно разделить на две группы, позволяющие осуществить качественную и количественную оценку величины δ. При качественной оценке величины δ [7,8] производится сравнение интервалов следования сигналов положения коленчатого вала соответствующих рабочим тактам цилиндров двигателя. За один оборот коленчатого вала двигателя получают число импульсов, равное числу цилиндров, и тем самым получают возможность сравнения внутри цикловых интервалов времени, характеризующих величину крутящего момента, развиваемого соответствующим цилиндром двигателя. Фактически измерительное устройство образует систему автоматической подстройки частоты, ширина сигнала, на выходе которой определяется разницей в наблюдаемые моменты времени средних значений максимального и минимального крутящих моментов, развиваемых на тактах работы двигателя. Качественная оценка неравномерности работы цилиндров двигателя предшествует обычно количественной оценке. Одним из применяемых приемов при количественной оценке является определение временных интервалов между равными угловыми интервалами [9]. Степень неравномерности частоты вращения при этом определяют по формуле:

$$\delta = \left| \frac{T_{I+1} - T_I}{T_I} \right|, \quad (9)$$

где T_i, T_{i+1} - текущие значения периода следования импульсов, с, равные смежным друг другу i - 1 и i , i и i +1 временным интервалам импульсов с входа датчика частоты вращения f=1 / T.

Рассмотренные способы позволяют получить высокую точность и достоверность оценки, однако их аппаратурная реализация достаточно сложна.

Более простыми являются способы, основанные на определении времени и пути разгона вала двигателя в диапазоне заданных частот [10,11,12]. В соответствии с этими способами разгон двигателя осуществляется путем установки топливодозирующего органа на

максимальную подачу топлива. Измерение времени и пути разгона начинается от момента достижения валом двигателя нижнего установленного уровня величины частоты вращения. Процесс измерения заканчивается к моменту достижения валом двигателя верхнего установленного уровня частоты вращения. Оценку технического состояния двигателя проводят путем сравнения времени разгона и пути разгона (числа оборотов вала за время разгона) с соответствующими эталонными значениями [11,12]. В [12] предлагается дополнительно измерять время и путь выбега вала в заданном диапазоне частот вращения и сравнивать полученные результаты с эталонными значениями. В [13] предлагается, кроме того оценивать состояние каждого из цилиндров путем определения временного интервала между положениями поршня в верхней мертвой точке в такте сжатие и положением поршня в нижней мертвой точке в такте расширения для каждого из цилиндров двигателя. Собственно оценка выполняется путем сопоставления полученных результатов с эталонными значениями. Точность оценки существенным образом зависит от точности привязки к верхней мертвой точке в первом по порядку измерения цилиндре двигателя.

Четвертая группа способов оценки неравномерности работы цилиндров двигателя основывается на определении величины ускорения двигателя [13,14,15]. В [13] определяют ускорение в каждом из цилиндров двигателя за рабочий ход его поршня на протяжении полного цикла. Для определения ускорения двигатель разгоняют и с момента достижения валом номинальной частоты вращения производят непрерывное измерение угловых скоростей в пределах углов поворота коленчатого вала, соответствующих рабочим ходам каждого цилиндра. Величина ускорения для первого цилиндра ε_1 вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\tau_2 - \tau_1}, (10)$$

где ω_1, ω_2 - значения угловой скорости в конце такта сжатия и в конце такта расширения для первого цилиндра, измеренные в моменты времени $\tau_1 \tau_2$, Гц.

Для второго по порядку работы цилиндра величина ускорения вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\tau_3 - \tau_2}, (11)$$

где ω_3 - значение угловой скорости в конце такта расширения для второго цилиндра, измеренное в момент времени τ_3, Гц.

Величины ε_3 и т.д. определяются аналогично величинам ε_1 и ε_2. Заключение о техническом состоянии двигателя делается по величине отклонения вычисленных значений ε от номинального значения ускорения на данном режиме работы. В качестве номинального значения ускорения удобно принимать среднее значение ускорения за рабочий ход поршня.

Рассмотренная методика оценки технического состояния цилиндров двигателя корректна в связи с тем, что произведение величины ускорения на приведенный массовый момент инерции равно величине эффективной мощности, вырабатываемой каждым цилиндром. В случае многоцилиндрового двигателя, когда имеет место перекрытия

рабочих ходов в отдельных цилиндрах, об их техническом состоянии судят по ускорениям вала, вычисленным для начальной части рабочего хода конкретного цилиндра.

Оценка технического состояния цилиндров по величине ускорения вала двигателя осуществляется в [15] при прокрутке в неустановившемся режиме работы двигателя (разгоне или выбеге). В процессе прокрутки двигателя от внешнего источника его мощность расходуется на преодоление момента инерции, потерь на трение и на преодоление потерь, на сжатие газа. Потери на преодоление момента инерции и трения при прокрутках в одинаковых условиях остаются практически постоянными. Потери на сжатие газа в цилиндрах зависят от их компрессии и определяются степенью изношенности деталей цилиндропоршневой группы. Чем меньше компрессия цилиндров, тем меньше изменяется величина потерь на сжатие и тем на меньшую величину изменяется ускорение прокручивания коленчатого вала. В качестве параметра, изменяющегося в зависимости от компрессии, принимают разность ускорений коленчатого вала при декомпрессировании цилиндров и без него. Корректность выбора предлагаемого показателя для оценки технического состояния цилиндров подтвердим следующими соображениями. Момент на коленчатом валу двигателя в неустановившемся режиме прокрутки внешним источником энергии постоянной мощности можно определить следующим образом:

$M' = M_C + J_O \cdot \varepsilon = M_T + M_{СЖ} + J_O \varepsilon$, (12)

где M_C - момент сопротивления в установившемся режиме прокручивания, Н·м;

M_T - момент потерь на трение, Н·м;

$M_{СЖ}$ - момент потерь на сжатие, кг·м;

$J_O \cdot \varepsilon$ - момент сил инерции, кг·м.

В связи с тем, что прокрутка в режиме декомпрессирования и без него выполняется от внешнего источника энергии постоянной мощности, величина момента M' остается постоянной на каждой из стадий испытаний. Так как на каждой из стадий испытывается один и тот же двигатель, то не меняется и величина момента M_T. С учетом этого разница ускорений при испытаниях без декомпрессии ε_1 и с декомпрессией ε_2 из (13) равна

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{M_{СЖ2} - M_{СЖ1}}{J_O}. \quad (13)$$

Поскольку на второй стадии прокручивание осуществляется с декомпрессией, то $M_{СЖ}$ равно нулю и выражение (14) принимает вид:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \frac{M_{СЖ1}}{J_O}. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что чем больше разность ускорений при испытаниях двигателя, тем больше момент потерь на сжатие, т.е. меньше износ деталей цилиндропоршневой группы. Рассмотренный способ оценки технического состояния двигателя дает хорошие результаты, но его применение ограничивается сложностью организации процесса испытаний (необходимостью иметь внешний источник энергии постоянной мощности и иметь устройство, позволяющее осуществлять поочередную декомпрессию цилиндров в процессе прокрутки).

Неравномерность вращения вала, отнесённая к каждому из цилиндров двигателя на такте рабочего хода, позволяет в целом судить о качестве функционирования системы топливоподачи (насос высокого давления, форсунки), а также правильности установки угла опережения подачи топлива.

Алгоритм функционирования системы технического диагностирования ДВС [16] использующей в качестве диагностического параметра степень неравномерности вращения коленчатого вала представлена на рисунке 3.

На первом этапе диагностирования производится измерение времени поворота коленчатого вала двигателя T_i в каждом i - том цилиндре на такте рабочего хода от начала впрыска топлива в i - тый цилиндр до начала подачи топлива в следующий по порядку работы i+1 цилиндр. Степень неравномерности частоты вращения при этом определяют по формуле (9).

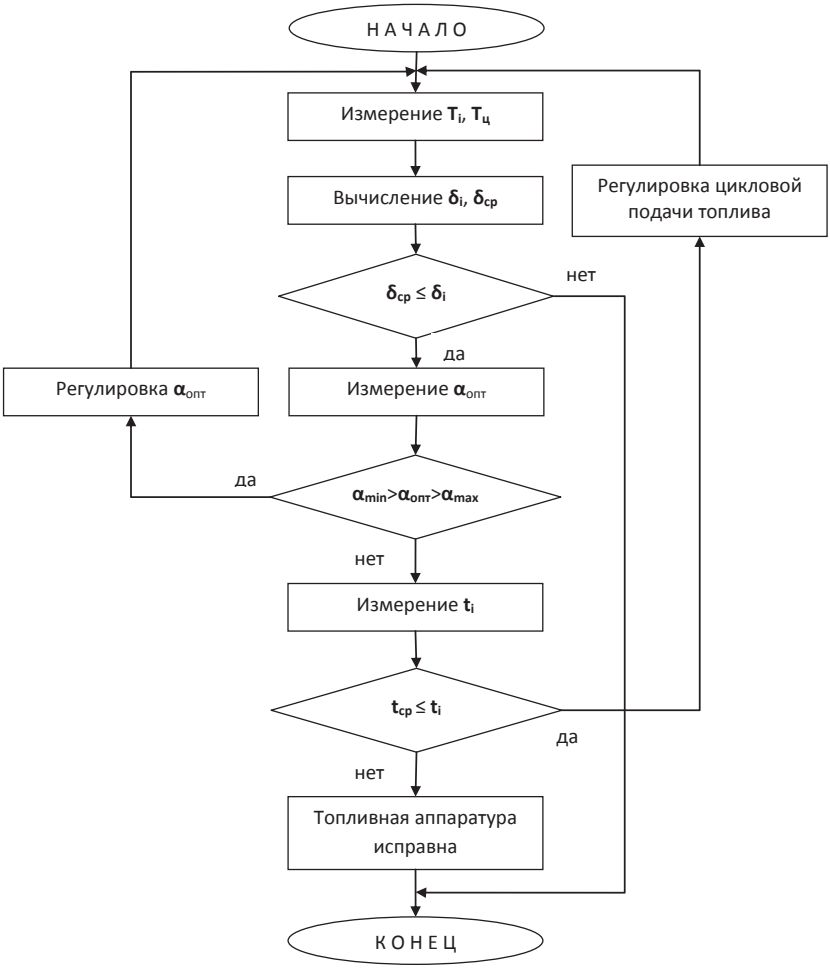


Рисунок 3 - Алгоритм диагностирования топливной аппаратуры

Сравнивая величины δ_i, судят об идентичности процессов, проходящих в цилиндрах двигателя. Очевидно, если расхождения в значениях малы, то можно говорить о

правильности настройки и функционирования топливной аппаратуры двигателя. Если же расхождения значительны, то необходимо проведение дальнейшего диагностирования.

Следующим этапом измеряют угол опережение подачи топлива в цилиндры двигателя $\alpha_{опт}$. Измерения проводятся на цилиндре, рекомендованном заводом изготовителем. При отрицательном результате измерений диагностирование останавливают и выставляют угол $\alpha_{опт}$ в соответствие с требованиями завода изготовителя, и диагностирование осуществляется заново. При положительном же результате измерений переходят к следующему этапу.

На третьем этапе диагностирования осуществляется измерение длительности подачи топлива в цилиндры двигателя t_i, по величине которой, судят об идентичности цикловой подачи топлива.

Для реализации первого этапа диагностирования предлагается устройство измерения неравномерности вращения вала [17], разработанное для четырёхцилиндрового дизельного двигателя.

Структурная схема устройства изображена на рисунке 4. Она включает в себя:

- ДПТ1…ДПТ4 – первый, второй, третий и четвертый датчики подачи топлива в цилиндр;
- УПФ1…УПФ4 – первый, второй, третий и четвертый усилители с полосовым фильтром;
- ФИ1…ФИ4 – первый, второй, третий и четвертый формирователи импульсов;
- ГОЧ – генератор образцовой частоты;
- ИЛИ1…ИЛИ3 – первая, вторая и третья схемы «ИЛИ»;
- И1…И4 – первая, вторая, третья и четвёртая схемы «И»;
- Т1, Т2 – первый и второй триггеры;
- НЕ – элемент «НЕ»;

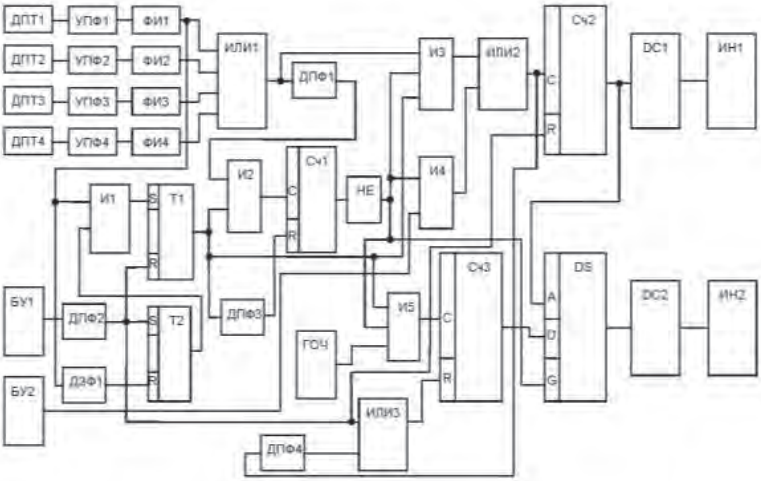


Рисунок 4 - Устройство измерения неравномерности вращения вала дизельного двигателя. Схема структурная.

- ДПФ1…ДПФ4 – первый, второй, третий и четвёртый детекторы переднего фронта импульса;
- ДЗФ1, ФЗФ2 – первый и второй детекторы заднего фронта импульса;
- ДS – блок памяти;
- Сч1…Сч3 – первый, второй и третий счетчики;
- ДС1, ДС2 – первый и второй дешифраторы;
- ИН1, ИН2 – первый и второй индикаторы;
- БУ1, БУ2 – первый и второй блоки управления.

Датчики ДПТ1…ДПТ4 устанавливаются на трубопроводы высокого давления соответствующих цилиндров перед форсункой. Усилители с полосовыми фильтрами УПФ1…УПФ4 предназначены для выделения и усиления сигнала впрыска топлива. Формирователи ФИ1…ФИ4 формируют короткие импульсы с началом подачи топлива в цилиндры двигателя. ГОЧ вырабатывает импульсы стабильной частоты.

Работа устройства заключается в следующем.

По сигналу от БУ1 к началу измерений по переднему фронту импульса от ДПФ2 на выходе триггера Т2 и втором входе И1 устанавливается логическая единица, а также «обнуляются» счётчики Сч2 и Сч3, и на выходе триггера Т1, первом входе И2, третьем входе И3, первом входе И5 устанавливается уровень логического нуля. С началом подачи топлива в первый, по порядку работы цилиндр, датчик ДНПТ1 фиксирует это и в УПФ1 и ФИ1 формируется короткий импульс начала подачи топлива. Передним фронтом этого импульса через схему И1 триггер Т1 устанавливается в состояние логической единицы, а по заднему фронту этого импульса триггер Т2 устанавливается в уровень логической единицы, тем самым разрешая прохождение импульсов через схему И2, И3 и И5. От ДПФ3 приходит короткий импульс «обнуляющий» счётчик Сч1. На второй вход схемы И2 поступают импульсы от ДПФ1 через схему ИЛИ1 от ФИ1…ФИ4. Таким образом счётчик Сч1 начинает подсчёт импульсов подачи топлива. Одновременно со счётчиком Сч1 через схему И3 и ИЛИ2 счёт импульсов подачи топлива происходит и в счётчике Сч2.

С приходом первого импульса начала подачи топлива на выходе счётчика Сч2 появляется комбинация «1», которая поступает на адресный вход блока памяти DS, в котором выбирается первая ячейка. Уровень логической «1» на втором и третьем входе схемы И5 разрешают прохождение импульсов от генератора ГОЧ. Счётчик Сч3 считает количество импульсов приходящих от ГОЧ до тех пор, пока по переднему фронту очередного импульса от ИЛИ2 счётчик Сч2 не изменит своё состояние на «2». В блоке памяти DS выбирается вторая ячейка, а в первой осталось число, соответствующее количеству импульсов за период от начала подачи топлива в первый, по порядку работы цилиндр, до начала подачи топлива во второй, по порядку работы цилиндр двигателя. По заднему фронту импульса от схемы ИЛИ2 счётчик Сч2 «обнуляется» и заново начинает подсчёт импульсов от ГОЧ. С приходом очередного импульса от ИЛИ2 счётчик Сч2 переходит в состояние «3» и в блоке памяти DS в ячейке 2 остаётся число, соответствующее количеству импульсов за период от начала подачи топлива во второй, по порядку работы, цилиндр до начала подачи топлива в третий, по порядку работы цилиндр двигателя. По заднему фронту импульса от ИЛИ2 счётчик Сч3 опять «обнуляется» и заново начинает считать импульсы от ГОЧ.

Аналогичным образом осуществляется запись числа в третью и в четвёртую ячейки блока памяти DS.

С приходом импульса начала подачи топлива опять от первого цилиндра на выходе счётчика Сч1, появляется уровень логической «1» и через схему НЕ блокируется дальнейшее прохождение импульсов в схеме И3, И5, а также разрешается считывание информации с блока памяти DS.

Таким образом, в четырёх ячейках блока памяти DS осталось записанным число импульсов, пропорциональное времени поворота коленчатого вала двигателя от начала подачи топлива в цилиндр двигателя до начала подачи топлива в следующий, по порядку работы цилиндр.

При переходе счётчика Сч1 в единичное состояние разрешается прохождение управляющего сигнала на счётчик Сч2 от блока БУ2, с помощью которого осуществляется выбор ячейки памяти. Номер цилиндра индицируется на индикаторе ИН1, а число, записанное в ячейках памяти DS – на индикаторе ИН2.

Для реализации второго этапа алгоритма предлагается устройство измерения угла опережения подачи топлива в цилиндры дизельного двигателя [18], структурная схема которого представлена на рисунке 5 и включает в себя:

- ДНПТ – датчик начала подачи топлива в цилиндр;
- ДВМТ – датчик верхней мёртвой точки;
- УПФ – усилитель с полосовым фильтром;
- ФИ1, ФИ2 – первый и второй формирователи импульсов;
- ИЛИ – схема «ИЛИ»;
- И1, И2 – первая и вторая схемы «И»;
- Т1, Т2 – первый и второй «RS - триггеры»;
- ДЗФ – детектор заднего фронта импульса;
- Сч – счётчик импульсов;
- ДС – дешифратор;
- ИН – индикатор;
- БУ – блок управления.

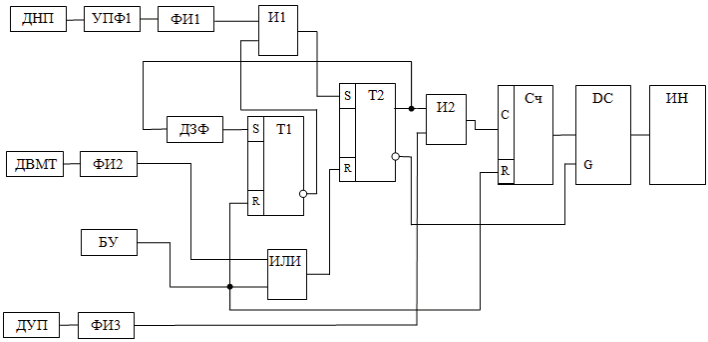


Рисунок 5 - Структурная схема устройства измерения угла опережения подачи топлива

Датчик ДНПТ устанавливают на трубопровод высокого давления цилиндра, по которому производится установка угла опережения подачи топлива. Метку ДВМТ устанавливают на маховике. Как правило, на двигателе уже определено положение ВМТ поршня, по которому производят установку угла опережения подачи топлива. Усилитель с полосовым фильтром УПФ предназначен для усиления и выделения сигнала впрыска топлива. ДУП устанавливают рядом с венчиком маховика, а зубья маховика являются метками угла поворота коленчатого вала. Формирователи ФИ1, ФИ2 и ФИ3 формируют короткие импульсы начала подачи топлива в цилиндр, в момент прихода поршня в верхнюю мёртвую точку и угла поворота коленчатого вала.

Работа устройства заключается в следующем.

С приходом импульса от БУ на проведение измерения триггер Т1 и через схему ИЛИ триггер Т2 устанавливаются в «нулевое» состояние, а также обнуляется счётчик СЧ. С началом подачи топлива ДНПТ выделяет сигнал прохождения топлива по трубке высокого давления, УПФ усиливает его и выделяет спектр частот, характерных для впрыска. Этот сигнал поступает на ФИ1, где формируется импульс начала подачи топлива и далее через схему И1 переводит триггер Т2 в «единичное» состояние. Прохождение импульса на Т2 через схему И1 обеспечивается уровнем логической «1» от триггера Т1 с его инверсного выхода. На прямом выходе триггера Т2 устанавливается уровень логической «1», который разрешает прохождение импульсов от ФИ3 через схему И2 на счётчик Сч. Счётчик начинает считать импульсы от ФИ3, количество которых пропорционально углу поворота коленчатого вала. Процесс подсчёта импульсов будет продолжаться до момента прихода поршня в верхнюю мёртвую точку, о чём «просигнализирует» импульс от ДВМТ, при этом импульс через схему ИЛИ переводит триггер Т2 в «нулевое» состояние. На прямом выходе триггера Т2 устанавливается уровень логического «0», что запрещает прохождение импульсов от ДУП на счётчик СЧ, а на инверсном выходе Т2 устанавливается уровень логической «1», который разрешает прохождение информации о состоянии счётчика СЧ на дешифратор DC. Задним фронтом импульса с прямого выхода триггера Т2 детектор заднего фронта формирует импульс, переключающий триггер Т1 в состояние логической «1», который уровнем логического «0» запрещает прохождение импульсов от ДНПТ. Процесс измерения прекращается. Таким образом, на индикаторе ИН высвечивается число импульсов, записанное в счётчик Сч, пропорциональное углу опережения подачи топлива в цилиндры дизельного двигателя.

Если угол опережения подачи топлива отличается от паспортных данных для данного типа двигателя, то необходимо выполнить операции регулировки. Если же угол опережения подачи топлива находится в допустимых пределах, то переходят к третьему этапу алгоритма диагностирования.

На величину неравномерности вращения вала двигателя, существенное влияние идентичность цикловой подачи топлива в цилиндры и правильность настроек форсунок. Качество настройки топливной аппаратуры может оцениваться длительностью подачи топлива в цилиндры дизельного двигателя t_i, по величине, которой, судят об идентичности цикловой подачи топлива.

Для реализации заключительного этапа диагностирования предлагается средство диагностирования топливной аппаратуры четырехцилиндрового четырехтактного

дизельного двигателя [19], структурная схема которого представлена на рисунке 6 и включает в себя:

- ДПТ1…ДПТ4 - первый, второй, третий и четвертый датчики подачи топлива в цилиндр;
- УПФ1 … УПФ4 - первый, второй, третий и четвертый усилители с полосовым фильтром;
- ФИ1…ФИ4 - первый, второй, третий и четвертый формирователи импульсов;
- ГОЧ - генератор образцовой частоты.
- ИЛИ1 … ИЛИ2 – первая и вторая схемы «ИЛИ»;
- И1… И3 - первая, вторая и третья схемы «И»;
- Т1 - первый триггер со счетным входом;
- ДБ - дифференцирующий блок;
- Т2 - второй «RS – триггер»;
- ДS - блок памяти;
- Сч1, Сч2 - первый и второй счетчики;
- ДС1, ДС2 – первый и второй дешифраторы;
- ИН1, ИН2 – первый и второй индикаторы.
- БУ1, БУ2 – первый и второй блоки управления.

Датчики ДПТ1…ДПТ4 устанавливаются на трубопроводы высокого давления соответствующих цилиндров. Полосовые усилители с полосовыми фильтрами УПФ1…УПФ4 предназначены для выделения и усиления сигнала впрыска топлива. Формирователи ФИ1…ФИ4 формируют импульсы длительностью соответствующей длительности подачи топлива в цилиндры двигателя. ГОЧ вырабатывает импульсы стабильной частоты.

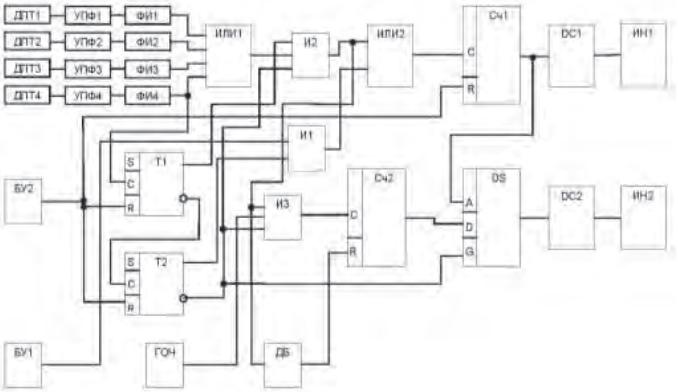


Рисунок 6 - Устройство измерения длительности подачи топлива в цилиндры двигателя. Схема структурная.

Работа устройства заключается в следующем.

По сигналу с БУ2 с началом измерений обнуляется счетчик Сч1, и переводятся в "нулевые" состояния триггеры Т1 и Т2. С приходом заднего фронта импульса от ДПТ4

триггер Т1 переводится в состояние "1". Уровнем "1" с первого выхода триггера Т1 разрешается прохождение импульсов длительности подачи топлива от схемы ИЛИ1 через схему И2 и ИЛИ2 на счетчик Сч1, который управляет адресными шинами блока памяти ДS. Уровнем "0" с первого выхода RS - триггера Т2 блокируется прохождение сигналов от блока управления БУ1 через схему И1, а уровнем "1" с инверсного выхода триггера Т2 разрешается прохождение импульсов от ГОЧ через схему И3 на счетчик Сч2. С приходом импульса от ДПТ1 через схему ИЛИ1 и схему ИЛИ2 на счетчик Сч1 последний переводится в состояние "1" и в блоке памяти ДS выбирается первая ячейка. В дифференцирующем блоке ДБ с приходом переднего фронта импульса формируется короткий импульс обнуляющий счетчик Сч2, которые начинает счет импульсов, приходящих от ГОЧ через схему И3, но только тогда, пока существует импульс длительности подачи топлива на схеме И3. С приходом второго импульса длительности подачи топлива во второй, по порядку работы, цилиндр счетчик Сч1 переводится в состояние "2" и выбирается вторая ячейка в блоке ДS, а в первой остается записанным состояние счетчика Сч2, пропорциональное времени подачи топлива в первый цилиндр. Коротким импульсом, сформировавшемся в блоке ДБ, счетчик Сч2 обнуляется и начинает считать заново импульсы, приходящие от ГОЧ через схему И3. Таким же образом происходит измерение времени подачи топлива в третий и четвертый цилиндры.

По заднему фронту импульса длительности подачи топлива в четвертый цилиндр триггер Т1 устанавливается в "нулевое" состояние, а триггер Т2 - в "единичное". Уровнем "0" с выхода триггера Т1 блокируется прохождение импульсов через схему И2. Уровнем "1" с первого выхода RS - триггера Т2 разрешается прохождение сигналов через схему И1 с блока БУ1 , а "нулевым" уровнем с инверсионного выхода триггера Т2 блокируется прохождение сигналов через схему И2 и И3, а также разрешается считывание информации с блока памяти ДS, состояние ячеек которого дешифрируется блоком ДС2 и отображается на индикаторе ИН2.

При расхождении в цикловой подаче топлива осуществляют настройку плунжерных пар насоса высокого давления и повторяют заново процесс диагностирования. Получив же положительные результаты замеров длительности подачи топлива исключают топливную аппаратуру из «подозреваемых», вызывающих недопустимые значения степени неравномерности вращения вала двигателя.

Список использованной литературы

1. Левин М.И. Автоматическая безразборная диагностика дизелей: Информационные аспекты, Двигателестроение, 1986. №3.с.20 - 22.

2. Кононов Б.Т., Стрелков Ю.И. Способы оценки технического состояния двигателей внутреннего сгорания. Депонировано в в / ч 11520, указатель поступлений, вып. 4, 1987 г., с. 26 - 30.

3. Выделение наиболее информативных параметров технического состояния отдельных деталей дизеля ДН 23 / 2*30 для диагностического контроля. / Петров А.С., Капитанский В.М., Гольмшток А.Д. Труды ЦНИДИ, №71, 1997.с.35 - 36.

4. Левин М.И. Автоматическая безразборная диагностика дизелей: Информационные аспекты, Двигателестроение, 1986. №5.с.11 - 17.

5. Ждановский С.С. и др. Диагностика дизелей автотракторного типа, Ленинград: Колос, 1970. - 77с.

6. Бельских В.И., Иванов Н.Т. Способ определения неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №785671, 1976, БИ №45, 1980. с.7 - 14.

7. Минаев В.С., Фёдоров А.В. Устройство для оценки неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №1139992, 1983, БИ№6, 1985. с.40.

8. Минеев В.С., Осипов В.П. Устройство для оценки неравномерности вращения вала двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №1250892, 1985, БИ №30, 1986. с.10 - 15.

9. Ивашев Р.А., Морозов Г.Ф. Устройство для контроля неравномерности вращения вала двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №754245, 1978, БИ №29, 1980. с.12 - 19.

10. Оставнов А.А. Устройство для оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №983484, 1980, БИ №47, 1982. с.8 - 17.

11. Устройство для оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №1193493. / Борисенко А.Н., Соболь В.Н., Зайончковский В.Н., Заславский Б.Г., 1984, БИ №43, 1985. с.21 - 26.

12. Патент США N4.295.363, кл.73 - 112, опубликован в 1981. - 23с.

13. Оставнов А.А., Гребенщиков А.С. Способ определения технического состояния многоцилиндрового двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №866432, 1977, БИ №35, 1981. с.41 - 45.

14. Способ оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №1029026. / Минаев В.С., Костенко С.И., Власенко В.Н. 1981, БИ №26, 1983. с.14 - 15.

15. Скибневский К.Ю. Способ проверки компрессии двигателя внутреннего сгорания: Авторское свидетельство СССР №1137369, 1983, БИ №4, 1985. с.19 - 28.

16. Стрелков Ю.И., Ильенко Н.А. К вопросу диагностирования топливной аппаратуры дизельного двигателя. Сборник статей Международной научно - практической конференции (8 февраля 2016 г., г. Магнитогорск) В 2 ч. Ч.2 – Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016. - 118 с.

17. Стрелков Ю.И., Васильев О.Е., Стрелков Е.Ю. Устройство измерения неравномерности вращения вала двигателя. ИНОВАЦИОННАЯ НАУКА: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ: сборник статей Международной научно - практической конференции (3 июня 2016 г., г. Саранск) В 2 ч. Ч. 1 - Уфа:МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016 г. - 303 с.

18. Стрелков Ю.И., Герасимов С.Ю., Стрелков Е.Ю. Устройство измерения угла опережения подачи топлива в цилиндры дизельного двигателя. Сборник статей студентов, аспирантов, молодых учёных и преподавателей. Уфа, 2016 г.

19. Стрелков Ю.И., Горбенко А.Ю., Зеленков С.А. Устройство для оценки технического состояния топливной аппаратуры дизельного двигателя. СИНТЕЗ НАУКИ И ОБЩЕСТВА В РЕШЕНИИ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ СОВРЕМЕННОСТИ: сборник статей

Международной научно - практической конференции (28 июля 2016 г., г. Уфа) В 2 ч. Ч. 2 - Уфа:МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016 г. - 294 с.
© Стрелков Ю.И., Горбенко А.Ю., Зеленков А.С., 2017

УДК 530.1 (075.8)

А.У.Умбетов
к.ф. - м.н., доцент, доктор философии (PhD)
Аркалыкский государственный педогагический институт им.И.Алтынсарина
М.Ж. Умбетова
старший преподаватель, магистр
Аркалыкский государственный педогагический институт им.И.Алтынсарина
Б.С.Садыкова
старший преподаватель, магистр
Аркалыкский государственный педогагический институт им.И.Алтынсарина
г.Аркалык, Казахстан

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БИПОЛЯРИЗАТОРЕ

Многие точные измерения, роль которых в современной науке и технике быстро возрастает, осуществляется интерференционными методами. Область применения интерференционных приборов значительно расширилась, благодаря созданию лазеров и развитию электроники. Существуют два способа, с помощью которых светувую волну, выходящую из источника, можно разделить на две или несколько частей, а затем соединить. Первый из них – разделение волны по фронту, второй – по амплитуде. Для разделения световой волны по фронту на волновой поверхности с помощью диафрагм, зеркал или других оптических деталей выделяются несколько участников. Лучи, выходящие из этих участков, идут в интерферометре различными путями и затем налагаются друг на друга. Разделение световой волны по амплитуде состоит в том, что волновая поверхность разделяется на две или несколько частей при ее частичном отражении и преломлении на границе двух сред. Из интерферометров второго типа можно выделить поляризованные интерферометры, в которых разделение световой волны по амплитуде осуществляется с помощью двупреломляющих кристаллооптических систем. Пучок лучей после прохождения через такую систему пространственно разделяется на два пучка, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Интерференционная картина формируется в области их переналожения при приведении калебании к одной плоскости с помощью анализатора. Эти приборы работают по принципу интерферометров сдвига, в которых переналогается изображение, сформированное лучами одной поляризации, со сдвинутым изображением, сформированное лучами с ортоганальной поляризацией. Преимущества таких устройств состоит в том, что исключается необходимость в эталонной поверхности и можно исследовать волновой фронт в любой точке. Свойства и возможности поляризационных интерферометров сдвига

определяются основным элементом прибора – двухкомпонентным кристаллоптическим элементом (ДКЭ) в виде биполяризатора (БП), который определяет тип сдвига: боковой сдвиг или сдвиг по углу.

В лазерных измерительных устройствах ДКЭ используются в двух

основных режимах: режиме пространсвенного разделения узкого светового пучка с ортоганальными поляризациями и режиме интерференции световых пучков на выходе системы. Первый режим используется для управления лазерным излучением, для слекции мод оптических резонаторов [1,2] и т.п. Второй режим работы ДКЭ лежит в основе действия поляризационных интерферометров сдвига [3]. Световой пучок разделяется системой на два ортогонально поляризованных пучка, фронты которых сдвинуты друг относительно друга. При смещении пучков при помощи анализатора в области их переналожения возникает интерференционная картина. Вид картины и ее контрастность позваляют анализировать характеристики падающего пучка, кривизну волнового фронта и степень когерентности излучения [4].

Рассмотрим в кратце применения ДКЭ в лазерных измерительных устройствах.

Лазерные дефлекторы.

Работа лазерных дискретных дифлекторов основана на двухэффектах: эффекте двойного лучепреломления и продольном электрооптическом эффекте Поккольса. Дефлектор представляет собой систему из чередующихся двупреломляющих кристаллов и ячеек Поккольса. Двупреломляющие кристалы расщепляют каждый падающий на них луч на два луча, а ячейка Поккольса пропускает обыкновенный (о) или необыкновенный (е) луч в зависимости от поданного на нее напряжения. N таких пар, установленных последовательно, обеспечивают 2^N положений луча на выходе системы. Дефлектор обеспечивает высокую скорость сканирования до 10^9 Гц, тогда как механическое сканирование дает частоту $10^4 \div 10^5$ Гц.

Селекция мод лазерного резонатора [1,2].

Размеры резонаторов, используемых в лазерах, значительно превышают длину оптической волны, вследствие чего эти резонаторы обладают большим числом близко расположенных мод. При использовании лазеров в системах оптической связи, при получении голограмм с высоким разрешением, в презиционной интерферометрии и в ряде других областей требуется большая спектральная частота излучения. В связи с этим, важным является вопрос о селекции мод лазерного резонатора и о получении одномодового режима. В [3,4], описывается получение узкополосной генерации с помощью фильтра Лио. Этот фильтр состоит из двупреломляющего кристалла, на обеих стронах которого поляризаторы. [2] описываются трехзеркальные резонаторы, в которых расщепление светового пучка осуществляется кристаллооптическими системами, которые используются в качестве расщепителей. Рассматривается применение двупреломляющего кристалла для расщепления светого луча на два паралельных луча, падающих на различные зеркала. Малые потери обеспечиваются только для тех частот, на которых оптическая длина пути одного луча отличается от оптической длины пути второго луча на целое число волн.

Известные двупреломляющие кристаллы [3] дают очень небольшое расщепление, и лучи распространяются близко друг от друга. Это создает определенные технические трудности. Более выгодно использовать кристаллооптические системы типа призм Волластона,Рошона

и Сенармона [4,5], расщепляющие световой луч на два луча, распространяющиеся под некотором углом друг к другу.

При выполнении настоящей работы решались следующие задачи:

- разработан эффективный метод расчета хода лазерного излучения через двухкомпонентный кристаллооптический элемент (ДКЭ) в виде биполяризатора (БП);
- получены выражения, удобные для анализа свойства таких систем и пригодные для инженерных расчетов;
- исследован режим интерференции поляризованных лучей на выходе БП и получены выражения, описывающие интерференционную картину.
- создан поляризационный интерферометр на основе БП для фиксации и измерения малых угловых перемещении объектов.

Основные области применения поляризационных интерферферометров с ДКЭ. В [15] приведен обзор основных оптических схем поляризационных интерферометров сдвига и отмечены основные области их применения.

Исследование изотронных объектов [6 - 11].

Измерения проводятся по виду интерференционной картины, возникающей при пересечении волновых фронтов, деформированных исследуемым объектом, установленным перед ДКЭ. Таким методом исследуется качества обработки оптических деталей, абберации объективов и линз, проводятся газодинамические исследования и т.д. В существующих приборах можно отметит: общий недостаток, состоящий в том, что применяемые ДКЭ задают сдвиг, который нельзя менять в зависимости от условий эксперимента.

Исследование разрешающей способности оптико электронных приборов и фотоматериалов, а также передаточных функции оптических элементов с помощью лазерных интерференционных резольвометров.

В настоящее время для микроэлектроники, голографии и других областей науки и техники созданы передающие телевизионные системы с высоким разрешением. Традиционные методы определения разрешающей способности, основанные на проектировании испытательных таблиц или штриховых мир на исследуемый объект обладают рядом недостатков [6,7].

А также проекционной метод имеет принципиальный недостаток, состоящий в том,что контраст изображения миры, создаваемый объективом, уменьшается с увеличением пространственной частоты. Это явление приводит к тому, что высокие численные значения разрещающей способности, получаемые проекционным методом, могут быть существенно заниженными, так как сама тестовая картина имеет пониженную контрастность.

От этих недостатков свободен интерференционный метод формирования тестовой картины. Этот метод не требует применения фокусирующей оптики, приводящей к падению контрастности на высоких пространственных частотах. Метод применим при работе в когерентном свете и дает контраст интерференционной картины, практически не зависящий от частоты. Равномерная интерференционная картина может быть сформирована на большой площади, что облегчает исследование разрешающей способности по полю фотоприемника.

Исследование геометрических параметров лазерных пучков. Для точной обработки результатов измерений в приборах квантовой электроники с применением лазерных

источников излучения необходимо с высокой точностью знать геометрические параметры лазерных пучков. Большинство методов измерения геометрических параметров лазерных пучков [8 - 12] основаны на прямом или косвенном фотометрировании распределения интенсивности пучка. Более точные результаты могут быть получены интерферическими методами. Вид интерференционной картины зависит от радиуса кривизны волнового фронта излучения, падающего на ДКЭ, что позволяет по интерференционной картине определить радиус кривизны волнового фронта в различных сечениях пучка, рассчитать положение "перетяжки" (где волновой фронт плоский), радиус пучка в "перетяжке" и угловую расходимость.

Исследование степени когерентности излучения.

Связь комплексной когерентности излучения с контрастностью интерференционной картины позволяет исследовать степень когерентности интерференционным методом [13 - 15]. В [29] приведен обзор интерференционных методов исследования степени пространственной когерентности. Рассмотрены исследования методом Юнга [16 - 19], с интерферометром Майкельсона [20], интерферометром Цендера - Маха [21], голографическом методом [22]. Эти методы обладают рядом недостатков. Интерферометр Юнга имеют малую светосилу, и разрешающая способность его ограничена размером отверстий. Интерферометры Майкельсона и Цендера - Маха сложно в юстировке и чувствительны к выбрациям.

Простыми и удобными в эксплутации оказались поляризационные интерферометры сдвига [23 - 28], в которых интерферируют два изображения источника света, сдвинутые на расстояние, определяемое свойствами ДКЭ. С помощью такого устройства исследовалась степень пространственной когерентности лазерного излучения [27], степень пространственной когерентности освещения в микроденсиметре [25 - 26], пространственные корреляционные функции поля и интенсивности лазерного излучения [23,24], фазовый переход при формировании пространственно - когерентных пучков в лазере [28].

Осуществления селективной амплитудной модуляции и пространственной фильтрации.

ДКЭ из анизотронного кристалла (линзы Волластона) можно использовать в качестве элемента, осуществляющего пространственное кодирование на входе спектрального прибора и декодирование на выходе [43,44]. А.Жирар [29] предложил использовать линзу Волластона для пространственного кодирования и декодирования в интерференционном спектрометре с селективной амплитудной модуляции. ДКЭ позволяет реализовать перестраиваемый пространственный фильтр [30].

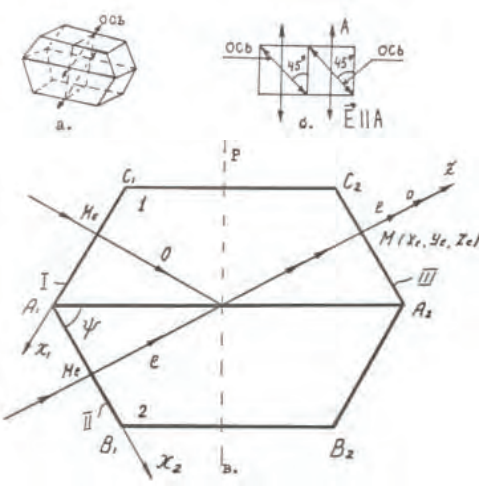
Призма Дове из одноосного кристалла.

Рассмотренный А.М. Стоэлдаровым ДКЭ [31] представляет собой поляризационную призму из исландского штата трапециальной формы, которая позволяет проводить поляризационные исследования в УФ области спектра. Комбинация из двух призм Дове образует биполяризатор, который был предложен Эйхенвольдом [37].

Цель исследования: разработка эффективного метода расчета хода лазерного излучения через двухкомпонентный кристаллооптическкий элемент (ДКЭ) в виде биполяризатор (БП), и исследование возможности использования БП в поляризационном интерферометре для измерения малых угловых перемещении объектов.

Задачи исследования: всесторонное, теоритическое и экспериментальное исследования БП, исследование интерференции поляризованных лучей, сформированных БП, рассмотрение возможности использования БП в работе поляризационного интерферометра для фиксации местоположения и измерения малых угловых перемещении объектов.

Биполяризатор (БП) представляет собой конструкцию, представленную на рис.1 а,б. Две призмы из исландского шпата с поперечным сечением в виде равнобочных трапеций (призмы Дове) склеены большими основаниями слоем канадского бальзама. Призма Дове из $CaCO_3$ рассматривалась [33]. В отличие от конструкций, рассмотренной в [34], ориентировка оптических осей в верхней и нижней призмах Дове такова, что оси расположены в вертикальной плоскости, параллельны между собой и образуют угол $\frac{\pi}{4}$ с плоскостью склейки (Рис.1б). Такой выбор ориентировка осей удобен при использовании БП для работы с лазерными источниками, имеющими вертикальную ориентацию вектора $\vec{E}$. Форму (БП) зададим параметрами: длина общего основания A_1A_2=2a длина боковой грани A_1B_l=l, $L(A_2A_1B_1)$=ψ (Рис.1в). Угол ψ подбирается таким образом, чтобы циркулярно - поляризованный луч при падении на грань под малым углом к нормали этой грани разделялся бы в БП на обыкновенный (о) и необыкновенный(е), причем е - луч проходил бы через слой клея удовлетворяющей условию $n_e < n_{кб} < n_0$, а о - луч испытывал бы на склейке A_1A_2 полное внутреннее отражение и выходил бы через грань A_2C_2. Точно так же циркулярно - поляризованный луч, падающий почти нормально на грань A_1B_1, разделяется на о - луч, который полностью отражается от склейки A_1A_2, а е - луч проходит через слой клея и выходит из БП через грань A_2C_2. Угол ψ удовлетворяющий поставленным требованиям, равен 65^0.



а) вид биполяризатора |БП| в аксиометрии,
б) вид БП сечении Р,
в) распространение о - и - е - волн в БП.
Рис.1

На выходе БП о - и е - лучи, смешиваются анализатором, установленным перпендикулярно ребру БП и дают интерференционную картину, определяемую условиями формирования лучей на гранях A_1C_1 и A_1B_1.

В эксперименте циркулярно - поляризованный луч падал на грань A_1,B_1, проходя через полупрозрачное (ПП) зеркало, которое давало возможность деления на два луча равной интенсивности. Отраженный от ПП зеркала луч с помощью другого, полностью отражающего (ПО), зеркала падал на грань A_1C_1. Для описания прохождения обоих лучей через БП введем две системами координат, К и K^1 связанные с гранями A_1C_1 и A_1B_1 (Рис.2), причем оси Z совпадают с внешними нормалями к этим граням.

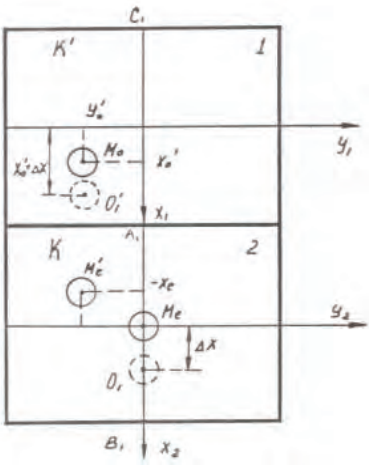
Пусть в эксперименте используется хорошо коллимированный луч лазера с циркулярной поляризацией. Рассмотрим сначала условия, когда при нормальном падении разделенных лучей на грани A_1C_1 и A_1B_1 на выходной грани БП A_2C_2 световые пятна от обоих лучей совпадают (последующие лучи). Нетрудно видеть, что орты оптических осей в системах координат К и K^1, запишутся соответственно в виде

$$\vec{a} = \left\{ \frac{\sin\psi}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{2}}; \frac{\cos\psi}{\sqrt{2}} \right\};$$

$$\overrightarrow{a^1} = \left\{ \frac{\sin\psi}{\sqrt{2}}; \frac{1}{\sqrt{2}}; -\frac{\cos\psi}{\sqrt{2}} \right\} \quad (1)$$

Пусть центр коллимированного пучка попадает на грань A_1B_1 в ее геометрическом центре. Нас будет интересовать траектория только е - луча. В БП она определяется направлением групповой скорости е - волны в кристалле. Зададим это направление единичным вектором $\vec{S}$, направление волнового вектора единичным вектором $\overrightarrow{K_1^e}$, который, как это следует из условия преломления на грани A_1B_1

$$\overrightarrow{K_1^e} = \left\{ \frac{\alpha}{n_e}; 0; 1 \right\} \quad (2)$$



Вид биполяризатора |БП| в сечении B_1C_1.

Рис.2

известно, что

$$\vec{S} = \mu\vec{K} + \eta\vec{\alpha} \quad (3)$$

Коэффициент μ и η найдём из соотношения

$$\left(\vec{s}\vec{a}\right)^2 = \frac{n_e^4\left(\overrightarrow{K_1^e}\vec{a}\right)}{n_0^4 - \left(n_0^4 - n_e^4\right)\left(\overrightarrow{K_1^e}\vec{a}\right)^2} \quad (4)$$

Уравнение (3) вместе с условием $\left|\vec{S}\right| = 1$ дает следующие выражения для искомых коэффициентов μ и η в предположении, что вектор $\overrightarrow{K_1^e}$ или совпадает, или мало отличается от направления нормали, а величина $\frac{n_0^2 - n_0^2}{n_0^2}$ мала:

$$\eta = -\left(\frac{n_0^2}{n_0^2} - 1\right)(\vec{a}\overrightarrow{k_1^e}),\ \mu = 1$$

и

$$\vec{S} = \overrightarrow{K} + \left(1 - \frac{n_0^2}{n_0^2}\right)(\vec{a}\overrightarrow{K_1^e})\vec{a} \quad (5)$$

Уравнение траектории е - луча в кристалле задается уравнениями

$$\frac{X}{S_x} = \frac{Y}{S_y} = \frac{Z}{S_z} \quad (6)$$

откуда центр е - луча попадает на грань A_2C_2 в точке M_e^1 (x_e,y_e,z_e) (используется координатная система К) и

$$X_e = -a\sin\psi\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right)\sin\psi\cos\psi$$

$$Y_e = -a\sin\psi\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right)\sin\psi\cos\psi \quad (7)$$

$$Z_e = 2a\sin\psi$$

Из рассмотрения хода о - луча на рис.1 можно сказать, что на грань A_1C_1 луч должен падать нормально в точке $M_0^1(x_0^1; y_0^1; 0)$, причем (в системе K')

$$X_0^1 = -a\sin^2\psi(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2})\cos\psi$$

$$Y_0^1 = -a(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2})\sin\psi\cos\psi \quad (8)$$

Таким образом, начальная юстировка луча, обеспечивающая совпадение световых пятен на выходной грани, такова: на грань A_2C_2 луч 2 направляется нормально в ее геометрический центр, на грань A_1C_1 помощью вспомогательного зеркала луч 1 направляется нормально в точку с координатами (6), смещенными от ее геометрического центра. Как будет показано, БП может использоваться для измерения весьма малых угловых перемещении (порядка единиц угловых секунд), и условия (8) определяют совмещение световых пучков на выходе БП. При идеальном изготовлении БП пятно на выходе БП имеет равномерную освещенность.

Рассмотрим теперь картину лучевых траекторий при повороте БП на малый угол α вокруг оси «У», лежащей в плоскости склейки A_1A_2, проходящей через

геометрический центр БП и нормальной плоскости чертежа на рис.1. Нетрудно видеть, что этот поворот сместит X - ую координату точек входа лучей на гранях A_1B_1 и A_1C_1 на расстояние

$$\Delta X = \frac{\alpha l}{2} tg\psi \quad (9)$$

Составляя, как и ранее, уравнения для оси e - луча с помощью формулы (6) и вектора (2) (величинами порядка α^2 снова пренебрегаем), получим для пересечения этой оси с выходной гранью A_2C_2 точку $M_e^{'}(X_e^{'}, Y_e^{'}, 2\alpha \sin\psi)$ с координатами (в системе К)

$$X_e^1 = \frac{\alpha l}{2} tg\psi + \alpha \sin\psi \left[\frac{\alpha}{n_e} - \left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right) \frac{\sin\psi \cos\psi}{2} \right] \quad (10)$$

$$Y_e^1 = -h\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right) \frac{\cos\psi}{2} + \frac{\alpha}{n_e} \frac{\sin\psi}{2}$$

Прямое геометрическое рассмотрение с помощью рис.1 дает соответствующую точку пересечения оси o - луча с выходной гранью A_2C_2

$M_e^{'}(X_e^{'}, Y_e^{'}, 2\alpha \sin\psi)$, где

$$X_0^1 = -a\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right) \sin^2\psi \cos\psi - \frac{\alpha l}{2} tg\psi + \frac{2\alpha \sin\psi}{n_0} \quad (11)$$

$$Y_0^1 = -a\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right) \sin\psi \cos\psi$$

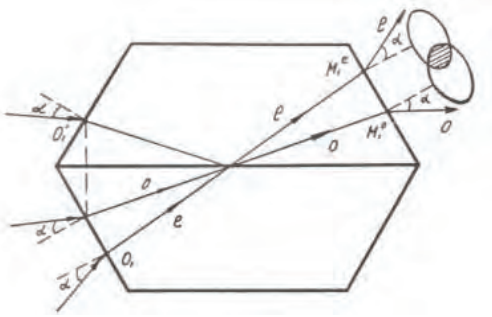
Отсюда можно получить условие, ограничивающее верхний предел измеряемых углов. В самом деле, для того, чтобы существовала соответствующая интерференционная картина, o - и e - пучки должны пересекаться на выходной грани A_2C_2. Если радиус этих пучков r_o, то должно быть $M_eM_o < 2r_o$ или

$$\alpha \prec \frac{r_0 ctg\psi}{\sqrt{\left(1 + 2\alpha \cos\psi \left(\frac{1}{n_e} - \frac{1}{n_0}\right)\right)^2 + \alpha^2 \sin^2\psi \cos^2\psi \frac{1}{n_e^2}\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right)2}} \quad (12)$$

Условие пределы можно увеличить, если начинать юстировать БП в положении расходящихся o - и e - пучков на выходной грани. Это можно сделать, если точку (9) на входной грани немного сместить вдоль оси X^I системы K^I. Однако, этот способ хорош только в случае заранее известного направления углового отклонения луча.

Для параметров, используемых в экспериментах с БП (l=11мм, α=11.7 мм, ψ =68^0), из (13) при r_o=3мм получим α<3^0, что качественно согласуется с экспериментом.

Интерференционная картина, возникающая при пересечении пучков на выходе БП, может быть описана следующим образом. На рис.3 показаны траектории o - и e - лучей, полученные после описанной выше юстировки этих лучей и последующего поворота БП на угол α. Начальная установка БП соответствует нормальному ходу o - и e - лучей к граням A_1B_1 и A_1C_1. При этом o - и e - луч выходят нормально к грани A_2B_2 в одной точке с координатами (9) при повороте БП на угол α точки попадания o - и e - лучей на грань A_2C_2 различны, причем точка, принадлежащая o - лучу перемещается параллельно оси X, а e - лучу - вдоль прямой, описываемой уравнением.



Работа биполяризатора |БП| в режиме интерференции о - и - е - волн.
Рис.3

$$Y - Y' = (x - x_0)\frac{\frac{\cos^2\psi}{n_e}\left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2}\right)}{\frac{\iota}{2a} + \frac{2\cos\psi}{n_e}} \quad (13)$$

Угол между волновыми векторами вышедших из грани A_2C_2 о - и е - лучков равен 2α.

Если описывать волновое поле в пучках плоскими волнами то, например, для электрического вектора волны после прохождения анализатора можно написать в системе координат К

$$\overrightarrow{E_0} = \overrightarrow{E^0} e^{-i\frac{w}{c}\sin ax + i\frac{w}{c}\cos az}$$

$$\overrightarrow{E_e} = \overrightarrow{E^0} e^{-i\frac{w}{c}\sin ax + i\frac{w}{c}\cos az + i\Delta}, \quad (14)$$

где $\overrightarrow{E^0}$ - комплексная амлитуда, которая для простоты взята одинаковой для о - и е - волны с ортогональной поляризацией (это всегда можно сделать путем поворота анализатора на угол 45°), Δ - оптическая разность хода между о - и е - лучами. Интенсивность в месте пересечения о - и е - пучков, определяется соотношением

$$I = |\overrightarrow{E_0} + \overrightarrow{E_e}|^2 = 4\,|\overrightarrow{E^0}|^2 \cos^2\frac{w}{c}\sin ax + \frac{\Delta}{z} \quad (15)$$

Условие максимума определяется соотношением

$$\frac{w}{c}\sin ax + \frac{\Delta}{2} = \pi S, \quad (16)$$

где S - целое число.

Интерференционная картина представляет собой систему эквидистантных полос, параллельных оси У с расстоянием между полосами, определяемым из (17):

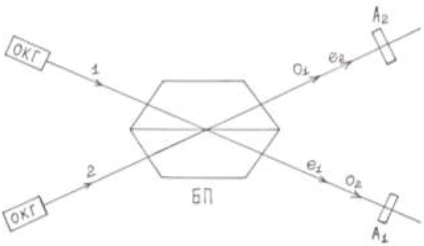
$$\Delta x = \frac{\lambda}{2a}, \quad (17)$$

где λ - длина волны излучения.

Предел разрешения линий интерференционной картины будет определяться разрешающей силой микроскопа, через который наблюдается интерференционная картина и длиной волны излучения.

Интерференционный режим работы БП заключается в следующем. Лазерный пучок и призмы, дающие два пучка, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (двупреломляющие призмы) рис.4 попадая входной грани БП разделяется на два пучка ортогональной поляризации. Обыкновенный (o_1) и необыкновенный (e_1). БП выполнен так, что главные оси в обеих призмах Дове параллельны между собой, лежат в плоскости, перпендикулярной боковым граням и основаниям БП, и составляют угол 45^0 с основаниями призм Дове. Это создает удобства при работе с лазерными источниками, у которых излучение поляризованно в вертикальной плоскости, то есть падающий на БП световой луч имеет колебания электрического вектора параллельно ребру БП. Таким образом создается условие формирования о - и е - пучков равной интенсивности, необходимое для получения интерференционной картины с максимальной контрастностью. Обыкновенный луч (o_1) выходят из БП, претерпев полное внутреннее отражение на склеенных основаниями призмы Дове. Склейка выполнена тонким слоем канадского бальзама, так как канадский бальзам имеет промежуточный показатель преломления: $n_e < n_{кб} < n_0$.

Необыкновенный луч (e_1) проходит через БП, не претерпевая отклонения. Лазерный пучок 2 (Рис.4), попадая входной грани БП тоже разделяется на два пучка ортогональной поляризации; (o_2) и (e_2). Таким образом на выходе БП имеют четыре (o_1 , e_1, o_2, e_2) поляризованных луча. Между лучами o_1 e_2, и e_1 o_2, в двух измерительных каналах осуществляется фотосмещения с помощью анализатора (А). Интерференционная картина получается в виде полос равной ширины, параллельных боковым граням БП. При любом незначительном повороте БП получается взаимное смещение интерференционных полос в обоих плечах схем.



Режим работы биполяризатора (БП)
Рис.4

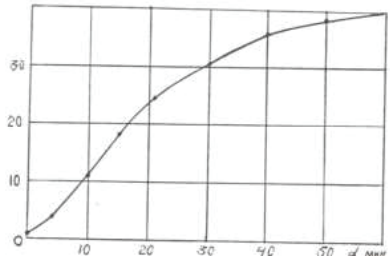
Экспериментально исследовалась зависимость пространственной частоты интерференционного растра от угла падения света на входным граням БП. Результаты эксперимента представлены на рис.5. Эксперимент показал, что интервал измеряемых углов составляет $\alpha \cong \pm 70^1$.

На рис.6 представлена схема работы БП в режиме «расщепителя лазерного пучка». Коллимированный лазерный пучок с диаметром поперечного сечения $\sim$ 5мм проходит через склеенных основанием призм Дове, и на выходе БП образуются восемь лучей поляризованных по четыре луча в ортогональных плоскостях. Пучки 1, 2, 4 и 4^1 –являются обыкновенными, а 1^1, 2^1, 3^1 и 3 - необыкновенными лучами. Пучки 1, и 2, а также 1^1, и 2^1 -

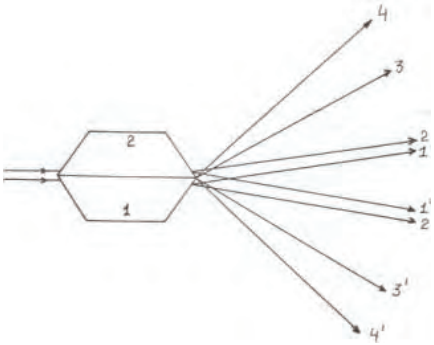
распространяются параллельно между собой (как показано на рис.5). Последний из исследованных нами режимов, хотя и не является характерным для БП, но может быть применен в ряде случаев для мультиплицирования лазерного пучка по восьми каналам. Наиболее типичным режимом работы БП следует считать двухканальный режим с возможностью получения интерференции в каждом из каналов и последующем фотодетектировании результирующего сигнала.

В таком виде БП можно рекомендовать в качестве выводящего лазерных пучков устройства в лазерном гироскопе триангулярного типа.

γ, пар.лин / мм\



Зависимость пространственной частоты интерференционных полос
в БП от угла поворота α.
Рис.5



Работа биполяризатора |БП| в режиме «ращепителя лазернего пучка».
$|1,2,4,4^1|$ - о – лучи, $|1^1,2^1,3^1,3$ –е - лучи.
Рис.6

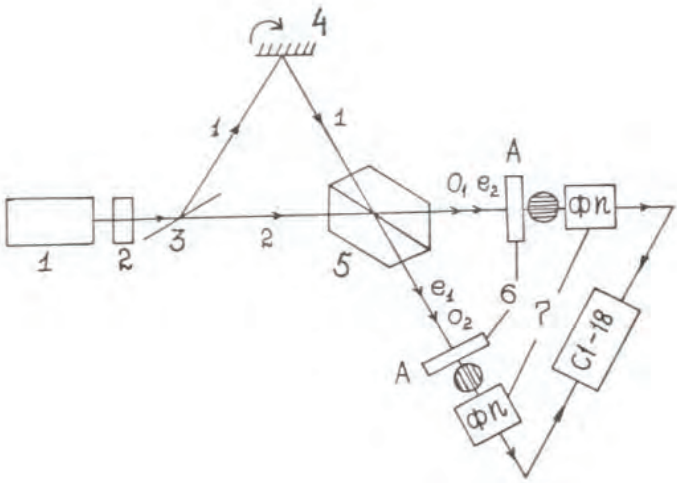
На основе разработанной теории БП нами был предложен [35] поляризационный интерферометр с использованием БП. Как следует из выражения (18) существует зависимость пространственной частоты интерференционной картины на выходе БП от угла падения лазерного луча на входную грань БП, что дает возможность использовать БП для отслеживания или измерения малых угловых перемещений объекта.

В известных устройствах [36 - 37] для решения указанных задач используются несколько типов двупреломящих пластинок одновременно или в отдельности. Точность измерения

малых угловых перемещений объекта в известных устройствах не высока (порядка нескольких десятков угловых секунд).

Конструкция БП позволяет построить схему, с помощью которой можно измеряять малые угловые перемещения объектов с высокой точностью (порядка десятых долей угловой секунды). Одной из таких возможных схем рассмотрена ниже(Рис.7).

Работа устройства заключается в следующем. Световой пучок от источника поляризованного излучения I после расширения и формирования в параллельный пучок с помощью коллиматора (2), состоящего из микрообьектива и длиннофокусного объектива в фокусном положении, разделяется светоделителем 3 на два пучка одинаковой интенсивности, один из которых направляется на плоское зеркало 4, установленного на обьекте, и, отражаясь, падает на БП 5, а другой пучок, пройдя через светоделитель 2, также падает на БП 5, причем оба пучка падают нормально на входные грани БП. Каждый из пучков, падающих на выходные грани БП, разделяется на два пучка ортогональной поляризации: обыкновенный (о) и необыкновенный (е) (Рис.7).



Поляризационный интерферометр для измерения малых угловых перемещений объекта.
Рис.7

БП выполнен так, что главные оси в обеих призмах Дове параллельны между собой, лежат в плоскости, перпендикулярной боковым граням и основаниям БП, и составляют угол 45^0 с основаниями призм Дове. Это создает известные удобства при работе с лазерными источниками, у которых излучение поляризовано в вертикальной плоскости, то есть падающий на БП световой луч имеет колебания электрического вектора параллельно ребру БП. Таким образом создается условие формирования о - и е - пучков равной интенсивности, необходимое для получения интерференционной картины с максимальной контрастностью. Обыкновенные лучи (o_1,o_2) выходят из БП, перетерпев полное внутреннее отражение на склеенных основаниями призмах Дове. Склейка выполнена тонким слоем

канадского бальзама, так как канадский бальзам имеет промежуточный показатель преломления:

$n_e < n_{к.б} < n_0$

Необыкновенные лучи (e_1, e_2) проходят из БП, перетерпевая отклонения. На выходе БП между лучами o_1 e_2 и e_1 o_2 в двух измерительных каналах необходима осуществить фотосмещения. Для этой цели в обе плеча интерферометра вводятся анализаторы 5, ориентированные перпендикулярно ребру БП, фотоприемники 6 регистрируют сигналы в сбоях каналах. При любом незначительном повороте плоского зеркала 4 получается взаимное смещение интерференционных полос в обоих плечах поляризационного интерферометра. Разностный сигнал, регистрируемый с фотоприемников 7, является мерой углового перемещения плоского зеркала 4, установленного на обьекте.

Чувствительность предложенного устройства можно характеризовать с помощью выражения (18). Предварительные испытания макета интерферометра показали, что для интервала измеряемых углов $\alpha=\pm 70^1$ достигается точность измерений порядка угловой секунды. При повышении требований к виброустойчивости измерение смещений интерференционной картины может быть выполнено с точностью 1 / 10 полосы, что эквивалентно угловому перемещению объекта порядка десятой доли угловой секунды.

Предлагаемое устройство обладает следующими преимуществами по сравнению с известными аналогами:

1) повышает точность измерения малых угловых перемещений объектов.

2) упрощает конструкцию интерферометра.

Разработан метод расчета хода электромагнитных волн в ДКЭ - биполизаторе (БП) из одноосного кристалла.Получены выражения, удобные для анализа свойства БП.

Рассмотрена работа БП в режиме интерференции поляризованных пучков на выходе БП. Выведена зависимость пространственной частоты интерференционных полос, формируемых БП, от угла падения лазерных пучков на входные грани БП.

Показано возможность использования БП для измерения малых угловых перемещений объектов в поляризационном интерферометре.

Предложенный поляизационный иетерферометр позволяет с большой точностью фиксировать и измерять малые угловые перемещений объектов и упрощает конструкцию иетерферометра.

Список использованной литературы:

1. Kulcke W., Kosanke K., Max E., Fleisher H., Harris T. Converget beam digital Light deflector - Optical and Electro - Optical Information. Proctssing, 1985,p 371.
2. Smith P.W. Mode selection in lasers. - Prog. IEEE1982, V.10,p.422.
3. White A.D Laser cavities with increased axial mode separation – The Bell Sistem. Tech Y., 1986, v.45.
4. Walther H., Hall Y.L.Tunable dye laser with nassow spectrel output. - Appl.Phys.Lett., 1980, v.17,p239.
5. Cirkovic L., Evans H.Y., Forrest H.Y., Katrenstein Use of a birefringent plate to control the spectral emission of a ruby laser. - Appl.Opt., 1988,v.7,p.981.
6. Каламийцов Ю.В. Интерферометры. - Л.:Машиностроение, 1986

7. Csillag L., Janossy M., Kantor K. Invtstigation of spatial coherence and phase chage in the modes of a Ge - Ne laser. - Phys. Lett., 1986,v.20,p.626.

8. Svetlik j. Simpl methods for measurement of laser beam parameters. - Appl.Opt.,1984,v.13,p.1275

9. Bryngdahe o Applications of shearing Interftrometry - "Progress in Optics", 1986,v.4, p.38.

10. Ebersole J,F Optial image substations – Optical Engineering 1985, v.14., p.38

11. Tsuruta T.A new type of shearing interferometer for the measurement of transfer fungtions of the microscope objective. - Appl.Opt.,1983,v.2,n.4,p.371.

12. Martienssen W., Spiller E. Coherence and fluctuation in light beam. - Amer.J.of Phys., 1980.,v.32.,p.919.

13. Saunders J.B.A simple interferometric method for workshop testing of Optic. - Appl.Opt.,1980.,v.19.,p.1623.

14. Merzkirch Generalized analysis of shearing interferometers as applied for cas. dynamic studies. - Appl.Opt.1984.,v.13.,p.409.

15. Smith Optical image evaluation and the transfer function / - Appl.Opt.,1983,v.2,p.335.

16. Зверев.В.А. Радиооптика. - М.: Советское радио, 1985.

17. Грудмен Дж. Введение в Фурье – оптика. - М.: Мир, 1990.

18. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. - Мир, 1995.

19. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. - Мир.: Мир, 1995.

20. Акаев А.А ., Майоров С.А. Когерентные оптические вычислительные машины. - Л.: Машиностроение, 1997.

21. Косов Г.Я. Исследование частотно - контрастных характеристик различных объективов, применяемых в телевизионных системах. - Электронная техника, серия 4, вып.3, 1997.

22. Гдалин В.С. Измерение параметров телевизионных передающих и приемных трубок. - М.: Советское радио, 1998.

23. Семенов Е.П. О разрешающей способности электронно - оптических преобразователей. - ОМП, 1987.№ I, с.I2.

24. Bruscaglioni R., Optica, 1986.v.1,p.3.

25. Ашулов Г.А. Хухрина М.Д. Успехи научной фотографии, 1985, № 4, с. I06.

26. Nopking R.E., Clapper F.R. Gratings made by photographing interference fringes. - JosA, 1988,v.38, p.661.

27. Saunders J.B. A simple interferometric method for workshop testing of optics – apple .opt , 1990, v.19,p& 1623

28. Merzkirch w. Generalized analysis of shearing interferometers as applied for cas. dynamic studies – Appl,opt ,1994, v,13.p 409.

29. Smith F. Optical image evaluation and the transfer function – Apple .opt, 1993 ,v.2.p.335

30. Экспериментальная радиооптика . - в сб.статей под ред. Зверенева В.А., Степанова Н.С. - М.: наука, 1989.

31. Зверев В.А. Радиооптика. - М.:Советское радио,1995

32. Гудмен Дж.Введение в фурье – оптику. - М.: Мир,1970.

33. Назарова Л.Г. Измерение степени когерентности лазера методом Юнга. - Оптика и спектроскопия , 1970, т.29, с. 757.

34. Бычков С.И., Дукянов Д.П., Бакаляр А.И. Лазерный гироскоп. –М.: Советское радио,1975.

35. Батыраков А.С., Бутусов М,М., Гречка Г.П. и др. Лазерные измерительные системы. - М.:Радио и связь, 1981.

36. Бакалияр А.И., Лукьянов Д.П. Основы теория кольцевых лазерных гироскопов и их применение в навигационных комплексах. Л.,: ЛИВИКА им. А.Ф. Можайского.

37. Барсуков К.А., Осипов Ю.В., Попов, В.Н.Фирсов, В.С. Лазерный интерференционный резольвометр и его применение для испытания электронно - оптических систем. – Третья всесоюзная школа по оптической обработке информации. Тезисы докладов. Рига, 1980, с. 223.

38. Bass M., Decusatis C. Handbook of Optics. Volume II: Design, Fabrication and Testing, Sources and Third Edition. — The McGraw - Hill, 2010. 1264 p

39. Bass M., Enoch J.M. Handbook of Optics. Volume Third Edition. — The McGraw - Hill, 2010. — 1250 p.

40. Berberan - Santos M.N. (Ed.). Fluorescence of Supermolecules, Polymers, Springer, 2008. - 468 p.

41. Berova N., Polavarapu P.L., Nakanishi K., Woody R.W. (Eds.). Comprehensive Chiroptical Spectroscopy, Applications in Stereochemical Analysis of Synthetic Wiley, 2012. - 863 p.

42. Billings C.W., Tabak J. Lasers: The Technology and Uses of Crafted Light Facts On File, Inc., 2006. XIV, 162 p.

43. Binh L.N. Guided Wave Photonics: Fundamentals and Applications with MATLAB CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. — XXVI, 758 p.

44. Binh L.N., Ngo N.Q. Ultra - Fast Fiber Lasers: Principles and Applications With MATLAB Models CRC Press, 2010. - 419 pp.

45. Boggs S.Jr., Krinsley D. Application of Cathodoluminescence Imaging to the Study of Sedimentary Rocks Cambridge University Press, 2006. — 178 p.

46. Boreman G.D. Basic Electro - Optics for Electrical Engineers The Society of Photo - Optical Instrumentation Engineers, 1998. - 105 p.

47. Boyd Robert W. Nonlinear Optics 3rd ed. - Elsevier Inc., 2008. - 620 p.

48. Boyd Robert W. Nonlinear optics Second Edition - Elsevier Science / AP, 2003. - 578 p.

49. Bretenaker F., Treps N. Laser: 50 Years of Discoveries World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. - 185 p.

50. Chang W.S.C. Principles of lasers and optics Cambridge University Press, 2005. - 262 p.

© А.У.Умбетов, М.Ж.Умбетова, Б.С.Садыкова, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Вотинов Максим Валерьевич
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ РЫБЫ
ПРИ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ 4

А.В. Жебо
ТОВАРОВЕДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТДЕЛЬНЫХ
ДИКОРАСТУЩИХ ПЛОДОВ И ЯГОД ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА 16

Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Жумашев К.Ж., Мусина А.Е.
ОКИСЛИТЕЛЬНО - ХЛОРИРУЮЩИЙ ОБЖИГ
НИЗКОСОРТНЫХ МЕДНЫХ СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ 29

Миронович Л.М., Иванов С.М.
L.M. Mironovich, S. M. Ivanov
ПИРАЗОЛО[1,2,4]ТРИАЗИНЫ: СИНТЕЗ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
PYRAZOLO[1,2,4]TRIAZINES: SYNTHESIS AND REACTIVITY 51

В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ 6–10 кВ АПК 64

Стрелков Ю. И., Горбенко А.Ю., Зеленков А.С.
ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА 87

А.У.Умбетов, М.Ж. Умбетова, Б.С.Садыкова
РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В БИПОЛЯРИЗАТОРЕ 104

АЭТЕРНА

НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

http://aeterna-ufa.ru
+7 347 266 60 68
+7 987 1000 333
info@aeterna-ufa.ru
ICQ: 333-66-99
Skype: Aeterna-ufa
г. Уфа, ул. Гафури, 27/2

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие
в Международных научно-практических конференциях.

Форма проведения конференций: заочная, без указания формы проведения в сборнике статей;
По итогам издаются сборники статей. Сборникам присваиваются индексы УДК, ББК и ISBN.
Всем участникам высылается индивидуальный сертификат участника, подтверждающий участие в конференции.
В течение 10 дней после проведения конференции сборники размещаются сайте **aeterna-ufa.ru**, а также отправляются в почтовые отделения для рассылки, заказными бандеролями.

Сборники статей размещаются в научной электронной библиотеке elibrary.ru и регистрируются в базе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)

Стоимость публикации от 130 руб. за 1 страницу. Минимальный объем-3 страницы
Печатный сборник, печатный сертификат, размещение в РИНЦ, почтовая доставка авторского экземпляра сборника уже включены в стоимость

С полным списком конференций Вы можете ознакомиться на сайте **aeterna-ufa.ru**

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ИННОВАЦИОННАЯ НАУКА

ISSN 2410-6070 (print)
Свидетельство о регистрации СМИ – ПИ №ФС77-61597

Договор о размещении журнала в НЭБ (РИНЦ, elibrary.ru) №103-02/2015
Договор о размещении журнала в "КиберЛенинке" (cyberleninka.ru) №32505-01

Рецензируемый междисциплинарный международный научный журнал «Инновационная наука» приглашает авторов опубликовать результаты своих научных исследований

Формат издания журнала*:* Журнал издается в печатном виде формата А4
Периодичность выхода*: ежемесячно (прием материалов до 12 числа каждого месяца)*. Статьи принимаются Редакцией журнала постоянно без каких- либо ограничений по времени.
В течение 15 дней после окончания приема материалов в очередной номер журнал будет отправлен в почтовые отделения для рассылки. Рассылка будет произведена заказными бандеролями.
На сайте Редакции выложены все номера журнала и представлена подробная информация о нем и требования к статьям.

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

В авторской редакции
Издательство не несет ответственности за опубликованные материалы.
Все материалы отображают персональную позицию авторов.
Мнение Издательства может не совпадать с мнением авторов

Подписано в печать 07.07.2017 г. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 07,03. Тираж 500. Заказ 620.

АЭТЕРНА
НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

Отпечатано в редакционно-издательском отделе
НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «АЭТЕРНА»
450076, г. Уфа, ул. М. Гафури 27/2
http://aeterna-ufa.ru
info@aeterna-ufa.ru
+7 (347) 266 60 68