

**А. Э. Волошин, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
В. Л. Маноменова, А. И. Родионов, И. Д. Родионов,
И. П. Родионова, Е. Б. Руднева**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КЛАСТЕР
КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК
ПОД ОБЩИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Представлено к печати
врио директора ИКИ РАН
И. В. Чулковым

Automated cluster of crystallization facilities under general control

*A. E. Voloshin¹, V. V. Egorov², A. P. Kalinin³, V. L. Manomenova¹,
A. I. Rodionov⁴, I. D. Rodionov⁵, I. P. Rodionova⁵, E. B. Rudneva¹*

¹ Shubnikov Institute of Crystallography of Russian Academy of Sciences (IC RAS), Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow

² Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow

³ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow

⁴ Joint Stock Company "Scientific and Technical Center Reagent", Moscow

⁵ Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow

Description of big automated cluster of crystallizers that includes 22 small clusters each of them contains 10 crystallization facilities is given. The problems of crystallization facilities construction and functioning, clustering as well as control their work including remote control by means of Internet are considered. Software for operator workstation was created for control by automated cluster of crystallization facilities. Operation of control system by crystallizers was tested by means of growing experimental crystals.

Keywords: crystallizer, controlling system, cluster, control program, crystal, automation-equipped working place.

Автоматизированный кластер кристаллизационных установок под общим управлением

*А. Э. Волошин¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин³, В. Л. Маноменова¹,
А. И. Родионов⁴, И. Д. Родионов⁵, И. П. Родионова⁵, Е. Б. Руднева¹*

¹ Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова Российской академии наук (ИК РАН) ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), Москва

⁴ Закрытое акционерное общество «НТЦ «Реагент», Москва

⁵ Институт химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук (ИХФ РАН)

Приводится описание большого автоматизированного кластера кристаллизаторов, включающего в себя 22 малых кластера, каждый из которых содержит десять кристаллизационных установок. Рассматриваются вопросы конструкции и функционирования кристаллизационных установок, объединения их в кластеры, а также управления работой установок, в том числе дистанционного, посредством выхода в интернет. Для управления автоматизированным кластером кристаллизационных установок было создано программное обеспечение. Работа системы управления кристаллизаторами была протестирована путём выращивания экспериментальной партии кристаллов.

Ключевые слова: кристаллизатор, система управления, кластер, программа управления, кристалл, автоматизированное рабочее место.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в оптико-электронных приборах требуются кристаллы с определёнными свойствами. Так, в частности, в фотоприёмной аппаратуре, работающей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, необходимо иметь область пропускания кристалла, используемого в объективе прибора, в диапазоне 250–280 нм (Belov et al., 2014). Выращивание таких кристаллов занимает длительное время (до 3–4 мес) и в течение этого времени требуется поддерживать строго заданные условия согласно технологической программе (ТП). В процессе выращивания кристалла отклонение температуры маточного раствора не должно превышать $\pm 0,05$ °С от заданного значения. Любое отклонение от ТП и, в частности, аварийные ситуации, могут привести к выходу бракованного кристалла после многомесячного цикла выращивания.

Ранее было разработано устройство для задания, поддержания и контроля условий роста кристаллов (Степанов и др., 2011), однако, его возможности позволяли успешно регулировать процесс в одной кристаллизационной установке, что подходит для лабораторного выращивания кристаллов, но не очень удобно для серийного производства.

Однако при серийном производстве приборов, в которых используются выращиваемые кристаллы, необходимо иметь более 200 подобных установок. Управление таким количеством установок является очень сложным, требуется многочисленный штат сотрудников.

Целью работы являлось описание принципов построения и функционирования системы выращивания водорастворимых кристаллов, состоящей из большого числа кристаллизационных установок с автоматизированной системой управления, обеспечивающей надёжную работу всех кристаллизационных установок и их дистанционное управление.

Было решено остановиться на кластерной системе, в которой малые кластеры из 10 кристаллизационных установок с общей системой управления, в свою очередь, объединяются в большой кластер из 220 кристаллизационных установок (с возможностью увеличения общего их числа в системе до 500 штук) с общей системой управления и возможностью выхода в интернет, так что это позволит следить за работой каждой кристаллизационной установки и управлять ею дистанционно.

КРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ УСТАНОВКА

Принципиальная схема ростовой кристаллизационной установки, которая была неоднократно описана в литературе (см., например, (Петров и др., 1983)), не изменилась. Однако существующая конструкция была существенно доработана с целью повышения надёжности её функционирования. Доработанная кристаллизационная установка показана на рис. 1.

Был изменён узел вращения мешалки кристаллизатора, конструкция которого смогла обеспечить высокую степень соосности входящих в него элементов, что предотвращает повреждение вращающихся частей кристаллизационной установки, не происходит образование «натира» с осей и втулок, существенно снижаются вибрации и тем самым уменьшается вероятность возникновения паразитных кристаллов. В конструкцию добавлены два датчика Холла для контроля вращения мешалок термостата и кристаллизатора. Был добавлен резервный термодатчик.

Кристаллизационная установка состоит из следующих частей (рис. 1):

- термостата с дистиллированной водой 1;
- кристаллизатора с маточным раствором, из которого растёт кристалл 2;
- платформы 3 с выращиваемым кристаллом;
- двух термопреобразователей сопротивления (датчика температуры) 4, служащих для измерения температуры жидкости внутри термостата;
- двух тепло-электрических нагревателей (ТЭН) 5, служащих для нагрева воды в термостате;
- конвекционного ротора (мешалки) 6, приводимого в движение электроприводом 8 конвекционного ротора, служащего для улучшения конвекции жидкости в термостате;

- датчика уровня жидкости (ДУ) 7, предназначенного для контроля уровня воды в термостате;
- датчиков Холла 10 (2 шт.) для контроля наличия вращения конвекционных роторов 6 (второго датчика Холла не видно);
- конвекционного ротора (мешалки) 11, приводимого в движение шаговым двигателем 9, служащего для улучшения конвекции жидкости в кристаллизаторе 2.

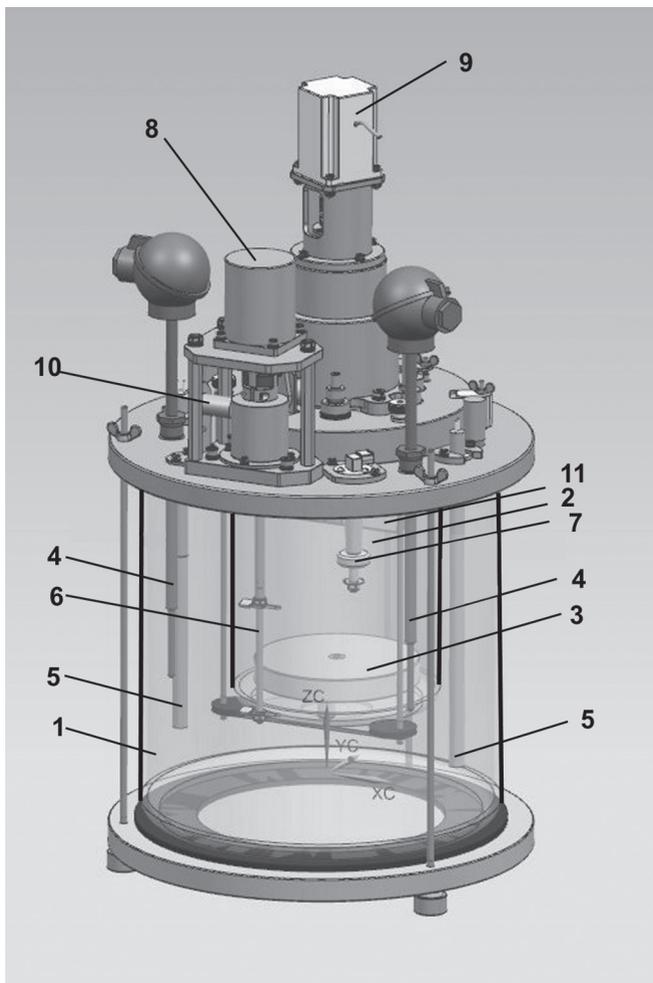


Рис. 1. Кристаллизационная установка

Кристаллизационная установка функционирует следующим образом. В стеклянный резервуар кристаллизатора 2 помещается платформа 3, на которой закреплён затравочный кристалл. Кристаллизатор 2 помещается в термостат 1, заполненный дистиллированной водой. В кристаллизатор 2 заливается маточный раствор. В термостате поддерживается температура по заданной технологической программе путём управления тепло-электрическими нагревателями. Одновременно с выполнением ТП для обеспечения равномерного распределения температуры внутри термостата осуществляется вращение конвекционного ротора 6 при помощи электропривода 8. Для обеспечения равномерного омывания растущих граней кристалла маточным раствором производится перемешивание самого маточного раствора мешалкой из оргстекла или фторопласта 11. Процесс роста (длительность выполнения ТП) может длиться от двух недель до нескольких месяцев. Это время определяется типом выращиваемого кристалла. На всём протяжении процесса роста кристалла отклонение значения температуры воды в термостате от температуры, заданной в ТП, не должно превышать $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, иначе в кристалле образуются дефекты, которые отрицательно скажутся на его качестве, что может сделать невозможным применение его в качестве оптического фильтра.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КЛАСТЕР ИЗ 220 КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

На рис. 2 представлена блок-схема кристаллизационного кластера из 220 кристаллизационных установок с системами управления. Здесь цифрой 1 обозначены кристаллизационные установки. Кластер из 10 кристаллизационных установок управляется блоком индикации и управления (УУ). Таких блоков УУ 22 шт.

Для объединения кластеров из 10 кристаллизационных установок в большой кластер из 220 кристаллизаторов служит так называемый коммутатор нижнего уровня 4. Этот коммутатор нижнего уровня подключается к центральному серверу 5. Центральный сервер (ЦС) через коммутатор верхнего уровня 6 подключается к автоматизированным рабочим местам (АРМ). АРМ предназначено для обеспечения оперативного технологического персонала достаточной информацией о состоянии кристаллизационных установок и предоставления возможности управления кристаллизационными установками.

На ЦС выполняется сбор данных и аварий кристаллизационных установок. Данный процесс работает всегда, когда работает ЦС. Автоматизированные рабочие места позволяют дистанционно следить за функционированием каждой кристаллизационной установки и управлять её параметрами.

Таким образом, автоматизированный кластер представляет собой иерархическую систему, нижний уровень которой состоит из 220 кристаллизационных установок. Каждые десять таких установок объединены в так называемые малые кластеры (22 шт.), представляющие собой средний уровень иерархии. Далее малые кластеры объединяются в большой автоматизированный кластер.

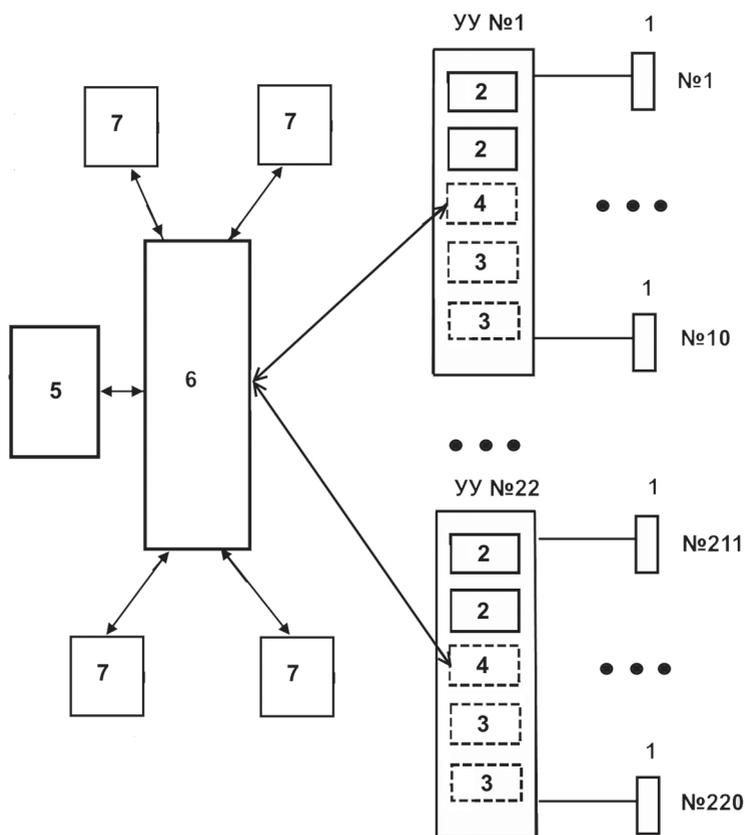


Рис. 2. Блок-схема кластера из 220 кристаллизационных установок с системами управления

БЛОК ИНДИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим более подробно систему управления 10 кристаллизационными установками блоком индикации и управления (рис. 3).

Система состоит из следующих частей (см. рис. 3):

- А1 — блок индикации и управления (УУ);
- А2, А3 — нагреватель (ТЭН);
- А4 — драйвер шагового двигателя DM805-AI;
- А5, А6 — датчик Холла Honeywell;
- А7 — датчик уровня;
- А8, А9 — термопреобразователь сопротивления;
- М1 — мотор для перемешивания воды в термостате;
- М2 — шаговый двигатель для вращения мешалки в кристаллизаторе.

Блок индикации и управления представляет собой модульную систему, обеспечивающую в комплексе сбор информации и управление оборудованием.

Он предназначен для контроля и автоматического управления процессом роста кристаллов из водных растворов одновременно в десяти кристаллизационных установках.

Блок выполняет следующие основные функции:

- измерение температуры воды в термостате с использованием термопреобразователя сопротивления;
- отображение результатов измерений, вычислений и прочей информации на табло оператора;
- ввод команд оператора;
- оповещение и индикацию при возникновении аварийной ситуации;
- пропорциональное интегральное дифференциальное (ПИД) регулирование температуры раствора по фиксированной уставке или заданной технологической программе;
- управление ТЭН термостата;
- управление вращением мешалки кристаллизатора с маточным раствором;
- вращение мешалки термостата;
- регистрирование значений температуры, состояния системы, действий оператора во внутреннюю энергонезависимую память;
- связь с АРМ оператором по интерфейсу Ethernet;

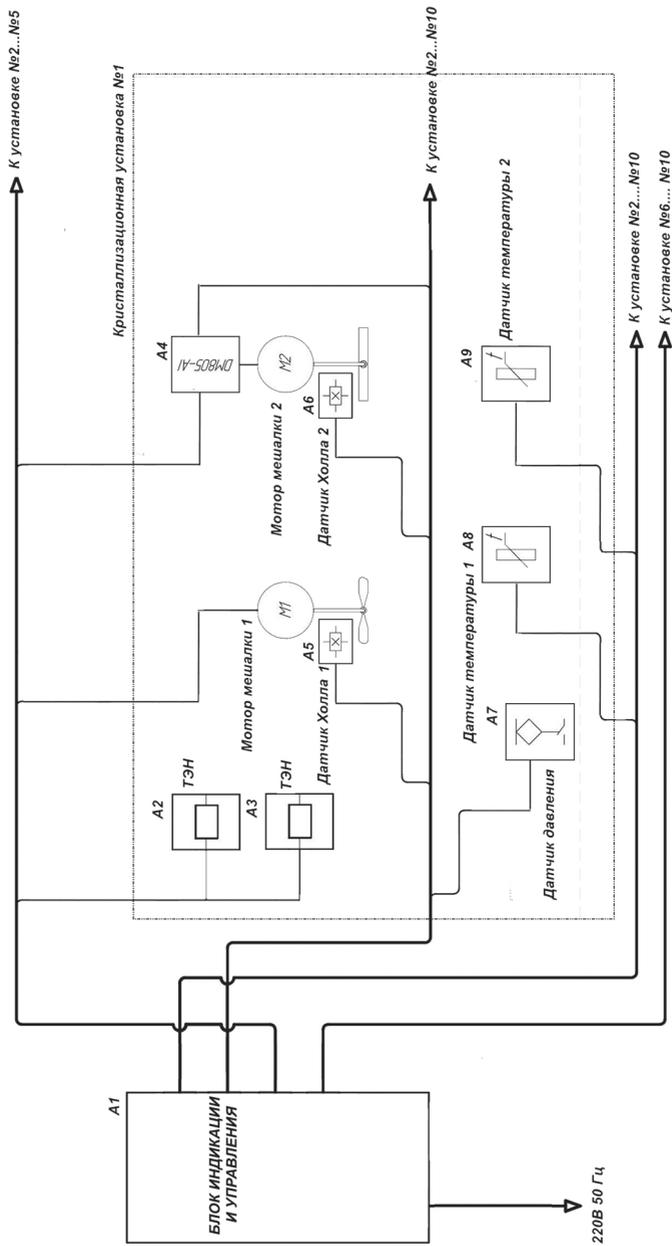


Рис. 3. Блок-схема системы индикации и управления кристаллизационными установками

- поддержание функционирования системы при аварийном отключении питания . регистрирование значений температуры, состояния системы, действий оператора во внутреннюю энергонезависимую память;
- связь с АРМ оператором по интерфейсу Ethernet;
- поддержание функционирования системы при аварийном отключении питания.

Условия эксплуатации блока индикации и управления приведены ниже.

1. Диапазон температура окружающей среды от 0 до +50 °С
2. Относительная влажность воздуха при температуре 20 °С до 80 %, без конденсации
3. Диапазон атмосферного давления от 84 до 106,7 кПа

Технические характеристики блока индикации и управления приведены ниже.

1. Напряжение питания / частота ~220В±10 % В / 50±10 % Гц
2. Потребляемая мощность, не более 360 Вт
3. Габаритные размеры (в×ш×г), не более 1200×600×300 мм
4. Масса, не более 70 кг
5. Средняя наработка на отказ, не менее 50 000 ч
6. Средний срок службы 10 лет
7. Степень защиты IP54
8. Количество подключаемых кристаллизационных установок 10 шт.
9. Максимальная коммутируемая мощность ТЭН (на одну кристаллизационную установку) 500 Вт
10. Диапазон измеряемой температуры 0...+100 °С

Блок индикации и управления А1 показан на рис. 4 и 5. Основу блока составляют контроллеры Advantech. Состав блока индикации и управления представлен ниже.

1. Контроллер Advantech ADAM-5560KW 2 шт.
2. Блок питания Traco Power TSP360 2 шт.
3. Источник бесперебойного питания QUNIT-UPS 1 шт.

4. Блок дифференциальных автоматов питания нагревателей Schneider Electric 10 шт.
5. Блок автоматических выключателей питания Schneider Electric . . . 3 шт.
6. Розетка 1 шт.
7. Автоматический выключатель постоянного тока Schneider Electric 1 шт.
8. Блок трансформаторов. 10 шт.
9. Блок реле управления нагревателями. 10 шт.
10. Блок промежуточных реле 20 шт.
11. Блок предохранителей питания шаговых двигателей 10 шт.
12. Разъёмы для подключения питания, внешних устройств и связи 7 шт.
13. Лампы индикации 2 шт.
14. Табло оператора 2 шт.
15. Модули ввода аналоговых сигналов, 4-20 мА 2 шт.
16. Ethernet коммутатор EKI-3528 1 шт.

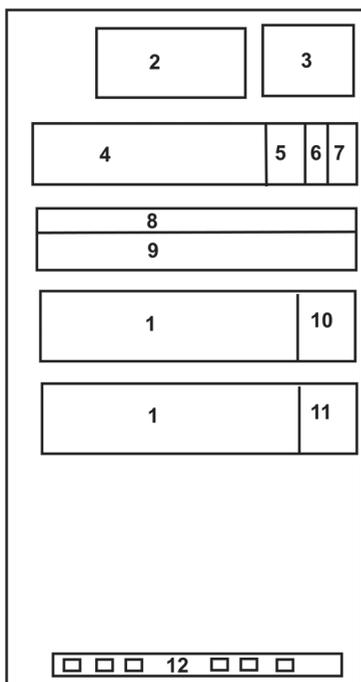


Рис. 4. Блок индикации и управления

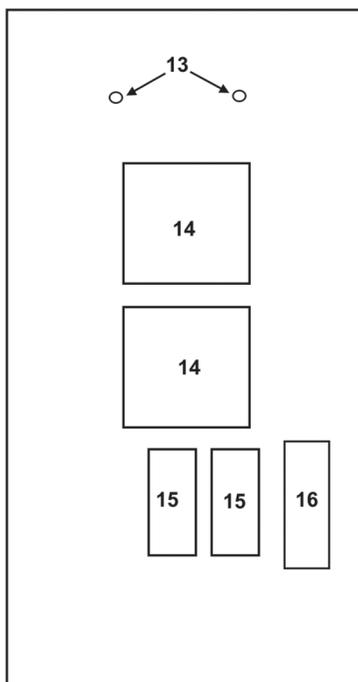


Рис. 5. Дверь блока индикации и управления

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ КЛАСТЕРОМ ПО «АРМ-ОПЕРАТОРА»

Для управления автоматизированным кластером кристаллизационных установок было создано программное обеспечение (ПО) «АРМ-оператора» (далее ПО АРМ).

ПО АРМ обеспечивает:

- представление на экране монитора технологических параметров;
- допусковый контроль выхода значений за предупредительные и аварийные диапазоны;
- визуальную (на экране) сигнализацию о наступлении нештатной или аварийной ситуации в работе любой из установок;
- вывод на экран и просмотр текущих параметров кристаллизационных установок в виде графиков;
- автоматическое накопление и хранение информации о функционировании систем, ведение базы данных, временных трендов технологических параметров. Вывод на экран и просмотр архивных графиков;
- ведение журнала нештатных и аварийных ситуаций, действий оператора;
- анализ состояния программно-технических средств и коммуникационных каналов;
- контроль прав доступа к сервисным функциям системы.

Рабочие места операторов работают по технологии «тонкого клиента». Рабочие сессии клиентов работают на сервере и отображаются на мониторах клиентов.

Программа «АРМ-оператора» имеет следующие пункты меню:

- Программа (программа, загружаемая в контроллер кристаллизационной установки);
- Редактирование и загрузка;
- Редактирование текущей программы;
- Просмотр текущей программы;
- Временной цикл программы;
- Проверка элементов управления кристаллизационных установок;
- Нагреватель включить;
- Нагреватель выключить;
- Вращение влево;
- Вращение вправо;

- Останов вращения;
- Настройки;
- Настройки коэффициентов;
- Графики;
- Аварии;
- Действия оператора;
- Просмотр журнала;
- Добавить комментарии.

Первый пункт меню относится к созданию, редактированию и загрузке программы в контроллер кристаллизационной установки. Также есть возможность просматривать и редактировать текущую загруженную программу.

Проверка элементов управления элементами кристаллизационных установок предназначена для проверки работы основных исполнительных механизмов — проверка работы ТЭН и шагового двигателя (ШД). Данная возможность доступна только в режиме «СТОП» и недоступна в других режимах.

Настройка коэффициентов предназначена для задания всех параметров работы кристаллизационной установки.

При выборе пункта меню «Аварии» и «Действия оператора» отображается окно просмотра архива аварийных ситуаций и действий оператора соответственно.

Выбор пункта меню «Графики» позволяет вызвать окно просмотра архивов изменения параметров (двух значений температуры и уставки)

Режимы работы программы: система имеет пять режимов работы (рис. 6):

- Автоматический — в данном режиме выполняется регулирование температуры в соответствии с заложенной технологической программой (ТП);
- Пауза — в данном режиме приостанавливается выполнение заложенной ТП;
- Ручной — в данном режиме поддерживается уставка, задаваемая оператором;
- Стоп — в данном режиме система находится в режиме бездействия или выполняет команды оператора;
- Мешалка — в данном режиме система осуществляет управление вращением ШД кристаллизационной установки;



Рис. 6 Граф переходов

- Прогрев — в данном режиме поддерживается уставка, задаваемая оператором, но управление вращением ШД не осуществляется;
- Сервис — данный режим аналогичен режиму СТОП, никакого регулирования не производится и выполняется отключение контроля аварий. Режим используется для вывода из работы какого-либо кристаллизационной установки. Чтобы не генерировались ошибки, необходимо выбрать данный режим.

В качестве иллюстрации работы «АРМ-оператора» приведём содержимое окна «Кристаллизатор» для различных режимов работы рис. 7–9.

Содержимое окна «Кристаллизатор» (см. рис. 7–9):

1 — отображается температура с датчика № 1. В нижней части окна выводятся текущие состояния датчиков. Если нет никаких аварий с датчиком, то надписи и индикатор аварии серые. Если же появляется какая-либо авария, то обозначение аварии и индикатор подсвечиваются серым и красным цветом соответственно;

2 — отображается температура с датчика № 2;

3 — выход ПИД регулятора в процентах. Данное значение характеризует мощность работы нагревателя.

4 — аварии кристаллизационной установки. Аналогичной авариям по датчику температуры, у кристаллизационной установки есть набор аварий. Если возникает какая-либо авария, то подсвечивается соответствующая строка;

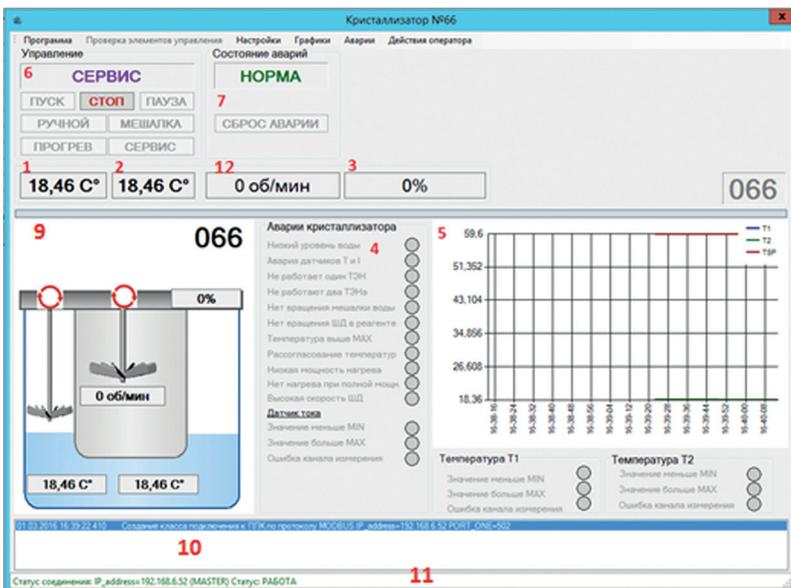


Рис. 7 Основная форма «Кристаллизатор №66» в режиме «Сервис»

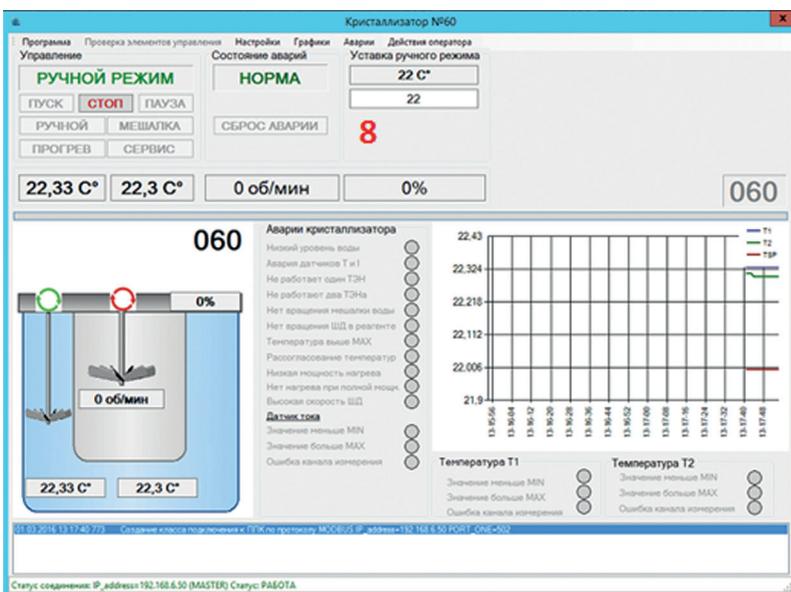


Рис. 8 Основная форма «Кристаллизатор №66» в «Ручном режиме»

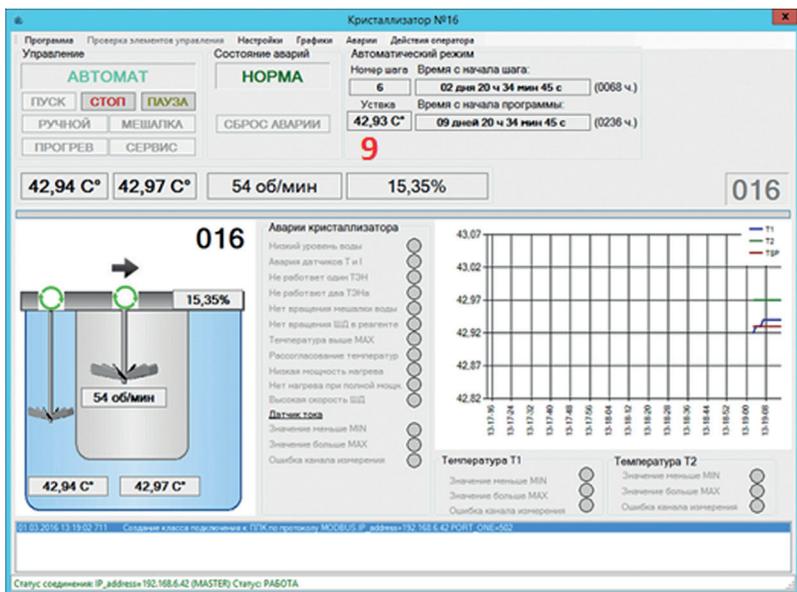


Рис. 9 Основная форма «Кристаллизатор №ххх» в «Автоматическом режиме»

5 — графики текущих значений температур и уставки. Данный график показывает изменение значений за последние 2 мин.

6 — управление режимами. В данной части окна отображается текущий режим работы кристаллизационной установки и предоставляется возможность выбора режима. Программа позволяет выполнять только возможные переходы по режимам. Если переход невозможен, то кнопки выбора режима блокируются.

7 — отображается статус аварии («Норма» или «Авария»). Кнопка «Сброс аварии» выполняет принудительный сброс аварий. Если сброс аварии возможен, например, кристаллизационная установка находится в режиме «Стоп», то будет выполнен сброс аварий и кристаллизационная установка перейдёт в состояние «Норма».

8 — в ручном режиме в данном поле отображается уставка ручного режима. Пользователь сам задаёт уставку поддержания температуры. Для задания уставки нужно вписать необходимое значение в поле задания уставки. Если текущая уставка и задаваемая будут отличаться, то появится кнопка «Задать уставку». После записи уставки уравняются, и кнопка записи исчезнет. В автоматическом режиме в данных полях отображается номер текущего шага, время, прошедшее с начала шага и всей программы.

9 — в данном поле графически представлено текущее состояние кристаллизационной установки. Отображается наличие вращения термостата воды и шагового двигателя (ШД), отображается направление задания вращения ШД, текущие обороты ШД, текущие значения температуры и наличие требуемого уровня воды.

10 — в данном поле отображается служебная информация при работе с кристаллизационной установкой и действия оператора, выполняемые при работе с окном.

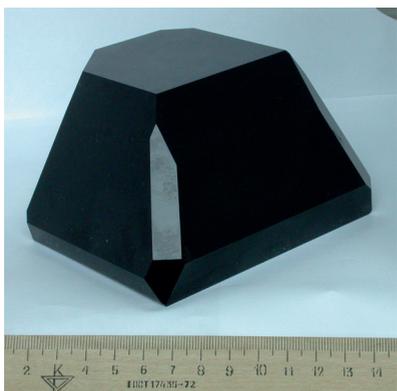
11 — в нижней строке состояния отображается состояние подключения к контроллеру, указывается к какому контроллеру подключена кристаллизационная установка. Указан IP-адрес контроллера и его назначение — MASTER (Основной) или SLAVE (Ведомый).

12 — выводятся обороты ШД при вращении.

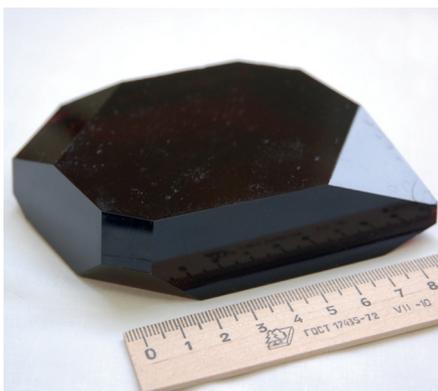
Для обеспечения надёжности функционирования системы в управляющих устройствах установлено два контроллера управления. В случае выхода из строя первого, основного, контроллера, второй берет управления на себя. Для того чтобы выполнить «безударный» переход с основного контроллера на резервный, выполняется постоянное копирование процесса данных между контроллерами.

Если при подключении к контроллеру ПО АРМ диагностируется, что контроллер недоступен или не находится в работе, то выполняется переключение на второй контроллер. Работа через резервный контроллер — это аварийная ситуация и на АРМ будет сформирован аварийный сигнал «Работа через резервный контроллер». На панели будет отображаться, что основной контроллер находится в режиме «Offline».

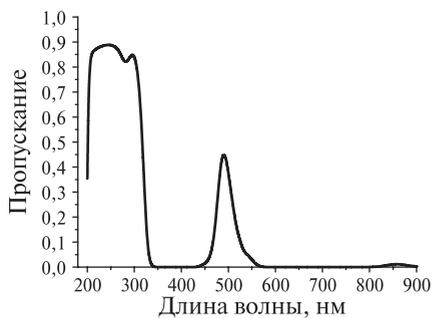
Работа системы управления кристаллизационными установками была протестирована в ходе выращивания экспериментальной партии кристаллов (рис. 10). На рис. 10а дана фотография кристалла гексагидрата сульфата никеля альфа-NiSO₄·6H₂O (NSH), а на рис. 10б — гексагидрата сульфата калия-кобальта K₂Ni(SO₄)₂·6H₂O (KCSH). Кроме того, на рис. 10в представлен график спектрального пропускания кристалла NSH, а на рис. 10г — соответственно, кристалла KCSH. Из анализа рис. 10в и г видно, что эти кристаллы помимо основных областей пропускания в УФ-области имеют ещё и второстепенные — с максимумами на длинах волн 492 и 710 нм. Наличие таких второстепенных областей пропускания может приводить к прохождению в оптический тракт сенсоров паразитных излучений, т. е. дополнительных помех.



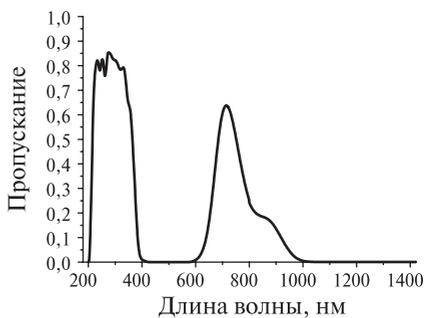
a



б



в



г

Рис. 10. Выращенные кристаллы: *a* — гексагидрат сульфата никеля (NSH); *б* — гексагидрат сульфата калия-кобальта (KNSH). Графики спектрального пропускания: *в* — NSH; *г* — KCSH

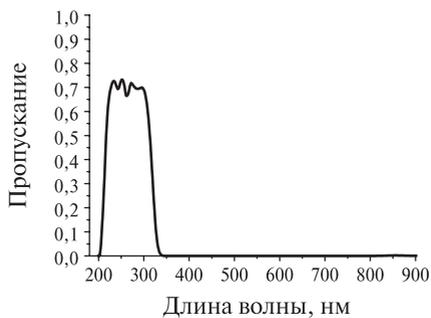


Рис. 11. График спектрального пропускания последовательно включенных кристаллов NSH и KCSH

Для их устранения и формирования заданной области спектрального пропускания можно воспользоваться последовательной комбинацией обоих кристаллов, в результате чего сквозной график спектрального пропускания (рис. 11) будет равен произведению исходных спектров пропускания (см. рис. 10*в* и *г*). На рис. 11 видно, что второстепенные пики пропускания практически отсутствуют. Как показывают расчёты, их величина составляет десятитысячные доли величины основного пика.

Таким образом видно, что с помощью выращивания кристаллов с различным спектральным пропусканием на основе их комбинаций возможно создание фильтров с заданными спектральными характеристиками

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе автоматизированный кластер представляет собой иерархическую систему, нижний уровень которой состоит из 220 кристаллизационных установок. Каждые десять таких установок объединены в, так называемые, малые кластеры (22 шт.), образующие средний уровень иерархии. Далее малые кластеры объединяются в большой автоматизированный кластер (верхний уровень). Управление автоматизированным кластером кристаллизационных установок осуществляется с помощью программного комплекса «АРМ-оператора». Конструкция системы предполагает возможность её расширения до 500 кристаллизационных установок нижнего уровня. Работа системы управления кристаллизаторами была протестирована в ходе выращивания экспериментальной партии кристаллов гексагидрата сульфата никеля и гексагидрата сульфата калия-кобальта. Комбинация кристаллов с различными спектральными характеристиками позволяет создавать фильтры с заданными свойствами.

Практическое использование автоматизированного кластера, показало правильность заложенных при его проектировании принципов и позволило выращивать кристаллы в необходимом количестве для серийно выпускаемых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

Степанов С. Н., Белов А. А., Волошин А. Э., Калинин А. П., Крамаренко В. А., Крысюк И. В., Маноменова В. Л., Родионов А. И., Руднева Е. Б. Универсальная

система управления кристаллизационной установкой для выращивания кристаллов из водных растворов // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 13–17.

Петров Т.Г., Трейбус Е.Б., Пунин Ю.О., Касаткин А.П. Выращивание кристаллов из растворов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1983. 200 с.

Belov A.A., Egorov V.V., Kalinin A.P., Korovin N.A., Rodionov A.I., Rodionov I.D., Stepanov S.N. Ultraviolet Monophoton Sensor “Corona” // Automation and Remote Control. 2014. V. 75. Iss. 8. P. 1479–1483.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Кристаллизационная установка	4
Автоматизированный кластер из 220 кристаллизационных установок	6
Блок индикации и управления	8
Программа управления автоматизированным кластером ПО «АРМ-оператора»	12
Заключение	19
Литература	19