

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 538.945

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СЕАНСА  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА  
УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

©2026 г. Д. Н. Никифоров<sup>а,\*</sup>, Ю. Г. Беспалов<sup>а</sup>, М. В. Петров<sup>а</sup>, Г. Л. Кузнецов<sup>а</sup>,  
Е. В. Сергеева<sup>а</sup>, Е. В. Горбачев<sup>а</sup>, Г. С. Седых<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
\*e-mail: dmitnik@jinr.ru

Поступила в редакцию 06.08.2025 г.

После доработки 10.10.2025 г.

Принята к публикации 17.11.2025 г.

Статья посвящена результатам первого технологического пуска бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA, расположенного в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований. Проект мегасайенс NICA представляет собой каскад ускорителей и кольцо коллайдера, который имеет две точки столкновения MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector) для исследования взаимодействия двух пучков. В каскаде ускорителей комплекса первый кольцевой сверхпроводящий ускоритель – бустерный синхротрон. Данный ускоритель состоит из 41 дипольного магнита, 48 квадрупольных линз и 32 корректирующих магнита (24 дипольных и 8 мультипольных). Общая холодная масса ускорителя составляет 61.44 тонны.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из первых крупных этапов реализации ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) в ЛФВЭ ОИЯИ [1] был ввод в эксплуатацию бустерного синхротрона, сверхпроводящего (СП) ускорителя. Запуску синхротрона предшествовала огромная работа по созданию и испытанию СП-магнитных элементов бустерного синхротрона, которая продолжалась 6 лет в Научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий отделения №1 ЛФВЭ. В этом отделе была создана высокотехнологическая линия по сборке, испытаниям и сертификации магнитных элементов для проекта NICA [2].

## 2. ТИПЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

Основными элементами магнитно-криостатной системы бустерного синхротрона являются магниты типа “Дубна”. На рис. 1 показаны два основных магнитных элемента бустерного синхротрона: дипольный магнит (ДМ) и дублет квадрупольных линз с корректирующим магнитом (ДЛ). СП-магниты имеют холодное ярмо и седловидную обмотку, максимальное рабочее поле магнитов 1.8 Тл. В табл. 1 приведены основные характеристики элементов.

**Рис. 1.** Основные магнитные элементы бустерного синхротрона

**Таблица 1.** Основные характеристики дипольных магнитов и дублетов квадрупольных линз

Характеристика	ДМ	ДЛ
Диаметр охлаждающего канала кабеля, мм	3	
Количество СП-проводов (диаметр 0.78 мм)	18	
Сверхпроводник	Nb-Ti	
Длина СП-кабеля, м	72	41
Рабочий ток (1.8 Тл, 4.65 К), кА	9.68	
Эффективная магнитная длина, м	2.2	0.47
Радиус кривизны ярма, м	14.01	0
Масса, кг	1030.0	422.5
Индуктивность, мГн	≈ 570	≈ 90
Поле, Тл	1.8	–
Градиент поля, Тл/м	–	21.24

Сверхпроводящий кабель (см. рис. 2) состоит из мельхиоровой трубки, на которую навиваются СП-провод, имеющий диаметр 0.78 мм. СП-провод содержит 6500 NbTi-волокон диаметром не более 6 мкм. Конструкция кабеля была разработана для СП-синхротрона Нуклотрона и взята за основу для СП-кабеля бустерного синхротрона и коллайдера NICA. СП-кабель данной конструкции зарекомендовал себя высокой стабильностью в переменных полях вплоть до 2 Тл и 4 Тл/с.

**Рис. 2.** Конструкция СП-кабеля для бустерного синхротрона:

Каждый СП-магнит проходит криогенные испытания на тестовом стенде. В криогенные испытания входят следующие основные этапы: охлаждение магнита со скоростью не более 5 К/ч до температуры жидкого гелия (4.5 К), тренировка СП-обмотки, измерения магнитного поля и

гармоник, измерение статического теплопритока и динамических тепловыделений и проверка герметичности гелиевых коммуникаций при рабочей температуре и 10 атм.

**Рис. 3.** Криогенные модули магнитов бустерного синхротрона...

Готовые модули магнитов бустерного синхротрона представлены на рис. 3. СП-магнит подвешивается в вакуумном кожухе с помощью 8 спиц, которые позволяют проводить юстировку магнита и установку в оптимальное положение по траектории пучка. Для минимизации теплопритока, передаваемого магниту из окружающей среды, в модуле установлен тепловой экран, который охлаждается жидким азотом и покрыт слоисто-вакуумной теплоизоляцией (СВТИ) как с внешней, так и с внутренней стороны тридцатью и пятью слоями соответственно. Каждая спица имеет тепловой мост с азотным экраном для снижения теплопритока к гелиевому контуру охлаждения.

Всего в структуре бустерного синхротрона используется четыре типа СП-магнитов: дипольный магнит (ДМ) – 41 ед., дублет квадрупольных линз (ДЛ) – 1 ед., ДЛ с дипольным корректирующим магнитом (ДК) – 16 ед. и ДЛ с ДК и мультипольным корректирующим магнитом (МПК) – 8 ед. Проводились подробные криогенные испытания для получения квазистационарного состояния статического теплопритока и измерения динамического тепловыделения для всех типов СП-магнитов бустерного синхротрона. Результаты представлены в табл. 2 [3].

**Таблица 2.** Теплоприток и тепловыделение для всех типов СП-магнитов бустерного синхротрона

Параметры	Тип СП-магнита			
	ДМ	ДЛ	ДЛ+ДК	ДЛ+ДК+МПК
Статический теплоприток, Вт	$4.8 \pm 0.10$	$6.8 \pm 0.14$	$9.3 \pm 0.19$	$14.6 \pm 0.29$
Динамическое тепловыделение, Вт	$9.0 \pm 0.18$	$2.0 \pm 0.04$	$2.6 \pm 0.05$	$4.7 \pm 0.09$
Суммарный теплоприток, Вт	$13.8 \pm 0.28$	$8.8 \pm 0.18$	$11.9 \pm 0.24$	$19.3 \pm 0.38$

### 3. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕАНСА БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА

Система фокусирующих и дефокусирующих магнитов (FODO) была взята как основа для оптической орбиты бустерного синхротрона. На рис. 4 представлена ячейка магнитно-криостатной структуры бустерного синхротрона. В центре находятся два дипольных магнита, по краям находится по дублету квадрупольных линз. В каждом дублете имеются фокусирующая и дефокусирующая линзы, а также корректирующие магниты, согласно структурной схеме.

**Рис. 4.**Схема электрических и гелиевых коммуникаций одной ячейки магнитно-криостатной системы бустерного синхротрона

Концепт бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA был разработан на основе конструкции синхротрона нуклотрона. В нем впервые был применен принцип параллельного питания более 100 СП-магнитов, а также использования трубчатого СП-кабеля для осуществления быстрых циклов ускорения [4]. Тридцатилетний успешный опыт эксплуатации нуклотрона показал высокую эффективность этих принципов.

Рассмотрим питание жидким гелием на примере дипольного магнита. Согласно схеме, представленной на рис. 4, поток охлаждающего гелия из питающего коллектора 1 поступает в СП-обмотку 6 и кабели токовых связей магнита. При переходе в охлаждающие трубки ярма 4 гелий дросселируется из-за разности проходных диаметров охлаждающих каналов. Данный дроссельный эффект в модулях дублетов квадрупольных линз используется для устранения паровой фазы в питающем коллекторе с помощью переохладителей 2. После прохождения гелием охлаждающих трубок ярма 5 он попадает в обратный коллектор 9 и возвращается на центральную криогенную станцию. В модулях дублетов квадрупольных линз имеется дополнительно два корректирующих магнита МПК и ДК, их охлаждение включается между СП-обмоткой 8 и трубкой ярма 7 магнита. Для питания электрическим током каждый модуль имеет четыре токовые связи, три из которых (А, В, Г) питают непосредственный тип магнита. Токовая связь Б является обратной линией питания дипольных обмоток. Разделение токовых связей осуществляется с помощью керамических изоляторов 3.

Бустерный синхротрон имеет два полукольца, каждое из которых состоит из двух суперпериодов или квадрантов и одного измерительного периода (см. рис. 5). Управление процессом охлаждения синхротрона осуществляется с помощью группы вентилях, расположенных в измерительном периоде. Криогенные вентили способны осуществлять регулировку потоков гелия в процессе охлаждения. Холодная масса бустерного синхротрона содержит 61.44 тонны трансформаторного железа. Общая расчетная тепловая нагрузка бустерного синхротрона при работе в цикле амплитудой 1.8 Тл и скоростью нарастания поля 1.2 Тл/с составляет 940 Вт. Для охлаждения столь значительной массы используется криогенная установка с холодопроизводительностью 2 кВт на уровне 4.5 К.

**Рис. 5.** Схема измерительного периода бустерного синхротрона.

Из-за конструкции бустерного синхротрона охлаждение разделяется на 4 основных этапа.

1. Необходимо выполнить подготовку всех гелиевых коммуникаций синхротрона, достичь определенного давления в изоляционном объеме магнитно-криостатной системы, провести проверку систем телеметрии и защиты.

2. Необходимо произвести открытие/закрытие вентилей для построения схемы охлаждения. На этом этапе выполняется охлаждение магнитов до температур ярма 120–150 К. В процессе охлаждения требуется поддерживать разницу температур между ВТСП- и НТСП-частями тоководов не более 100 К. Регулировка ВТСП-части осуществляется подачей потока жидкого азота.

3. После достижения температур, описанных в пункте 2, начинается охлаждение тепловых экранов с помощью подачи жидкого азота до температур 80–100 К.

4. Охлаждение магнитной структуры синхротрона до рабочей температуры 4.5 К и настройка работы переохладителей.

Описанный принцип охлаждения способствует минимальным нагрузкам из-за термоусадки спиц в системе подвеса, что позволяет сохранять положение магнитов во всем диапазоне температур от 297 К до 4.5 К.

В декабре 2020 года был выполнен старт первого охлаждения бустерного синхротрона. На рис. 6 представлены графики охлаждения дипольных магнитов и квадрупольных линз бустерного синхротрона.

**Рис. 6.** Графики охлаждения бустерного синхротрона: **а** – дипольные магниты, **б** – квадрупольные магниты

Охлаждение полуколец синхротрона осуществлялось с помощью гелиевого сателлитного рефрижератора холодопроизводительностью 2 кВт на уровне  $T = 4.5$  К. Второй этап охлаждения занял около 139.5 часов, третий – 22.5 часа, четвертый – 27 часов. В результате охлаждение магнитно-криостатной системы синхротрона бустера заняло 189 часов или почти 8 суток.

Главной целью первого сеанса бустерного синхротрона была устойчивая работа в ускорительном цикле с амплитудой поля 1.8 Тл и скоростью роста поля 1.2 Тл/с. Поставленная задача была выполнена, в процессе повышения амплитуды поля произошел 21 срыв сверхпроводимости. График тренировки магнитов бустерного синхротрона представлен на рис. 7. На графике имеются три круга (1, 2, 3), которые соответствуют количеству срывов на одном элементе, так, например, дипольный магнит М11 и дублет квадрупольных линз Л19 имели по три срыва сверхпроводимости при увеличении поля. Также график имеет разделения магнитов по 4 квадрантам для оценки влияния количества переходов от места расположения магнитов по питающему коллектору (первый и второй квадранты находятся ближе к подаче жидкого гелия из

рефрижератора, чем третий и четвертый). Существенного перевеса в количестве переходов не наблюдается, что свидетельствует о сбалансированной системе охлаждения и надежной работы промежуточных переохладителей, расположенных на питающем коллекторе жидкого гелия.

**Рис. 7.**График тренировки магнитов бустерного синхротрона

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

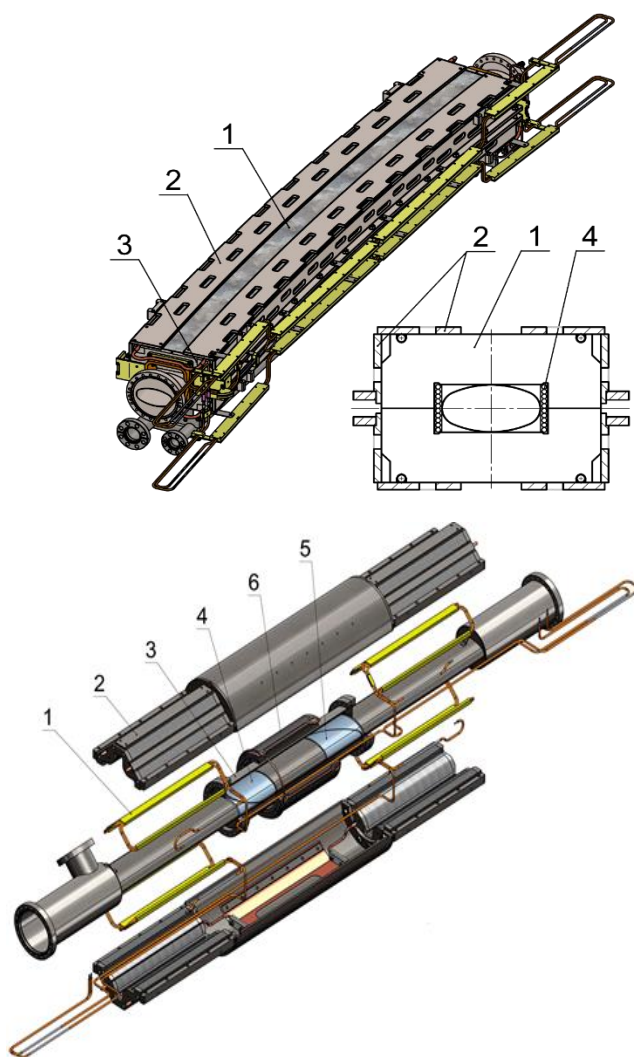
В декабре 2020 был выполнен первый технический пуск бустерного синхротрона. Все задачи технического пуска были успешно достигнуты. Ускоритель показал стабильную работу при максимальном поле 1.8 Тл и скорости нарастания поля 1.2 Тл/с, что соответствует рабочим параметрам синхротрона. Рабочий ток 9.68 кА был достигнут всего за 21 срыв сверхпроводимости. Все подсистемы синхротрона отработали штатно и показали готовность к дальнейшей работе с пучком. Данный успех свидетельствует о высоком качестве изготовления и сборки СП-магнитов в научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий лаборатории ЛФВЭ ОИЯИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверичев А.С. и др..* Технический проект ускорительного комплекса NICA. / Под ред. И.Н. Мешкова, Г.В. Трубникова. Дубна: ОИЯИ, 2015.
2. *Nikiforov D.N., Agarov N.N., Khodzhibagiyani H.G. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 507. P. 032034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/507/3/032034> .
3. *Никифоров Д.Н.* Разработка и оптимизация систем криообеспечения стенда для испытаний сверхпроводящих магнитов проекта NICA. Дис.... канд. техн. наук. Дубна: ОИЯИ, 2020. 123 с.
4. *Khodzhibagiyani H.G., Smirnov A.A.* // Proc. of the Twelfth Int. Cryogen. Eng. Conf. (ICIC12), Southampton, 1988. P. 841. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01259-1.50162-5>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

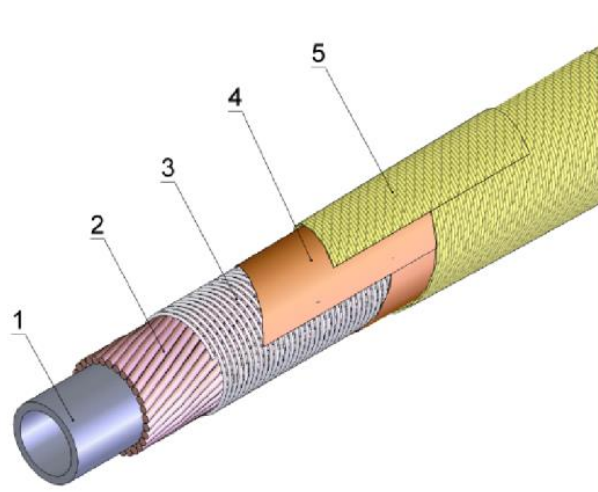
- Рис. 1.** Основные магнитные элементы бустерного синхротрона. **а** – дипольный магнит: 1 – набранное ярмо, 2 – боковые пластины, 3 – торцевые пластины, 4 – СП-обмотка; **б** – дублет квадрупольных линз: 1 – часть СП-обмотки, 2 – половина ярма, 3 – высоковакуумная камера (ВВК), 4, 5 – сильфонные компенсаторы ВВК, 6 – корректирующий магнит.
- Рис. 2.** Конструкция СП-кабеля для бустерного синхротрона: 1 – мельхиоровая трубка, 2 – NbTi-сверхпроводник, 3 – NiCr-проволока, 4 – каптоновая лента, 5 – стекловолоконная лента, пропитанная эпоксидной смолой.
- Рис. 3.** Криогенные модули магнитов бустерного синхротрона: **а** – модуль дипольного магнита; **б** – модуль квадрупольных линз.
- Рис. 4.** Схема электрических и гелиевых коммуникаций одной ячейки магнитно-криостатной системы бустерного синхротрона: 1 – коллектор прямого потока жидкого гелия, 2 – переохладитель, 3 – керамический изолятор, 4 – охлаждающая трубка железного ярма, 5 – ярмо дипольного магнита, 6 – СП-обмотка дипольного магнита, 7 – ярмо квадрупольной линзы, 8 – СП-обмотка квадрупольной линзы, ДМ – дипольный магнит, ЛФ – квадрупольная фокусирующая линза, ЛД – квадрупольная дефокусирующая линза, МПК – мультипольный корректирующий магнит, ДК – дипольный корректирующий магнит, А, В, Г – токовые связи, питающие дипольные и квадрупольные линзы, Б – обратная токовая связь дипольных магнитов.
- Рис. 5.** Схема измерительного периода бустерного синхротрона: TN2, THe, Tm – датчики температур, Д – датчики давления, ДД – датчики дифференциального давления, Вн – криогенные вентили, ТВ – ВТСП-токовводы.
- Рис. 6.** Графики охлаждения бустерного синхротрона: **а** – дипольные магниты, **б** – квадрупольные магниты.
- Рис. 7.** График тренировки магнитов бустерного синхротрона.



(a)

(б)

Рис. 1.



**Рис. 2.**



(a)



(б)

**Рис. 3.**

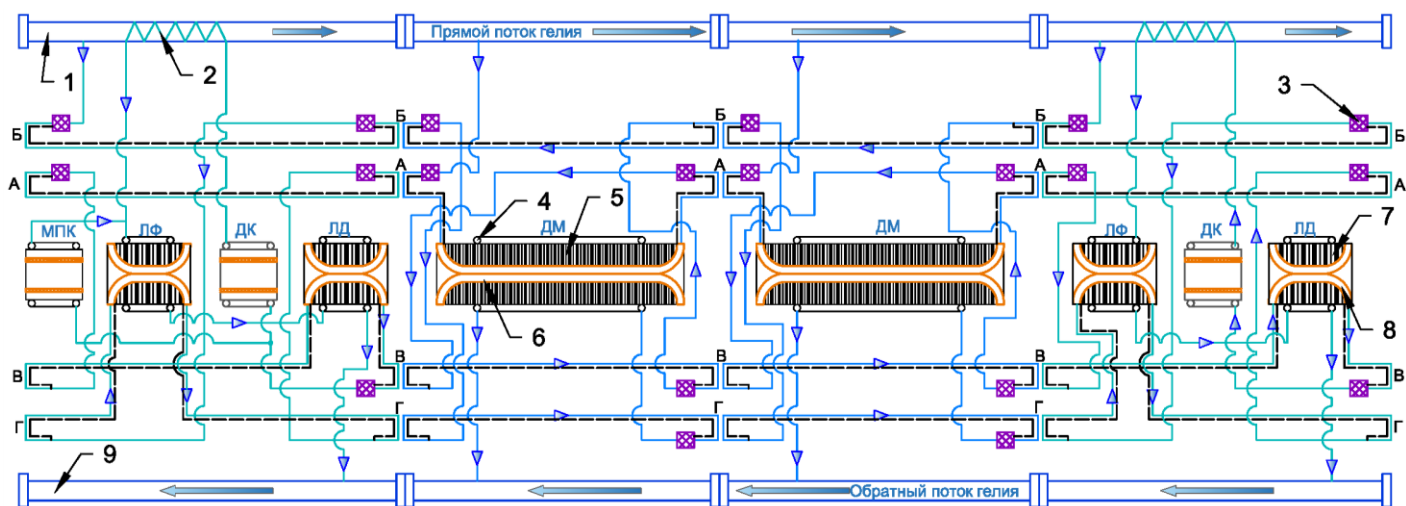


Рис. 4.

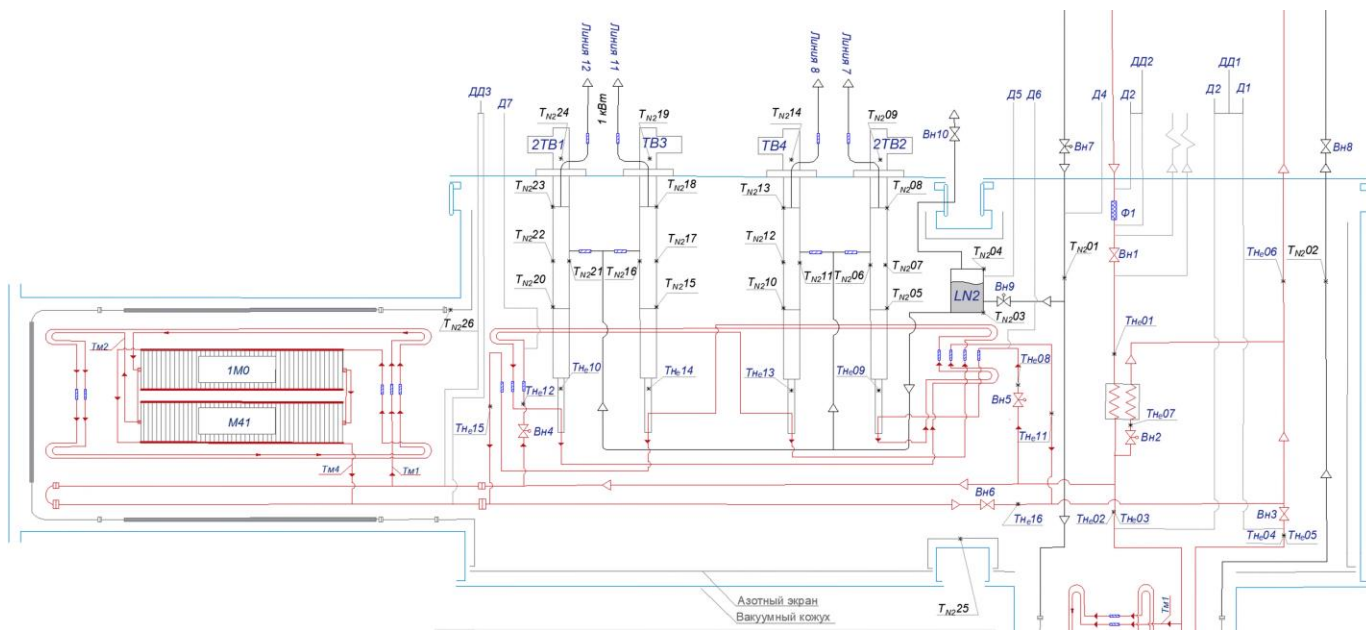
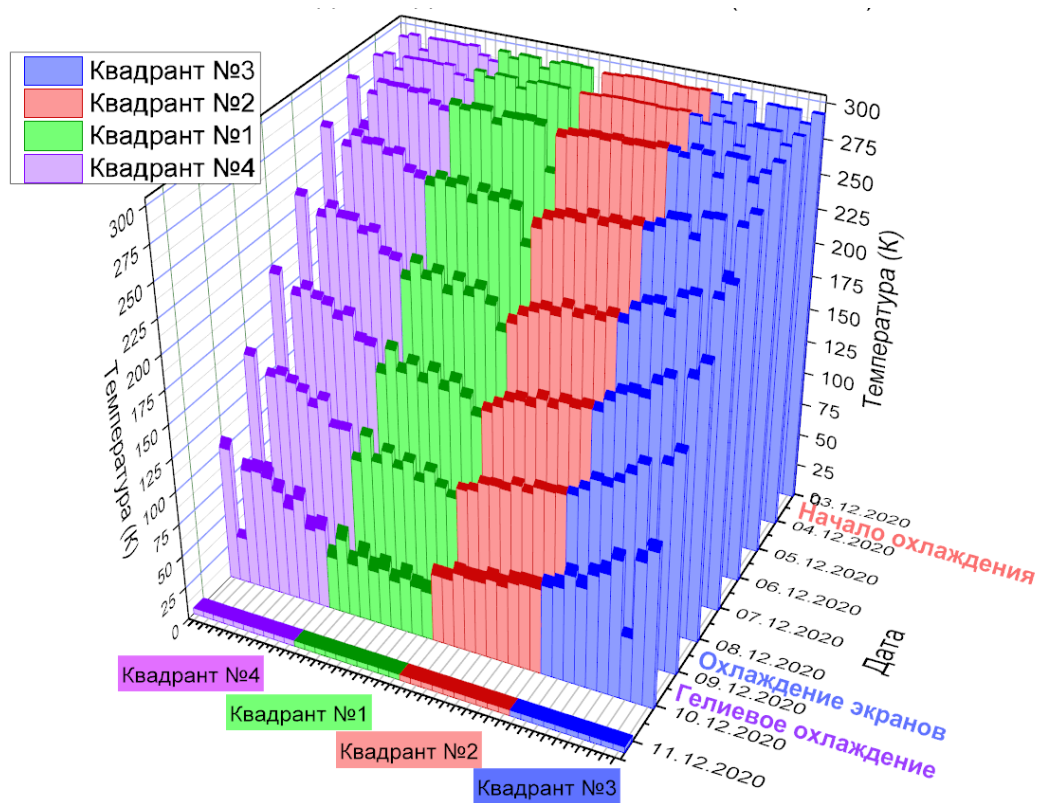
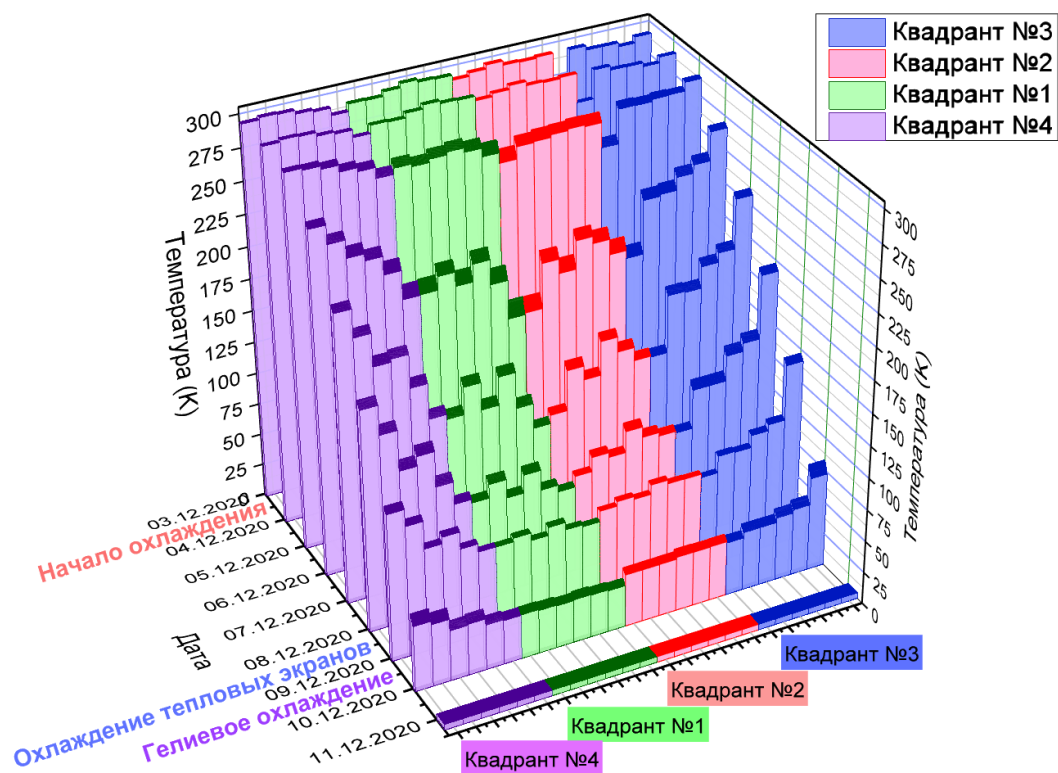


Рис. 5.



(a)



(б)

Рис. 6.

