

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦИКЛА ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Тепломассообмен» для студентов направления
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направления
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин
и комплексов», профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
и специальности 21.05.04.00 «Горное дело», специализация 21.05.04.10
«Электрификация и автоматизация горного производства»,
всех форм обучения

Составители Е. Ю. Темникова
А. Р. Богомолов
С. А. Шевырев

Рассмотрены и утверждены
на заседании кафедры
Протокол № 5 от 09.12.2015
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 13.03.01
Протокол № 5 от 09.12.2015
Электронная копия
находится в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2016

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение и анализ процессов холодильных машин, в которых за счет затраты работы рабочим телом осуществляется перенос теплоты с низкого температурного уровня на более высокий. В ходе выполнения работы студенты знакомятся с основными элементами холодильной парокомпрессионной установки, производят измерение и расчет различных величин: расходов, количества подведенной и отведенной теплоты, совершенной работы, холодопроизводительности установки.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Холодильными машинами называют устройства, предназначенные для охлаждения тел ниже температуры окружающей среды. Такие машины работают по обратному термодинамическому циклу (рис. 1), в котором подвод теплоты к термодинамической системе происходит при более низкой температуре, чем отвод тепла. В соответствии со вторым началом термодинамики такой цикл возможен лишь за счет затраты дополнительной энергии. В цикле холодильной парокомпрессионной установки дополнительная энергия подводится к хладагенту в виде работы сжатия рабочего тела в компрессоре. В результате более нагретое тело получит от термодинамической системы теплоты больше, чем отдает менее нагретое тело, на величину работы цикла:

$$Q_1 = Q_2 + L,$$

где Q_1 – теплота, отданная горячему источнику, кДж; Q_2 – теплота, полученная от холодного источника, кДж; L – работа сжатия рабочего тела в цикле, кДж.

Схема цикла парокомпрессионной холодильной установки, применяемая в бытовых и промышленных холодильниках, в химических технологиях и биотехнологиях для обеспечения холодом процессов сушки, кристаллизации, абсорбции, адсорбции, экзотермических реакций, кондиционирования воздуха, **представлена на рис. 1**. В качестве рабочего тела – хладагента может использоваться фреоны (хладоны), аммиак NH_3 . На рис. 2 изображен цикл холодильной установки в T – s -диаграмме.

Работает установка следующим образом. Хладагент по паропроводу ПП поступает с параметрами состояния точки I (в виде сухого насыщенного пара) на вход компрессора КМ. Где

сжимается до давления p_2 по линии $1-2$ (адиабате или изоэнтропе) в идеальном процессе или по линии $1-2\delta$ в реальном процессе (рис. 2). Из компрессора КМ перегретый пар хладагента (точка 2 или 2δ) поступает в конденсатор К, где отдает тепло q_1 охлаждающей воде ОВ. Перегретый пар, в конденсаторе К, охлаждается по изобаре $2\delta-2-3$ до состояния сухого насыщенного пара (точка 3), а затем конденсируется по изобаре-изотерме $3-4$ до состояния насыщенной жидкости (точка 4). Из конденсатора К жидкость подается в дроссель ДР, в котором происходит адиабатное дросселирование $4-5$ с понижением температуры и давления хлада-

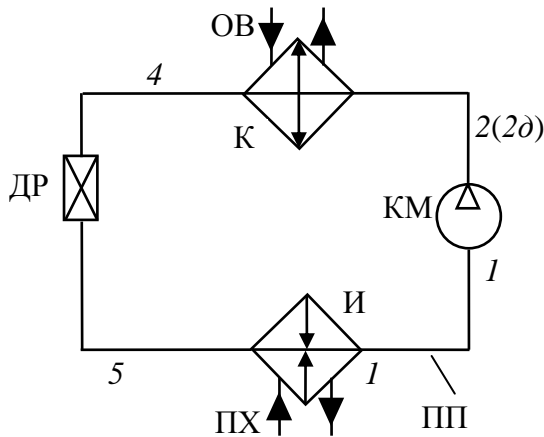


Рис. 1. Схема цикла парокомпрессионной холодильной установки:
 ПП – паропровод; КМ – компрессор;
 К – конденсатор; ОВ – охлаждающая вода;
 ДР – дроссель; И – испаритель;
 ПХ – потребитель холода

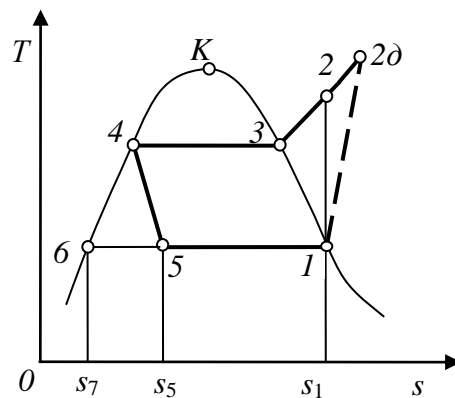


Рис. 2. Теоретический и действительный цикл паровой компрессионной холодильной машины

гента. С параметрами состояния точки 5 влажный насыщенный пар из дросселя ДР поступает в испаритель И, в котором происходит изобарно-изотермический процесс парообразования $5-1$ с отводом теплоты q_2 от рассола (в бытовых холодильниках от продуктов охлаждения). Рассол направляется потребителю холода ПХ. Затем хладагент из испарителя И вновь по паропроводу ПП направляется в компрессор КМ.

Термодинамический цикл этого холодильного двигателя производится между двумя изобарами – изобарой отвода тепла в конденсаторе ($2\delta-2-3-4$) и изобарой подвода тепла в испарителе ($5-1$) как показано на рис. 2.

По обратному термодинамическому циклу работают также тепловые насосы, с помощью которых теплота низкого потенциа-

ла, забираемая, как правило, из окружающей среды, отдается внешнему потребителю при более высокой температуре за счет затраченной работы. Характеристикой совершенства работы теплового насоса является отопительный коэффициент или коэффициент преобразования теплового насоса, равный отношению теплоты, отданной внешнему потребителю, к затраченной работе.

В парокомпрессионных холодильных установках применяют рабочее тело для осуществления холодильного цикла – холодильный агент (хладагент – ХА).

Ранее в холодильных установках широко применяли хладагент – аммиак NH_3 . В чем заключаются его преимущества. При температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ давление насыщенных паров аммиака составляет 857 кПа , тогда как атмосферному давлению (98 кПа) соответствует температура насыщения, равная $-34\text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, создание аммиачной парокомпрессионной холодильной установки на температуры $T_2 \geq -34\text{ }^\circ\text{C}$ не требует применения вакуума, что, естественно, значительно упрощает конструкцию установки. Следует отметить также, что аммиак имеет значительно большую теплоту парообразования и, следовательно, обеспечивает большую холодопроизводительность на 1 кг хладагента. Недостатками аммиака являются его токсичность, пожаро- и взрывоопасность и коррозионная активность по отношению к цветным металлам, вследствие чего в бытовых холодильных установках аммиак не применяется.

Большое распространение в качестве хладагентов получили так называемые фреоны – фторхлорпроизводные простейших предельных углеводородов (в основном метана). Отличительными качествами фреонов являются их химическая стойкость, нетоксичность, отсутствие взаимодействия с конструкционными материалами (при $T < 200\text{ }^\circ\text{C}$). Температура кипения при атмосферном давлении для фреонов различных типов изменяется в широком интервале температур. Так, фреон-14 (CF_4) при атмосферном давлении кипит при $T = -128\text{ }^\circ\text{C}$; фреон-13 (CClF_3) – при $T = -82\text{ }^\circ\text{C}$; фреон-22 (CHClF_2) – при $T = -40,8\text{ }^\circ\text{C}$; фреон-12 (CCl_2F_2) – при $T = -29,8\text{ }^\circ\text{C}$.

Наиболее распространенным из фреонов являлся фреон-12, используемый, в частности, во многих бытовых холодильниках. По своим термодинамическим свойствам фреон-12 сходен с ам-

миаком, однако имеет меньшую, чем аммиак, теплоту парообразования. Фреон-12 считается озоноразрушающим веществом, поэтому его сняли с производства.

В последнее время стали использоваться азеотропные смеси двух компонентов (фреонов), так как температура кипения смеси ниже температуры кипения отдельных компонентов. Примером может служить фреон R-406a (азеотропная смесь R22, R142b и R600a).

Интересно отметить, что появление хладагентов этого нового типа было вызвано именно потребностями промышленности, производившей холодильные установки – эти новые вещества были впервые синтезированы в 1928 г. американским химиком Т. Мидглеем, работавшим в одной из холодильных лабораторий. Они выгодно отличались от ряда прежних хладагентов тем, что не имели запаха, были нетоксичны и негорючи.

Впервые парокомпрессионная холодильная установка, работающая на парах эфира, была создана еще в 1834 г. Затем в качестве хладагентов в установках этого типа были использованы метиловый эфир и сернистый ангидрид. В 1874 г. немецкий инженер К. Линде создал аммиачную, а в 1881 г. – с диоксидом углерода парокомпрессионные установки. В 30-х годах прошлого столетия в холодильной технике в качестве хладагентов парокомпрессионных установок были впервые использованы синтезированные в этот период фреоны.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Методика эксперимента

Опытная холодильная установка (холодильник) практически всегда работает, поэтому не требует включения и выключения для снятия показаний приборов.

Схема действующей установки приведена на рис. 1. Схематичное изображение цикла холодильной установки в p - i -диаграмме приведено на рис. 3. Цикл осуществляется аналогично рис. 2 и проходит через точки $1-2\delta-3-4-5-1$ (действительный цикл). В момент работы компрессора снимаются показания контрольно-измерительных приборов: напряжения U , силы тока I , по

манометрам давления на всасе p_1 и нагнетании $p_{2\partial}$ компрессора, температуры до испарителя t_5 , после испарителя t_1 , на нагнетании компрессора (до конденсатора) $t_{2\partial}$ и после конденсатора t_4 . Все данные заносятся в табл. А1.

4.2. Методика обработки экспериментальных данных

По известным значениям температур и абсолютных давлений ($p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}$; $p_{\text{атм}} = 1$ бар) нужно изобразить цикл в диаграмме $i-p$ в масштабе (см. пример по рис. 3). Для этого из приложения Б (рис. А1) берут диаграмму и наносят на нее точки цикла.

Затем по диаграмме определяют параметры в точках цикла и заносят их в табл. А2.

Рассчитывают следующие величины.

1. Мощность, затрачиваемая на холодильную установку в действительном цикле, Вт

$$N_{\text{д}} = UI.$$

2. Удельная холодопроизводительность действительного цикла (удельное количество теплоты, воспринятое рабочим телом от холодного источника – охлаждаемого объекта), кДж/кг

$$q_2 = i_1 - i_5.$$

3. Удельная теплота, отводимая от хладагента в действительном цикле, кДж/кг

$$q_1 = i_{2\partial} - i_4.$$

4. Удельная работа действительного процесса в результате необратимости процесса сжатия (затраченная на привод компрессора от внешнего поставщика электроэнергии для сжатия ХА в результате электромеханических потерь в компрессоре и электродвигателе), кДж/кг

$$l_{\text{д}} = l_{\text{д}} = i_{2\partial} - i_1.$$

5. Расход ХА в действительном цикле, кг/с

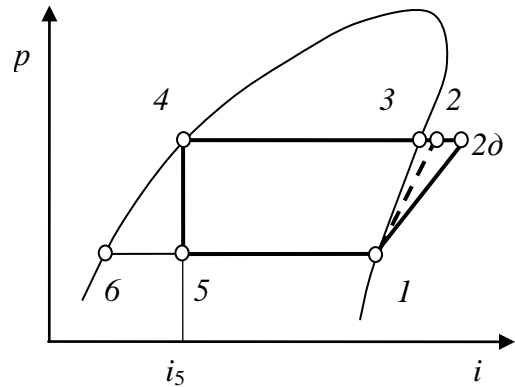


Рис. 3. Теоретический и действительный цикл паровой компрессионной холодильной машины

$$G_{\text{ха}} = \frac{N_{\text{д}}}{l_{\text{д}}}.$$

6. Удельная работа обратимого (теоретического) процесса сжатия в компрессоре компрессора теоретического цикла, кДж/кг

$$l_{\text{т}} = i_2 - i_1.$$

7. Увеличение затрат работы в результате необратимости процесса сжатия в компрессоре рассчитаем по зависимости:

$$\Delta l^{\text{км}} = l_{\text{д}} - l_{\text{теор}} = (i_{2\text{д}} - i_1) - (i_2 - i_1) = i_{2\text{д}} - i_2.$$

8. *Холодопроизводительностью холодильной установки* называется количество теплоты Q_2 , отводимое в холодильной установке от охлаждаемого тела в единицу времени, Вт, и определяется по зависимости:

$$Q_2 = q_2 G_{\text{ха}}.$$

9. Холодильный коэффициент действительного цикла

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_{\text{д}}}.$$

10. Холодильный коэффициент теоретического цикла

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{q_2}{l_{\text{т}}}.$$

Результаты расчетов сводятся в табл. А2.

По полученным данным проводится анализ работы холодильной установки и формулируются выводы по лабораторной работе.

5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Запрещается:

1. Производить исправления в электросхеме, находящейся под напряжением.
2. Работать с незаземленным оборудованием.
3. Касаться проводников, металлических клемм и других деталей, находящихся под электрическим напряжением.
4. Если возникло возгорание, следует немедленно обесточить лабораторную установку, вызвать пожарную команду и тушить огонь только углекислотным огнетушителем.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах формата А4 с рамками и штампами и должен содержать:

- 1) титульный лист установленной формы;
- 2) кратко изложенные теоретические положения;
- 3) принципиальную схему лабораторного стенда с основными техническими параметрами;
- 4) таблицы измеренных и расчетных величин;
- 5) обработку результатов опыта;
- 6) графические зависимости;
- 7) выводы по работе.

Чертежи, схемы и таблицу следует оформлять в соответствии с действующими стандартами и ГОСТами.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое обратный термодинамический цикл?
2. Расскажите про холодильный коэффициент.
3. Что такое хладагент, какие хладагенты существуют?
4. Изобразите цикл теплового насоса, отопительный коэффициент.
5. Комбинированная машина по совместной выработке тепла и холода, коэффициент трансформации тепла.
6. На чем основан принцип действия следующих видов холодильных установок: воздушная, пароэжекторная, абсорбционная, парокомпрессионная.
7. Как влияют основные параметры цикла на эффективность работы.
8. Среднеинтегральная температура.
9. Что такое холодопроизводительность?

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. – 4-е изд., стер. – М., 2009. – 469 с.
2. Кириллин В.А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2008. – 496 с.
3. Мазур, Л. С. Техническая термодинамика и теплотехника: учебник. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2003. – 352 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1

Таблица исходных данных и результатов опыта

Величины	Обозначения и значения	Единицы измерения
Напряжение	$U =$	В
Сила тока	$I =$	А
Давление на всасе компрессора	$p_{1изб} =$ $p_{1абс} =$	бар
Давление на нагнетании компрессора	$p_{2\partial изб} =$ $p_{2\partial абс} =$	бар
Температура до испарителя	$t_5 =$	°С
Температура после испарителя	$t_1 =$	°С
Температура на нагнетании компрессора (до конденсатора)	$t_{2\partial} =$	°С
Температура после конденсатора	$t_4 =$	°С

Таблица А2

Таблица результатов расчета параметров в точках цикла

№ точки	Параметры состояния					
	$t, \text{°С}$	$p, \text{бар}$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$i, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	x
1						
2 ∂						
2						
3						
4						
5						
6						

Таблица результатов расчета цикла

Наименование параметров	Обозначение и значение	Размерность
Мощность действительного цикла	$N_d =$	Вт
Удельная холодопроизводительность действительного цикла	$q_2 =$	кДж/кг
Удельная теплота, отводимая от хладагента в действительном цикле	$q_1 =$	кДж/кг
Удельная работа компрессора действительного цикла	$l_d =$	кДж/кг
Расход хладагента в действительном цикле	$G_{ха} =$	кг/с
Удельная работа компрессора теоретического цикла	$l_t =$	кДж/кг
Холодопроизводительность действительного цикла	$Q_2 =$	кВт
Холодильный коэффициент действительного цикла	$\varepsilon =$	-
Холодильный коэффициент теоретического цикла	$\varepsilon_t =$	-

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

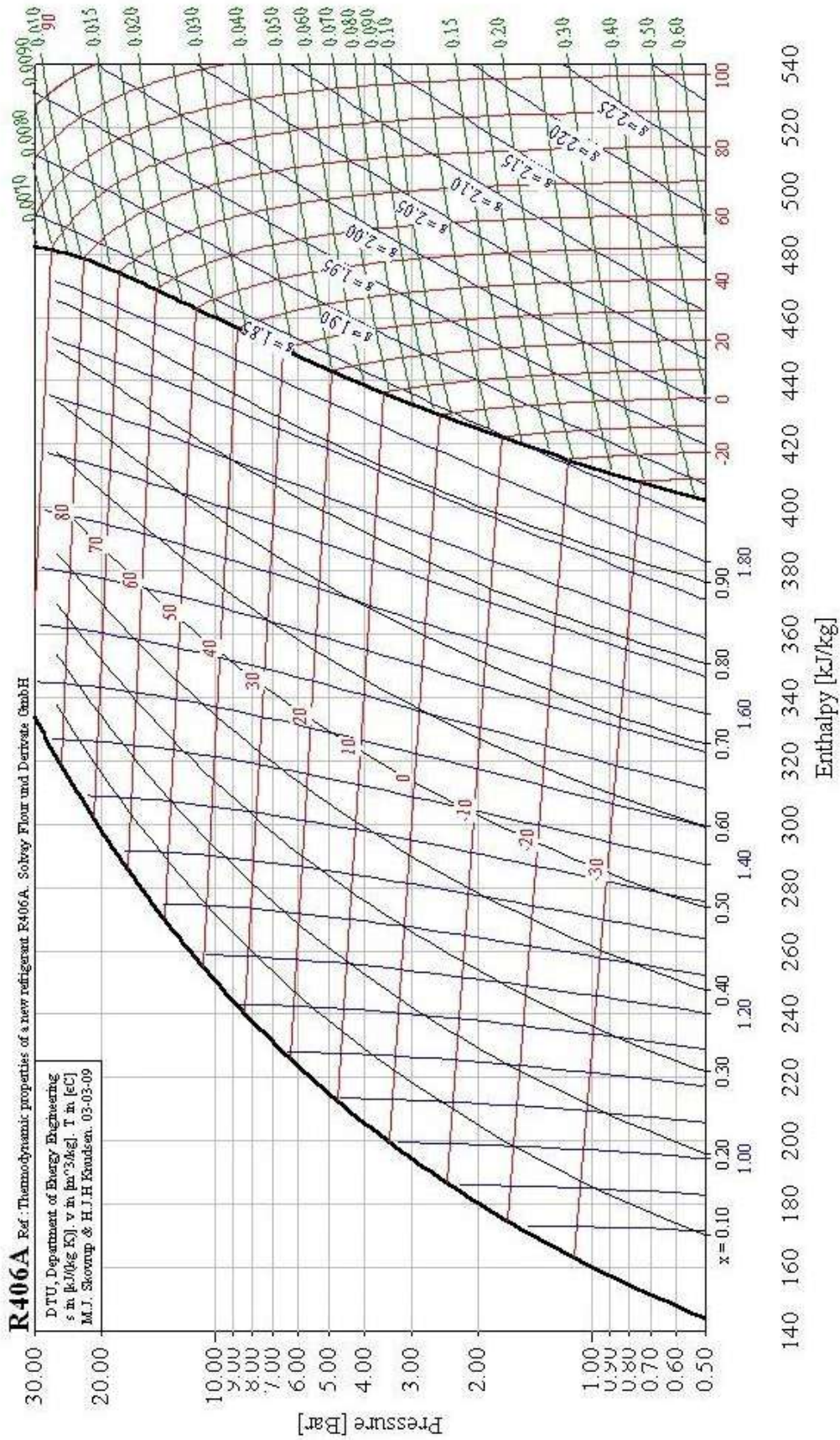


Рис. А1. p-i диаграмма фреона R-406а

Составители
Елена Юрьевна Темникова
Александр Романович Богомолов
Сергей Александрович Шевырев

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦИКЛА ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Тепломассообмен» для студентов направления
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направления
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин
и комплексов», профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
и специальности 21.05.04.00 «Горное дело», специализация 21.05.04.10
«Электрификация и автоматизация горного производства»,
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.02.2016. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 0,5.

Тираж 20 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.