

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Техносферная безопасность»

# ОСНОВЫ ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности  
6-05-1042-01 «Транспортная логистика»  
очной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 504(075.8)  
ББК 20.1я73  
О75

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Техносферная безопасность» «25» марта 2026 г.,  
протокол № 8

Составитель канд. биол. наук, доц. Н. Н. Казачёнок

Рецензент канд. техн. наук О. В. Голушкова

Методические рекомендации к практическим занятиям содержат основные теоретические положения по теме, методику выполнения практических работ, варианты заданий. Предназначены для студентов специальности 6-05-1042-01 «Транспортная логистика» очной формы обучения.

Учебное издание

## ОСНОВЫ ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

Ответственный за выпуск

А. В. Щур

Корректор

И. В. Голубцова

Компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2026

## Содержание

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                            | 4  |
| 1 Практическая работа № 1. Инвентаризация выбросов промышленных предприятий .....                                                        | 5  |
| 2 Практическая работа № 2. Расчёт выбросов загрязняющих веществ при сжигании твёрдого топлива .....                                      | 9  |
| 3 Практическая работа № 3. Определение максимальной приземной концентрации примеси от стационарного источника .....                      | 13 |
| 4 Практическая работа № 4. Определение энергетических, экологических и агротехнических эффектов от внедрения биогазовых комплексов ..... | 18 |
| 5 Практическая работа № 5. Расчет эффективности типичных энергосберегающих мероприятий в производственных организациях .....             | 23 |
| 6 Практическая работа № 6. Оценка снижения выбросов парниковых газов в результате осуществления энергосберегающих мероприятий .....      | 32 |
| 7 Практическая работа № 7. Решение задач оптимизации для рационального использования ресурсов.....                                       | 36 |
| 8 Практическая работа № 8. Определение кислотности осадков и почвы в зоне промышленного предприятия.....                                 | 42 |
| Список литературы .....                                                                                                                  | 46 |

## Введение

Познание окружающего мира – естественная потребность живого существа и источник интеллектуального наслаждения для существа разумного. Даже примитивный живой организм не накапливает бесполезной информации. Сначала на генном, затем на рефлекторном уровне закладывается система регулирования взаимоотношений индивида с окружающей средой. С помощью морфологических изменений, физиологических и поведенческих реакций происходит адаптация вида, популяции, особи к миру. В результате вид становится узкоспециализированным: реакции, отработанные в данных конкретных условиях, при изменении ситуации в непрерывно эволюционирующей среде становятся неадекватными. Чем лучше адаптирован вид, тем ближе его вымирание.

Разумное существо, напротив, стремится адаптировать окружающий мир к своему анатомически и физиологически реликтовому организму. Жизнестойкость такого вида может быть практически неограниченной. В эволюционном тупике узкой специализации оказывается сама адаптируемая окружающая среда.

Биологические потребности человека не превышают потребностей животного средних размеров. Социальные потребности можно условно разделить на «потребности развивающегося сознания» и «прихоти иерархического статуса в стае». Эволюция социальных потребностей, эволюция сознания определит дальнейшую судьбу планеты и того сектора Метагалактики, на который мы успеем распространить наше адаптирующее влияние.

Результаты преобразующей деятельности человека не всегда легко прогнозировать. Многие изменения и усовершенствования окружающей человека среды могут негативно отразиться на среде природной, приведут к снижению разнообразия и утере возможностей для дальнейшего развития.

Учебный курс «Основы эколого-энергетической устойчивости производства» формирует знания по основным направлениям современной научной методологии охраны окружающей среды, дает представление о ведущих научных понятиях и концепциях, взаимосвязи и взаимообусловленности явлений в техносфере и биосфере, закономерностях влияния технологических процессов на экологические факторы. Данный курс направлен на формирование у студентов научных знаний и практических навыков обеспечения эколого-энергетической устойчивости производства на базе современных методов рационального природопользования и энергосбережения.

Практическая часть курса направлена на формирование навыков анализа критериев качества окружающей среды; определения состояния окружающей среды; оценки энергоэффективности производства; повышения энергоэффективности в различных отраслях человеческой деятельности.

# 1 Практическая работа № 1. Инвентаризация выбросов промышленных предприятий

**Цель работы:** изучить методику и процедуру проведения и представления результатов инвентаризации выбросов промышленного предприятия.

## *Теоретическая часть*

Инвентаризация выбросов служит основанием для разработки проекта нормативов или временных нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух.

Инвентаризация выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух проводится:

- для новых, модернизируемых, реконструируемых стационарных источников выбросов в срок не позднее чем через два года с даты выхода на проектную мощность технологического оборудования;
- для действующих стационарных источников выбросов в зависимости от категории объекта.

При проведении инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух необходимо учесть:

- все источники выделения ЗВ и источники выбросов, в том числе неработающие, резервные, находящиеся в ремонте, принадлежащие природопользователю, которые постоянно или временно эксплуатируются на его производственной площадке;
- все ЗВ, которые могут образоваться при осуществлении всех процессов, предусмотренных технологическим регламентом производства, от всех организованных и неорганизованных стационарных источников выбросов.

Инвентаризация выбросов проводится в несколько этапов:

- 1) выявление всех источников выделения ЗВ на территории предприятия. Источник выделения ЗВ – объект, в котором происходит образование и из которого осуществляется выделение ЗВ (технологическая установка, устройство, аппарат, агрегат, станок и др.);
- 2) выявление всех ЗВ, выделяющих в производственных процессах;
- 3) определение величины выбросов (максимальных и валовых) для каждого ЗВ;
- 4) оформление результатов расчетов.

Определение величины выбросов для инвентаризации может производиться как инструментальным, так и расчетным способом. В случае расчетного способа определения массы выбросов используют соответствующие нормативные документы: технические кодексы устоявшейся практики, руководящие документы, инструкции.

Валовый выброс ЗВ – количество ЗВ, поступающего в атмосферный воздух за рассматриваемый период (чаще всего за год), т.

Максимальный выброс ЗВ – максимальное количество ЗВ, поступающего в атмосферный воздух с дымовыми газами в единицу времени, г/с.

Удельные показатели выделения ЗВ – усредненные значения величин образования ЗВ, определенные на основании инструментальных замеров, материальных балансов, аналитических расчетов и отнесенные к различным единицам: количеству расходуемого материала, времени, мощности технологического оборудования.

### *1.1 Расчет выбросов ЗВ при сварке металлов.*

Количество ЗВ, выделяющегося при использовании определенного типа сварочного материала на отдельном источнике, рассчитывается по формуле

$$W = q \cdot B,$$

где  $q$  – количество ЗВ, выделяющееся при расплавлении единицы массы данного сварочного материала;

$B$  – количество сварочного материала, используемого на данном источнике за единицу времени.

Количество этого ЗВ, поступающего в атмосферу, рассчитывается по формуле

$$W_a = W \cdot (1 - 0,01n) \cdot K,$$

где  $n$  – степень очистки пылегазовоздушной смеси от данного ЗВ в газоочистных установках (ГОУ) предприятия;

$K$  – коэффициент осаждения, который применяется для помещений, в которых отсутствует газоочистка, ЗВ выносятся в атмосферу через оконные и дверные проёмы.

Количество данного ЗВ, поступающего в атмосферу от каждого источника, суммируют и пересчитывают в общепринятую единицу измерения (т/год).

Такой расчёт проводят для всех ЗВ, относительно которых производится инвентаризация.

### *1.2 Расчет выбросов ЗВ при механической обработке металлов.*

Расчет выбросов при обработке металлов осуществляется аналогично, но вместо массы расплавленного сварочного материала учитывают время механической обработки данным типом инструмента.

## **Практическое задание**

Провести инвентаризацию выбросов в ремонтных мастерских согласно выданному заданию. В ремонтных мастерских производится механическая обработка металлических деталей и заготовок, расположен сварочный пост. Исходные данные для расчетов приведены в таблицах 1.1–1.3.

Таблица 1.1 – Материалы и условия выделения ЗВ на сварочном участке

| Вариант | Вид сварки                                  | Используемый материал | Количество аппаратов | B, кг/год  | n, % | Условие выделения ЗВ |
|---------|---------------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------|------|----------------------|
| 1       | Ручная дуговая штучными электродами         | УОНИ-13/65<br>МР-3    | 2<br>1               | 400<br>350 | 0    | Без очистки          |
| 2       | Ручная дуговая штучными электродами         | УОНИ-13/65<br>МР-3    | 1<br>2               | 400<br>350 | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 3       | Полуавтоматическая без газовой защиты       | Присадочная проволока | 2                    | 500        | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 4       | Полуавтоматическая без газовой защиты       | Присадочная проволока | 2                    | 500        | 0    | Без очистки          |
| 5       | Полуавтоматическая в среде углекислого газа | Электродная проволока | 3                    | 300        | 0    | Без очистки          |
| 6       | Ручная дуговая штучными электродами         | АНО-4<br>АНЖР-2       | 2<br>1               | 250<br>300 | 0    | Без очистки          |
| 7       | Ручная дуговая штучными электродами         | АНО-4<br>АНЖР-2       | 2<br>1               | 250<br>300 | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 8       | Полуавтоматическая без газовой защиты       | Присадочная проволока | 3                    | 400        | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 9       | Полуавтоматическая без газовой защиты       | Присадочная проволока | 3                    | 400        | 0    | Без очистки          |
| 10      | Полуавтоматическая в среде углекислого газа | Электродная проволока | 3                    | 300        | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 11      | Ручная дуговая штучными электродами         | ЭА 606/П              | 2                    | 400        | 0    | Без очистки          |
| 12      | Ручная дуговая штучными электродами         | ЭА 606/П              | 2                    | 400        | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 13      | Ручная дуговая штучными электродами         | АНО-4<br>МР-3         | 1<br>2               | 300<br>350 | 0    | Без очистки          |
| 14      | Ручная дуговая штучными электродами         | АНО-4<br>МР-3         | 1<br>2               | 300<br>350 | 90   | Очистка через ГОУ    |
| 15      | Полуавтоматическая в среде углекислого газа | Электродная проволока | 2                    | 300        | 90   | Очистка через ГОУ    |

Таблица 1.2 – Удельные выбросы ЗВ при сварочных работах

| Сварочный материал    | Наименование и удельное количество выделяемых ЗВ, г/кг |                           |           |                                                             |                                   |               |                |
|-----------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|----------------|
|                       | Железа (II) оксид                                      | Марганец и его соединения | Хром (VI) | Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния менее 70 % | Фтористые соединения газообразные | Азота диоксид | Углерода оксид |
| УОНИ-13/65            | 4,49                                                   | 1,41                      |           | 0,8                                                         | 1,97                              |               |                |
| ЭА 606/П              | 9,72                                                   | 0,68                      | 0,3       |                                                             | 0,004                             | 1,3           | 1,4            |
| АНО-4                 | 15,73                                                  | 1,66                      |           | 0,41                                                        |                                   |               |                |
| МР-3                  | 9,77                                                   | 1,73                      |           |                                                             | 0,4                               |               |                |
| АНЖР-2                | 12,46                                                  |                           | 0,83      |                                                             | 2,91                              |               |                |
| Присадочная проволока | 11,86                                                  | 0,54                      |           |                                                             | 0,36                              |               |                |
| Электродная проволока | 1,03                                                   | 0,48                      |           | 0,02                                                        |                                   |               |                |

Таблица 1.3 – Характеристики станков и условия выделения ЗВ на участке механической обработки металлов

| Вариант | Вид станка                        | Количество станков | Удельное количество выделяемой пыли, г/ч | Время работы станка, ч/год | n, % | Условие выделения ЗВ |
|---------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------------|----------------------------|------|----------------------|
| 1       | Заточной<br>Сверлильный           | 1                  | 72,0                                     | 2304                       | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 1                  | 25,2                                     | 1728                       |      |                      |
| 2       | Сверлильный<br>Круглошлифовальный | 2                  | 25,2                                     | 1152                       | 95   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 1                  | 154,8                                    | 240                        |      |                      |
| 3       | Круглошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 180,0                                    | 576                        | 85   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 1                  | 122,4                                    | 1920                       |      |                      |
| 4       | Плоскошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 151,2                                    | 288                        | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 1                  | 172,8                                    | 1056                       |      |                      |
| 5       | Заточной<br>Сверлильный           | 2                  | 144,0                                    | 1728                       | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 1                  | 25,2                                     | 960                        |      |                      |
| 6       | Сверлильный<br>Круглошлифовальный | 1                  | 25,2                                     | 1584                       | 90   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 1                  | 169,2                                    | 528                        |      |                      |
| 7       | Круглошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 154,8                                    | 264                        | 95   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 2                  | 72,0                                     | 1440                       |      |                      |
| 8       | Плоскошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 180,0                                    | 960                        | 85   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 2                  | 172,8                                    | 1584                       |      |                      |
| 9       | Заточной<br>Сверлильный           | 1                  | 144,0                                    | 1152                       | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 2                  | 25,2                                     | 528                        |      |                      |
| 10      | Сверлильный<br>Круглошлифовальный | 1                  | 25,2                                     | 1920                       | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 1                  | 180,0                                    | 264                        |      |                      |
| 11      | Круглошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 169,2                                    | 576                        | 90   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 1                  | 194,4                                    | 2304                       |      |                      |
| 12      | Плоскошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 198,0                                    | 1152                       | 95   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 1                  | 172,8                                    | 2112                       |      |                      |
| 13      | Заточной<br>Сверлильный           | 1                  | 144,0                                    | 960                        | 85   | Очистка через ГОУ    |
|         |                                   | 1                  | 25,2                                     | 1056                       |      |                      |
| 14      | Сверлильный<br>Круглошлифовальный | 1                  | 25,2                                     | 288                        | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 2                  | 154,8                                    | 1728                       |      |                      |
| 15      | Круглошлифовальный<br>Заточной    | 1                  | 180,0                                    | 528                        | 0    | Без очистки          |
|         |                                   | 2                  | 144,0                                    | 1056                       |      |                      |

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Что такое валовый выброс ЗВ?
- 2 Что такое максимальный выброс ЗВ?
- 3 Какие параметры учитываются при расчёте валовых выбросов ЗВ?

## 2 Практическая работа № 2. Расчёт выбросов загрязняющих веществ при сжигании твёрдого топлива

**Цель работы:** изучить методику и выполнить расчет выбросов ЗВ в результате сжигания твердого топлива от установок мощностью до 25 МВт.

### *Теоретическая часть*

Сжигание топлива для получения тепловой и электрической энергии оказывает негативное воздействие на состояние окружающей среды. При сжигании твердого топлива образуются оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, твердые частицы, бенз(а)пирен. Рассчитывают максимальные и валовые выбросы загрязняющих веществ в соответствии с ТКП 17.08-01–2006 (02120) для котлов теплопроизводительностью до 25 МВт.

Концентрация загрязняющего вещества (ЗВ) в сухих дымовых газах – это концентрация вещества, измеренная за котлом, пересчитанная на сухой дымовой газ и приведенная к условному коэффициенту избытка воздуха  $\alpha_T$  1,4 в нормальных условиях.

Максимальный выброс ЗВ – это максимальное количество ЗВ, поступающего в атмосферный воздух с дымовыми газами.

Валовый выброс ЗВ – это количество ЗВ, поступающего в атмосферный воздух с дымовыми газами за рассматриваемый период (год, квартал, месяц).

### *2.1 Определение выбросов оксидов азота.*

Методика определения выбросов оксидов азота состоит из двух этапов. Первоначально определяются максимальные и валовые выбросы для всех оксидов азота суммарно, а затем производится перерасчет на диоксид и монооксид азота. Монооксид азота для максимального выброса, как правило, не определяется.

Максимальный выброс оксидов азота  $M_{NOx}$ , г/с, определяется по формуле

$$M_{NOx} = B_s \cdot Q_i^r \cdot K_{NOx}^T(\text{макс}) \cdot \beta_p,$$

где  $Q_i^r$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$\beta_p$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов,  $\beta_p = 1$ ;

$B_s$  – расчетный расход топлива на работу котла при максимальной нагрузке, кг/с.

$$B_s = (1 - 0,01q_4) \cdot B^f,$$

где  $q_4$  – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, %;

$B^f$  – фактический расход топлива на работу котла при максимальном режиме горения, кг/с.

$$B^f = 100N / (Q_i^r \cdot \eta),$$

где  $N$  – расчетная нагрузка котла, МВт;

$Q_i^r$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$\eta$  – КПД котла на расчетной нагрузке, %.

Удельный выброс оксидов азота при расчете максимального выброса определяется по формуле

$$K_{\text{NOx}}^T(\text{макс}) = 0,001 H_T \cdot \alpha_T \cdot K_T \cdot [B_s \cdot (Q_i^r)^3]^{0,5},$$

где  $H_T$  – характеристика топлива;

$\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха;

$K_T$  – коэффициент выброса азота оксидов; для костры  $K_T = 0,3$ , для остальных видов топлива  $K_T = 0,4$ .

С учетом трансформации оксидов азота в атмосфере, выброс диоксида азота  $M_{\text{NO}_2}$ , г/с, вычисляется по формуле

$$M_{\text{NO}_2} = 0,8 M_{\text{NOx}}.$$

Валовый выброс оксидов азота  $M_{\text{NOx}}^e$ , т/год, определяется по формуле

$$M_{\text{NOx}}^e = 0,001 \cdot B_s^t \cdot Q_i^r \cdot K_{\text{NOx}}^T(\text{вал}) \cdot \beta_p,$$

где  $B_s^t$  – расчетный расход топлива, т/год.

$$B_s^t = (1 - 0,01) \cdot B,$$

где  $B$  – фактический расход топлива, т/год.

Удельный выброс оксидов азота при расчете валового выброса определяется по формуле

$$K_{\text{NOx}}^T(\text{вал}) = 0,001 H_T \cdot \alpha_T \cdot K_T \cdot [B^{te} \cdot (Q_i^r)^3]^{0,5},$$

где  $B^{te}$  – расчетный расход топлива на работу котла, т/год.

$$B^{te} = B_s^t / 3,6T,$$

где  $T$  – общее количество часов работы котла за год на данном виде топлива, ч.

Для валовых выбросов оксидов азота производится пересчет по формулам

$$M_{\text{NO}_2}^e = 0,8 M_{\text{NOx}}^e;$$

$$M_{\text{NO}}^e = 0,13 M_{\text{NOx}}^e.$$

## 2.2 Определение выбросов диоксида серы.

Максимальный выброс диоксида серы  $M_{\text{SO}_2}$ , г/с, определяется по формуле

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 B^f \cdot S^r(\text{макс}) \cdot (1 - \eta_{\text{S1}}) \cdot (1 - \eta_{\text{S2}}) \cdot 1000,$$

где  $S^r(\text{макс})$  – максимальное содержание серы в рабочей массе топлива, %;

$\eta_{s1}$  – доля серы оксидов, связываемых летучей золой в котле;

$\eta_{s2}$  – доля серы оксидов, улавливаемых в мокром золоуловителе попутно с улавливанием твердых частиц,  $\eta_{s2} = 0$ .

Валовый выброс диоксида серы  $M^{te}_{SO_2}$ , т/год, рассчитывается по формуле

$$M^{te}_{SO_2} = 0,02B \cdot S^r(\text{вал}) \cdot (1 - \eta_{s1}) \cdot (1 - \eta_{s2}),$$

где  $S^r(\text{вал})$  – среднее содержание серы в рабочей массе топлива, %.

### 2.3 Определение выбросов оксида углерода.

Максимальный выброс оксида углерода  $M_{CO}$ , г/с, рассчитывается по формуле

$$M_{CO} = B_s \cdot C_{CO}(\text{макс}),$$

где  $C_{CO}(\text{макс})$  – выход оксида углерода при расчете максимального выброса, г/кг.

$$C_{CO}(\text{макс}) = q_3(\text{макс}) \cdot R \cdot Q_i^r,$$

где  $q_3(\text{макс})$  – потери тепла из-за химической неполноты сгорания топлива, %;

$R$  – коэффициент, учитывающий долю потерю тепла из-за химической неполноты сгорания топлива.

Валовый выброс оксида углерода  $M^{te}_{CO}$ , т/год, определяется по формуле

$$M^{te}_{CO} = 1000 \cdot B_s^t \cdot C_{CO}(\text{вал}),$$

где  $C_{CO}(\text{вал})$  – выход оксида углерода при сжигании топлива при расчете максимального выброса, г/кг.

$$C_{CO}(\text{вал}) = q_3(\text{вал}) \cdot R \cdot Q_i^r,$$

где  $q_3(\text{вал})$  – потери тепла из-за химической неполноты сгорания топлива, %.

### 2.4 Определение выбросов твердых частиц.

Максимальный выброс твердых частиц  $M_{PM}$ , г/с, рассчитывается по формуле

$$M_{PM} = 0,01 \cdot B^f \cdot (1 - \eta_c) \cdot (\alpha_{ab} \cdot A^r + q_{ab} \cdot Q_i^r / 32,68) \cdot 1000,$$

где  $\eta_c$  – доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях.  $\eta_c = 0$ ;

$\alpha_{ab}$  – доля золы, уносимой газами из котла;

$A^r$  – максимальная зольность топлива на рабочую массу, %;

$q_{ab}$  – потери теплоты с уносом от неполноты сгорания топлива, %.

Валовый выброс твердых частиц  $M^{te}_{PM}$ , т/год, рассчитывается по формуле

$$M^{te}_{PM} = 0,01 \cdot B \cdot (1 - \eta_c) \cdot (\alpha_{ab} \cdot A^r + q_{ab} \cdot Q_i^r / 32,68).$$

### Практическое задание

Рассчитать выбросы ЗВ от мини-котельной мощностью  $N$ , работающей на твердом топливе. Исходные данные представлены в таблице 2.1. Результаты расчетов представить в форме таблицы 2.2.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета

| Вид используемого топлива                                                                                  | Едини-<br>ца<br>измере-<br>ния | 1                                       | 2          | 3           | 4                        | 5                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|------------|-------------|--------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                            |                                | Щепа<br>малоплот-<br>ной дре-<br>весины | Дро-<br>ва | Опил-<br>ки | Древе-<br>сные<br>отходы | Костра для<br>топливных<br>нужд |
| Расход топлива, т/год                                                                                      | $B$                            | 313                                     | 1914       | 6240        | 3150                     | 4860                            |
| Расчетная нагрузка котла, МВт                                                                              | $N$                            | 0,3                                     | 1,163      | 5,2         | 2,14                     | 3,44                            |
| Номинальная теплопроиз-<br>водительность котла, Гкал/ч                                                     | $Q_n$                          | 300                                     | 1000       | 5000        | 2000                     | 3400                            |
| Фактическая теплопроизводи-<br>тельность котла, Гкал/ч                                                     | $Q_f$                          | 210                                     | 700        | 4650        | 1680                     | 2990                            |
| КПД котла, %                                                                                               | $\eta$                         | 85                                      | 80         | 85          | 90                       | 80                              |
| Общее количество часов работы<br>котла за год на данном виде топ-<br>лива, ч                               | $T$                            | 8760                                    | 8760       | 4320        | 3600                     | 5040                            |
| Низшая теплота сгорания топлива,<br>МДж/кг                                                                 | $Q_{i'}$                       | 11,68                                   | 10,22      | 10,32       | 10,9                     | 14,49                           |
| Максимальное содержание серы в<br>рабочей массе топлива                                                    | $S^r(\text{макс})$             | 0,10                                    | 0,05       | 0,05        | 0,05                     | 0,15                            |
| Среднее содержание серы в рабо-<br>чей массе топлива                                                       | $S^r(\text{вал})$              | 0,10                                    | 0,05       | 0,05        | 0,05                     | 0,15                            |
| Доля серы оксидов, связываемых<br>летучей золой в котле                                                    | $\eta_{s1}$                    | 0,58                                    | 0,69       | 0,55        | 0,63                     | 0,55                            |
| Максимальная зольность топлива                                                                             | $A^r$                          | 3,0                                     | 0,6        | 0,6         | 0,6                      | 2,5                             |
| Характеристика топлива                                                                                     | $H_T$                          | 13,2                                    | 14,3       | 14,3        | 13,2                     | 12,1                            |
| Коэффициент избытка воздуха в<br>топке                                                                     | $\alpha_T$                     | 2,5                                     | 2,5        | 2,0         | 2,5                      | 2,0                             |
| Потери тепла от механической<br>неполноты сгорания топлива, %                                              | $q_4$                          | 4,0                                     | 4,0        | 1,5         | 4,0                      | 2,0                             |
| Потери тепла от химической<br>неполноты сгорания топлива<br>(макс), %                                      | $q_3(\text{макс})$             | 0,7                                     | 0,7        | 0,5         | 0,7                      | 0,5                             |
| Потери тепла от химической<br>неполноты сгорания топлива (вал),<br>%                                       | $q_3(\text{вал})$              | 0,6                                     | 0,6        | 0,4         | 0,6                      | 0,4                             |
| Коэффициент, учитывающий до-<br>лю потерь тепла вследствие хими-<br>ческой неполноты сгорания топ-<br>лива | $R$                            | 1,0                                     | 1,0        | 1,0         | 1,0                      | 1,0                             |
| Доля золы, уносимая газами из<br>котла                                                                     | $\alpha_{ab}$                  | 0,15                                    | 0,2        | 0,2         | 0,2                      | 0,25                            |
| Потери теплоты с уносом от меха-<br>нической неполноты сгорания<br>топлива                                 | $q_{ab}$                       | 2,5                                     | 1,0        | 0,7         | 1,2                      | 0,5                             |

Таблица 2.2 – Результаты расчетов максимальных и валовых выбросов загрязняющих веществ от мини-котельной, работающей на твердом топливе

| Код ЗВ | Наименование ЗВ            | Максимальный выброс, г/с | Валовый выброс, т/год |
|--------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0301   | Диоксид азота              |                          |                       |
| 0304   | Монооксид азота            | Не определяется          |                       |
| 0330   | Диоксид серы               |                          |                       |
| 2902   | Твердые частицы (суммарно) |                          |                       |
| 0337   | Оксид углерода             |                          |                       |

### **Контрольные вопросы**

- 1 Дайте определение валового и максимального выбросов ЗВ.
- 2 Выбросы каких ЗВ определяются при сжигании твердого топлива?
- 3 В соответствии с какими документами определяются выбросы ЗВ при сжигании твердого топлива?
- 4 Для чего используются расчеты выбросов ЗВ при сжигании топлива?

## **3 Практическая работа № 3. Определение максимальной приземной концентрации примеси от стационарного источника**

**Цель работы:** изучить методику расчета максимальной приземной концентрации загрязняющих веществ, расстояния и опасной скорости ветра, при которой она наблюдается; выполнить расчет максимальной концентрации примеси, расстояния и опасной скорости ветра от одиночного источника загрязнений с круглым сечением.

### **Теоретическая часть**

Загрязнением атмосферы считается изменение ее состава в результате поступления газообразных, жидких и твердых примесей. *За относительно чистый* можно принимать такой воздух, в котором количество вредных примесей не превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) и который не оказывает существенного отрицательного влияния на растительные и животные организмы.

Основными источниками загрязнения атмосферы являются:

1) природные (естественные) – естественные загрязнители минерального, растительного или микробиологического происхождения, к которым относятся извержения вулканов, лесные и степные пожары, пыль, пыльца растений, выделения животных и др.;

2) искусственные (антропогенные), которые можно разделить на несколько групп:

– бытовые – загрязнители, обусловленные сжиганием топлива в жилом секторе и переработкой бытовых отходов;

– производственные – загрязнители, образующиеся как выбросы при технологических процессах, отопления;

– транспортные – загрязнители, образующиеся при работе автомобильного, железнодорожного, воздушного, морского и речного транспорта.

По составу антропогенные источники загрязнения атмосферы можно разделить на несколько групп:

1) механические загрязнители – пыль цементных заводов, дым от сгорания угля в котельных, топках и печах, сажа от сгорания нефти и мазута, истирающиеся автопокрышки и т. д.;

2) химические загрязнители – пылевидные или газообразные вещества, способные вступать в химические реакции;

3) радиоактивные загрязнители.

В настоящее время одна из основных мер предотвращения загрязнения атмосферы – строительство газоочистных сооружений и устройств. При этом каждое такое очистное сооружение характеризуется определенной степенью очистки газовой смеси от вредных веществ. Определение степени очистки газовой смеси (т. е. допустимой интенсивности выброса загрязняющего вещества при условии сохранения качества воздуха за пределами санитарно-защитной зоны) является важной производственной задачей.

Для решения этой задачи каждым предприятием осуществляется расчёт предельно допустимых выбросов (ПДВ) в атмосферу. При расчёте ПДВ определяются максимальная приземная концентрация загрязняющего вещества  $C_{\max}$  и расстояние от трубы завода  $X_{\max}$ , на которой она будет наблюдаться. Затем рассчитанные величины  $C_{\max}$  сравниваются с ПДК. Если  $C_{\max} > \text{ПДК}$ , тогда в технологические характеристики выброса вносятся коррективы и выполняются мероприятия по снижению значения  $C_{\max}$ .

Расчет ПДВ базируется на следующих положениях:

– на рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере влияют метеорологические параметры: скорость и направление ветра, температурная стратификация атмосферы, температура атмосферного воздуха;

– максимальная приземная концентрация от данного источника загрязнения, возникающая при неблагоприятных метеорологических условиях (при опасной скорости и направлении ветра, высокой температуре атмосферы), не должна превышать ПДК за границей санитарно-защитной зоны;

– приземная концентрация загрязняющих веществ зависит от параметров источника выброса и состава пылегазовоздушной смеси.

Разработанные ПДВ и нормативы выбросов утверждаются в городском комитете или областной инспекции природных ресурсов и охраны окружающей среды на срок от 1 до 7 лет в зависимости от категории воздействия объекта на окружающую среду.

Мероприятия по снижению значений  $C_{\max}$  зависят от многих факторов и могут быть самыми разнообразными. Приведём некоторые из них:

– уменьшение массовых выбросов вещества  $M$ , г/с, путём установки новых или наладки существующих пылегазоулавливающих установок;

– увеличение высоты  $H$ , м, источников загрязнения атмосферы;

- увеличение скорости выхода газовой-воздушной смеси  $\omega_0$ , м/с, из устья источника загрязнения атмосферы до проектной величины;
- преобразование линейных, плоских и неорганизованных источников загрязнения атмосферы в точечные организованные;
- гидрообеспыливание для открытых складов и узлов пересыпки (песок, щебень, гравий и др.);
- корректировка размеров санитарно-защитных зон в соответствии с результатами расчётов рассеивания;
- перенос источников загрязнения атмосферы вглубь территории предприятия;
- уменьшение одновременности работы оборудования при его неполной загрузке, распределение разовых технологических операций по определённому графику.

При исчерпании всех возможных мероприятий необходима смена технологического процесса или ликвидация источника загрязнения атмосферы.

Расчёт максимальной концентрации вредного вещества  $C_{\max}$  при выбросе газовой-воздушной смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем производится по формуле

$$C_{\max} = (A \cdot M \cdot t \cdot n \cdot \eta) / [H^2 \cdot (V_1 \cdot \Delta T)^{0,3333}],$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; для Беларуси и центральной части Европейской территории России  $A = 140$ ;

$M$  – масса загрязняющего вещества (ЗВ), выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, мг/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ в атмосферном воздухе; для газообразных ЗВ и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, зола и т. п., скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю)  $F = 1$ ;

$t, n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой-воздушной смеси из источника выброса;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; для равнинной либо слабопересечённой местности с перепадом высот не более 50 м на 1 км  $\eta = 1$ ;

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м;

$\Delta T$  – разность между температурой газовой-воздушной смеси  $T_1$  и температурой окружающего воздуха  $T_2$ , °С;

$V_1$  – расход газовой-воздушной смеси, м<sup>3</sup>/с.

Расход газовой-воздушной смеси определяется по формуле

$$V_1 = 0,25\pi \cdot D^2 \cdot \omega,$$

где  $D$  – диаметр источника выброса, м;

$\omega$  – средняя скорость выхода газовой-воздушной смеси из устья источника выброса, м/с.

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f, v$ :

$$f = 1000(\omega^2 \cdot D) / (H^2 \cdot \Delta T);$$

при  $f < 100$

$$v = 0,65[(V_1 \cdot \Delta T) / H]^{0,3333};$$

$$m = 1 / (0,67 + 0,1f^{0,5} + 0,34f^{0,3333}).$$

При  $v \geq 2$  коэффициент  $n = 1$ ; при  $0,5 \leq v < 2$  он вычисляется по формуле

$$n = 0,532 v^2 - 2,13v + 3,13.$$

Расстояние  $X_{\max}$ , м, от источника выбросов, на котором приземная концентрация ЗВ достигает максимального значения  $C_{\max}$ , мг/м<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$X_{\max} = 0,25 d \cdot H \cdot (5 - F),$$

где безразмерный коэффициент  $d$  находится по следующим формулам:

– при  $v \leq 0,5$

$$d = 2,48v (1 + 0,28f^{0,3333});$$

– при  $0,5 < v \leq 2$

$$d = 4,95v (1 + 0,28f^{0,3333});$$

– при  $v \geq 2$

$$d = 7v^{0,5} (1 + 0,28f^{0,3333}).$$

Ветер оказывает двоякое влияние на рассеивание примесей: чем больше скорость ветра, тем интенсивнее перемешивание атмосферы и тем интенсивнее распространяется ЗВ в окружающей среде. В то же время с увеличением скорости ветра уменьшается высота факела выброса над устьем трубы.

Опасная скорость ветра  $u_{\max}$ , при которой достигается максимальная приземная концентрация ЗВ ( $C_{\max}$ ), при  $v \leq 0,5$  равна 0,5 м/с; при  $0,5 < v \leq 2$  равна  $v$ ; при  $v \geq 2$  вычисляется по формуле

$$u_{\max} = v(1 + 0,12f^{0,5}).$$

### Практическое задание

Определить максимальную приземную концентрацию ЗВ  $C_{\max}$ , мг/м<sup>3</sup>, при выбросе газовойоздушной смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем; расстояние  $X_{\max}$ , м, на котором  $C_{\max}$  достигается, и опасную скорость

ветра  $u_{\max}$ , м/с, при которой  $C_{\max}$  возникает. Сравнить с ПДК, при необходимости предложите мероприятия по снижению значения  $C_{\max}$ .

ПДК(SO<sub>2</sub>) = 0,5 мг/м<sup>3</sup>; ПДК(зола) = 0,5 мг/м<sup>3</sup>; ПДК(NO<sub>x</sub>) = 0,085 мг/м<sup>3</sup>.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры выброса газовой воздушной смеси

| Вариант | $H$ ,<br>м | $D$ ,<br>м | $\omega$ ,<br>м/с | $T_1$ ,<br>°C | $T_2$ ,<br>°C | $M$ (SO <sub>2</sub> ),<br>мг/с | $M$ (зола),<br>мг/с | $M$ (NO <sub>x</sub> ),<br>мг/с |
|---------|------------|------------|-------------------|---------------|---------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1       | 30         | 1,4        | 8                 | 125           | 25            | 12                              | 15,5                | 15,2                            |
| 2       | 25         | 1,0        | 12                | 100           | 27            | 10                              | 14,5                | 3,8                             |
| 3       | 28         | 1,5        | 15                | 80            | 29            | 30                              | 70,6                | 12,1                            |
| 4       | 18         | 0,7        | 16                | 90            | 31            | 25                              | 15,0                | 1,0                             |
| 5       | 15         | 0,8        | 21                | 130           | 25            | 16                              | 14,0                | 4,6                             |
| 6       | 23         | 0,9        | 16                | 230           | 27            | 21                              | 34,0                | 3,2                             |
| 7       | 28         | 1,0        | 12                | 160           | 29            | 6                               | 62,0                | 5,8                             |
| 8       | 32         | 1,5        | 9                 | 125           | 32            | 15                              | 18,9                | 7,8                             |
| 9       | 20         | 1,2        | 10                | 135           | 29            | 42                              | 14,1                | 10,2                            |
| 10      | 24         | 1,5        | 14                | 215           | 25            | 19                              | 27,2                | 11,4                            |
| 11      | 25         | 1,7        | 9                 | 210           | 30            | 18                              | 34,5                | 2,0                             |
| 12      | 30         | 2,0        | 6                 | 180           | 29            | 5                               | 56,7                | 2,2                             |
| 13      | 23         | 1,3        | 11                | 150           | 26            | 16                              | 59,4                | 12,8                            |
| 14      | 19         | 1,0        | 14                | 165           | 28            | 7                               | 62,1                | 14,4                            |
| 15      | 18         | 0,7        | 19                | 115           | 27            | 21                              | 65,3                | 16,6                            |
| 16      | 35         | 2,0        | 9                 | 210           | 33            | 32                              | 50,0                | 7,4                             |
| 17      | 40         | 2,6        | 5                 | 195           | 25            | 28                              | 24,0                | 21,0                            |
| 18      | 38         | 2,5        | 8                 | 145           | 28            | 14                              | 32,0                | 16,6                            |
| 19      | 24         | 1,8        | 13                | 210           | 28            | 12                              | 12,8                | 21,8                            |
| 20      | 19         | 0,8        | 18                | 160           | 29            | 10                              | 5,6                 | 15,4                            |

### **Контрольные вопросы**

1 Что понимается под загрязнением атмосферного воздуха? Какой воздух считается относительно чистым?

2 Назовите виды и источники загрязнения атмосферы.

3 На каких положениях основывается расчет ПДВ?

4 Перечислите мероприятия по снижению опасности загрязнения атмосферы.

5 Дайте определение максимальной концентрации примеси. От каких параметров она зависит?

6 Что такое опасная скорость ветра?

## 4 Практическая работа № 4. Определение энергетических, экологических и агротехнических эффектов от внедрения биогазовых комплексов

**Цель работы:** изучить методику оценки эффективности от внедрения биогазовой установки по переработке отходов животноводческих комплексов.

### *Теоретическая часть*

#### *4.1 Расчет энергетических аспектов сбраживания биомассы.*

Суточный объем производимого биогаза  $Q_B$ , м<sup>3</sup>/сут, при работе биореактора определяется по формуле

$$Q_B = 0,01b \cdot \sum [n_i \cdot m_i \cdot (100 - W_i)],$$

где  $b$  – усредненный выход биогаза для жидкого свиного навоза, м<sup>3</sup>/кг; для практической работы принимается равным 0,0204;

$n_i$  – количество голов в  $i$ -й половозрастной группе животных;

$m_i$  – суточная масса экскрементов от одной головы животных  $i$ -й половозрастной группы животных, кг/сут; определяется по таблице 4.1;

$W_i$  – влажность сырья, от одной головы животных  $i$ -й половозрастной группы животных, %; определяется по таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Суточный выход и влажность экскрементов различных половозрастных групп свиней

| Половозрастная группа животных | Масса экскрементов $m_i$ , кг/сут | Влажность экскрементов $W_i$ , % |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Хряки                          | 11,1                              | 89,4                             |
| Свиноматки                     | 10,0                              | 91,0                             |
| Поросята                       | 0,7                               | 86,0                             |
| Свиньи на откорме              | 5,0                               | 87,0                             |

Тепловая мощность  $Q_K$ , кВт, биогазового комплекса

$$Q_K = Q_B \cdot Q_B^H \cdot \eta_y \cdot 1,165 / 2400000,$$

где  $Q_B^H$  – низшая рабочая теплота сгорания биогаза, ккал/м<sup>3</sup>; в предварительных расчетах принимается равной 5200 ккал/м<sup>3</sup>;

$\eta_y$  – КПД биогазового комплекса.

Годовая выработка тепловой энергии  $Q$ , Гкал/год, рассчитывается по формуле

$$Q = [0,97 \cdot Q_K \cdot T_{\text{Э}} - (Q_B \cdot K_{\text{СН}} \cdot T_B) / 24] / 1163,$$

где  $Q_K$  – тепловая мощность биогазового комплекса, кВт;

$T_{\text{Э}}$  – число часов работы энергетического оборудования в году; для предварительных расчетов принимается равным 8350 ч/год;

$K_{\text{СН}}$  – удельное потребление тепловой энергии на собственные нужды биогазового комплекса, кВт ч/м<sup>3</sup>; принимается равным 1,188 кВт·ч/м<sup>3</sup>;

$T_B$  – число часов работы биогазового комплекса в году, ч/год; для предварительных расчетов принимается равным 8760 ч/год.

Годовая выработка электроэнергии  $N$ , кВт·ч/год, определяется как

$$N = 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot Q_K \cdot Q_B \cdot T_{\text{Э}} / T_B.$$

Годовая экономия природного газа  $G_G$ , тыс. м<sup>3</sup>/год, рассчитывается следующим образом:

$$G_G = 7 (b_B \cdot Q + b_{\text{Э}} \cdot 0,001N) / Q_{\text{Г}}^H,$$

где  $b_B$  – удельный расход топлива на выработку 1 Гкал тепловой энергии на биогазовом комплексе, кг у. т./Гкал; для предварительных расчетов принимается равным 168 кг у. т./Гкал;

$b_{\text{Э}}$  – удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на замыкающей конденсационной электростанции, г у. т. / (кВт·ч); для предварительных расчетов принимается равным 312 г у. т. / (кВт·ч);

$Q_{\text{Г}}^H$  – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, ккал/м<sup>3</sup>; для предварительных расчетов принимается равной 8000 ккал/м<sup>3</sup>.

Приток денежных средств от системной экономии природного газа  $P_G$ , р./год, определяется по формуле

$$P_G = G_G \cdot C_G,$$

где  $C_G$  – стоимость природного газа, тыс. р./год; для предварительных расчетов принимается равной 488,89 р. за тыс. м<sup>3</sup> газа.

#### 4.2 Расчет агротехнических аспектов сбраживания биомассы.

Расчет увеличения урожайности производится только для объемов, неразделенных на жидкую и твердую фракции стоков.

Увеличение урожайности  $i$ -й сельскохозяйственной культуры  $\Delta U_{\text{УР}}^i$ , т/год, в натуральном выражении

$$\Delta U_{\text{УР}}^i = 0,001 \cdot U^i \cdot S^i \cdot \Delta u^i,$$

где  $U^i$  – первоначальная урожайность  $i$ -й культуры, ц/га;

$S^i$  – площадь, занятая  $i$ -й культурой, на которую вносились сброженные стоки, га/год;

$\Delta u^i$  – изменение урожайности  $i$ -й культуры, %; определяется по таблице 4.2.  
Прибыль от увеличения урожайности  $\Pi_{yp}$ , р./год, рассчитывается как

$$\Pi_{yp} = \sum \Delta U_{yp}^i \cdot C_K^i,$$

где  $U_{yp}^i$  – увеличение урожайности  $i$ -й сельскохозяйственной культуры в натуральном выражении, т/год;

$C_K^i$  – стоимость  $i$ -й сельскохозяйственной культуры, р./т; принимается 200 р./т для картофеля, 400 р./т для ячменя и 740 р./т для рапса.

Таблица 4.2 – Увеличение урожайности сельскохозяйственных культур при внесении сброженных стоков

| Сельскохозяйственная культура | Увеличение урожайности $\Delta u^i$ , % |
|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Картофель                     | 3,2                                     |
| Ячмень                        | 4,2                                     |
| Рапс яровой                   | 11,4                                    |

Сброженную биомассу, как правило, разделяют на жидкую и твердую фазы. Твердую фазу гранулируют и сушат для получения готового к продаже продукта – удобрений. Суточный объем образующейся твердой фракции  $G_{уд}$ , кг/сут, рассчитывается по формуле

$$G_{уд} = \frac{v_i \cdot k_c \cdot (1 - 0,01 \cdot W_c)}{100 \cdot (1 - 0,01 \cdot W_T)},$$

где  $v_i$  – объём  $i$ -го сырья, поступившего на переработку;

$W_T$  – влажность твердой фракции после разделения, %; для предварительных расчетов принимается равной 72 %;

$k_c$  – доля сброженной биомассы, поступающей на разделение, %;

$W_c$  – влажность свежей биомассы, поступающей на сбраживание, %.

$$W_c = \frac{\sum m_i \cdot n_i \cdot W_i}{V_{сум}},$$

где  $V_{сум}$  – суточный выход экскрементов от всех возрастных групп животных.

$$V_{сум} = \sum m_i \cdot n_i,$$

где  $n_i$  – количество голов в  $i$ -й половозрастной группе животных;

$m_i$  – суточная масса экскрементов от одной головы животных  $i$ -й половозрастной группы животных, кг/сут; определяется по таблице 4.1;

$W_i$  – влажность сырья от одной головы животных  $i$ -й половозрастной группы животных, %; определяется по таблице 4.1.

Приток денежных средств  $\Pi_{уд}$ , р./год, за счет продаж разделенной фракции в качестве удобрений, плодородных слоев почв и компостов рассчитывается по формуле

$$\Pi_{уд} = \frac{G_{уд} \cdot C_{уд} \cdot T}{24000},$$

где  $C_{уд}$  – стоимость твердой фракции, тыс. р./т; для предварительных расчетов принимается равной 0,52 р./кг удобрений;

$T$  – число часов работы технологического оборудования в году, ч/год; для предварительных расчетов принимается равным 8760 ч/год.

Приток денежных средств  $\Pi_x$ , р./год, за счет сокращения объемов вносимых пестицидов и гербицидов

$$\Pi_x = C_x \cdot \sum \frac{\Delta x^i}{100} \cdot S_i,$$

где  $C_x^i$  – первоначальная стоимость обработки химическими препаратами для  $i$ -й сельскохозяйственной культуры, р./га; для предварительных расчетов принимается равной 35 р./га;

$\Delta x^i$  – сокращение внесения химических препаратов для  $i$ -й сельскохозяйственной культуры, %; определяется по таблице 4.3;

$S_i$  – площадь земли под сельскохозяйственную культуру, на которую вносятся химические препараты, га/год.

Таблица 4.3 – Уменьшение объемов используемых препаратов после внесения сброженных стоков

| Сельскохозяйственная культура | Снижение внесения химических препаратов, % |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Зерновые культуры (ячмень)    | 7                                          |
| Многолетние травы (рапс)      | 2                                          |
| Картофель                     | 9                                          |

#### 4.3 Расчет экологических аспектов сбраживания биомассы.

Для предварительных расчетов снижение выбросов парниковых газов в атмосферный воздух  $\Delta G_{пг}$ , т/год, в пересчете на диоксид углерода может быть рассчитано по формуле

$$\Delta G_{пг} = \frac{Q_K}{500} \cdot 10500.$$

Приток денежных средств от продажи добровольных сокращений выбросов

парниковых газов  $П_{пг}$ , р./год, определяется по формуле

$$П_{пг} = \Delta G_{пг} \cdot C_{пг},$$

где  $C_{пг}$  – стоимость 1 т выбросов парниковых газов в пересчете на диоксид углерода, р./т; для предварительных расчетов принимается равной 30 р./т.

Приток денежных средств за счет сокращения объемов сбрасываемых стоков, снижения нагрузки на очистные сооружения  $П_o$ , р./год, рассчитывается по формуле

$$П_o = \frac{\Delta C_H \cdot T \cdot V_{сум}}{24000},$$

где  $\Delta C_H$  – снижение стоимости вносимой в качестве удобрений и не поступающей на очистные сооружения биомассы, р./год; для предварительных расчетов принимается равным 0,060 р./кг за сырье, поступающее на переработку;

$T$  – число часов работы технологического оборудования в году, ч/год; для предварительных расчетов принимается равным 8760 ч/год;

$V_{сум}$  – объем  $i$ -го сырья, поступающего на переработку, кг/сут.

#### 4.4 Экономическая эффективность внедрения биогазовой установки.

Критерием экономической эффективности биогазовой установки является соотношение

$$П_{г} + П_{пг} + П_{уд} + П_{ур} + П_{х} + П_o > E_n \cdot K + И,$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений,  $E_n = 0,12$ ;

$K$  – капиталовложения; для практической работы принимаются равными 100 тыс. р.;

$И$  – годовые эксплуатационные издержки; для предварительных расчетов могут быть определены как  $0,1K$ .

Итоговый экономический эффект от внедрения биогазовой установки

$$\mathcal{E} = \sum P_i - (E_n \cdot K + И),$$

где

$$\sum P_i = П_{г} + П_{пг} + П_{уд} + П_{ур} + П_{х} + П_o.$$

#### Практическое задание

Рассчитать энергетические, агротехнические и экологические эффекты от внедрения биогазовой установки по переработке отходов животноводческого комплекса. Определить, есть ли экономическая эффективность от внедрения

биогазовой установки на животноводческом комплексе. Исходные данные к задаче представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные данные к задаче

| Вариант | Количество особей половозрастных групп животных $n_i$ , шт. |            |          |                   | $k_c$ , % | $\eta_y$ , % | Первоначальная урожайность, ц/га |        |      | Площадь сельскохозяйственных угодий, га |        |      |
|---------|-------------------------------------------------------------|------------|----------|-------------------|-----------|--------------|----------------------------------|--------|------|-----------------------------------------|--------|------|
|         | Хряки                                                       | Свиноматки | Поросята | Свиньи на откорме |           |              | Картофель                        | Ячмень | Ряпс | Картофель                               | Ячмень | Ряпс |
| 1       | 1000                                                        | 2000       | 3180     | 3780              | 60        | 91           | 180                              | 43,7   | 12,3 | 30                                      | 10     | 35   |
| 2       | 900                                                         | 2200       | 3240     | 3900              | 75        | 92           | 182                              | 42,8   | 17,5 | 20                                      | 8      | 20   |
| 3       | 1100                                                        | 2300       | 2960     | 4050              | 70        | 90           | 193                              | 41,5   | 24   | 32                                      | 10     | 20   |
| 4       | 800                                                         | 1900       | 2880     | 4100              | 55        | 88           | 204                              | 40,7   | 14,8 | 25                                      | 5      | 51   |
| 5       | 850                                                         | 2150       | 2950     | 4200              | 50        | 93           | 202                              | 53,5   | 15,6 | 50                                      | 7      | 40   |
| 6       | 950                                                         | 2250       | 3050     | 4780              | 55        | 89           | 243                              | 52,1   | 23,4 | 50                                      | 5      | 40   |
| 7       | 1050                                                        | 2400       | 3300     | 4500              | 50        | 91           | 198                              | 51,9   | 22,9 | 50                                      | 8      | 50   |
| 8       | 750                                                         | 1950       | 2800     | 3759              | 65        | 92           | 212                              | 44,6   | 18,6 | 30                                      | 11     | 20   |
| 9       | 1000                                                        | 2000       | 3180     | 3780              | 60        | 90           | 264                              | 47,2   | 13,3 | 30                                      | 10     | 35   |
| 10      | 900                                                         | 2200       | 3240     | 3900              | 70        | 88           | 248                              | 50,7   | 16,7 | 30                                      | 8      | 20   |
| 11      | 1100                                                        | 2300       | 2960     | 4050              | 40        | 93           | 237                              | 49,4   | 12,8 | 60                                      | 24     | 40   |
| 12      | 800                                                         | 1900       | 2880     | 4100              | 60        | 89           | 223                              | 48,6   | 13,9 | 38                                      | 9      | 25   |
| 13      | 850                                                         | 2150       | 2950     | 4200              | 75        | 91           | 207                              | 52,1   | 14,3 | 20                                      | 8      | 20   |
| 14      | 950                                                         | 2250       | 3050     | 4780              | 55        | 92           | 209                              | 50,8   | 15,1 | 50                                      | 5      | 40   |
| 15      | 1050                                                        | 2400       | 3300     | 4500              | 50        | 90           | 213                              | 48,2   | 17,2 | 50                                      | 8      | 50   |

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что является сырьем для биогазовых установок?
- 2 За счет чего получился наибольший приток денежных средств в процессе внедрения биогазовой установки?
- 3 С чем связаны экологические аспекты от внедрения биогазовой установки?

## 5 Практическая работа № 5. Расчет эффективности типичных энергосберегающих мероприятий в производственных организациях

**Цель работы:** изучить методику оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в производственных организациях.

### *Теоретическая часть*

*5.1 Расчет экономии электроэнергии и срока окупаемости замены пневмотранспорта на механическую систему транспортировки.*

При замене пневматической системы транспортировки на механическую экономический эффект энергосбережения достигается за счет:

- снижения расхода электроэнергии на производственные нужды вследствие вывода из эксплуатации энергоемкого оборудования, обеспечивающего необходимое давление для системы пневмотранспорта;
- уменьшения эксплуатационных затрат.

Для проведения сравнительного анализа определяются годовые расходы электроэнергии электропотребляющим оборудованием пневматической  $\mathcal{E}_{\text{пн}}$ , кВт·ч/год, и механической  $\mathcal{E}_{\text{мех}}$ , кВт·ч/год, систем транспортировки отдельно по группам оборудования по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{пн}} = N_{\text{у}} \cdot K_{\text{и}} \cdot T_{\text{с}},$$

где  $N_{\text{у}}$  – суммарная установленная мощность группы электропотребляющего оборудования (насосы, компрессоры для пневмотранспорта, скребковые конвейеры, ковшовые элеваторы для механической системы), кВт;

$K_{\text{и}}$  – коэффициент использования электрической мощности для соответствующей группы электропотребляющего оборудования;

$T_{\text{с}}$  – годовое число часов использования средней нагрузки для соответствующей группы электропотребляющего оборудования.

$$\mathcal{E}_{\text{мех}} = N_{\text{у}} \cdot K_{\text{и}} \cdot T_{\text{с}}.$$

Экономия электроэнергии  $\Delta\mathcal{E}$ , кВт·ч/год, от внедрения мероприятия

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{пн}} - \mathcal{E}_{\text{мех}}.$$

Экономия топлива от замены пневмотранспорта на механическую систему транспортировки  $\Delta B$ , т у. т., с учетом потерь в электрических сетях на транспортировку электроэнергии до вводов токоприемников предприятия, а также экономия топлива от децентрализации компрессорного хозяйства рассчитываются по формуле

$$\Delta B = \Delta\mathcal{E} \cdot (1 + 0,01 \cdot k_{\text{ном}}) \cdot b_{\text{э}} \cdot 10^{-6},$$

где  $b_э$  – удельный расход топлива на отпуск электроэнергии; принимается равным 300,2 г у. т./(кВт·ч);

$k_{пот}$  – потери электроэнергии в электросетях (с учетом распределительных) в системе ГПО «Белэнерго»; принимают равными 11,3.

Для предварительных расчетов укрупненные капиталовложения  $K$ , р., можно рассчитать по формуле

$$K = 1,45 \cdot C_{об},$$

где  $C_{об}$  – стоимость оборудования, р.

Определение срока окупаемости  $T_{ок}$ , лет, производится по формуле

$$T_{ок} = \frac{K}{\Delta B \cdot C_{тут}},$$

где  $K$  – капиталовложения в мероприятие, р.;

$\Delta B$  – экономия топлива от внедрения мероприятия, т у. т.;

$C_{тут}$  – стоимость 1 т у. т., которая составляет на 2018 г. 220 долл. США/т или 440 р./т.

## 5.2 Расчет экономии электроэнергии и срока окупаемости от децентрализации компрессорного хозяйства.

При децентрализации компрессорных станций с переходом на локальное производство сжатого воздуха экономический эффект достигается за счет:

- снижения расхода электроэнергии на производственные нужды вследствие вывода из эксплуатации энергоемких поршневых компрессоров и отключения питающей подстанции;

- ликвидации протяженных магистральных линий подачи сжатого воздуха и исключения потерь при его транспортировке;

- разделения потребителей сжатого воздуха по уровням необходимого давления и поддержания его выработки на уровне фактически необходимой потребности;

- снижения расхода электроэнергии за счет отключения неэкономичной станции осушки воздуха и системы обратного водоснабжения;

- уменьшения эксплуатационных затрат: отсутствие необходимости диагностики и освидетельствования стационарных ресиверов, прекращения отопления и содержания здания центральной компрессорной.

Годовой расход электроэнергии при производстве сжатого воздуха централизованным способом  $\mathcal{E}_ц$ , кВт·ч/год, рассчитывается так же, как в п. 5.1.

Годовой расход электроэнергии  $\mathcal{E}_л$ , кВт·ч/год, при обеспечении потребности производства в сжатом воздухе посредством установки локальных (винтовых) компрессоров определяется по формуле

$$\mathcal{E}_л = n \cdot N_{y1} \cdot K_{u1} \cdot T_{c1},$$

где  $N_{y1}$  – установленная мощность электропотребляющего оборудования (насосы, компрессоры для пневмотранспорта, скребковые конвейеры, ковшовые элеваторы для механической системы), кВт;

$K_{u1}$  – коэффициент использования электрической мощности электропотребляющего оборудования;

$T_{c1}$  – годовое число часов использования средней нагрузки электропотребляющего оборудования.

Экономия электроэнергии  $\mathcal{E}_{mp}$ , кВт·ч/год, от снижения потерь при исключении магистральных трубопроводов подачи сжатого воздуха и от применения автоматической регулировки производительности новых компрессоров, которая составляет 12 %,

$$\mathcal{E}_{mp} = 0,12 \cdot \mathcal{E}_c.$$

Экономия электроэнергии  $\Delta\mathcal{E}$ , кВт·ч/год, от внедрения мероприятия

$$\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{mp} - \mathcal{E}_l.$$

Экономия топлива от децентрализации компрессорного хозяйства, размер укрупненных капиталовложений и срок окупаемости мероприятия рассчитываются так же, как в п. 5.1.

*5.3 Определение экономии теплоэнергии и топлива, срока окупаемости от внедрения теплоутилизаторов в системах механической приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования воздуха.*

Экономический эффект от внедрения теплоутилизаторов в системах механической приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования воздуха в первую очередь достигается в результате уменьшения расхода тепловой энергии на нагрев приточного воздуха, подаваемого в обслуживаемые помещения. Нагрев приточного воздуха в теплоутилизаторе происходит за счёт отвода теплоты от потока удаляемого воздуха к наружному приточному воздуху.

Количество сэкономленной тепловой энергии, полезно возвращаемой теплоутилизатором, складывается из потока явной теплоты, обусловленной температурой удаляемого воздуха, и потока скрытой теплоты, выделяющейся в пределах поверхности теплоутилизатора при конденсации содержащейся в удаляемом воздухе влаги.

Общее количество сэкономленной тепловой энергии  $\Delta Q$ , Гкал/ч, полезно возвращаемой теплоутилизатором в течение календарного года,

$$\Delta Q = 0,24 \cdot \varepsilon_{tot} \cdot (t_{cp,l} - t_{cp,ext}) \cdot c \cdot L_{cp,ext} \cdot z \cdot 10^{-6},$$

где  $\varepsilon_{tot}$  – тепловая эффективность теплоутилизатора по полной теплоте;

$t_{cp,l}$  – температура удаляемого воздуха, °С;

$t_{cp,ext}$  – температура наружного воздуха, °С;

$c$  – теплоёмкость воздуха, кДж/(м³·°С); в задаче принимают 1,3 кДж/(м³·°С);

$L_{cp,ext}$  – объёмный расход наружного приточного воздуха, м<sup>3</sup>/ч;

$z$  – число часов работы системы вентиляции с использованием теплоутилизатора в течение года.

При использовании теплоутилизатора возрастают потери давления в системе вентиляции по тракту приточного и удаляемого воздуха. Вызванные этим дополнительные затраты электрической энергии  $\Delta \mathcal{E}$ , кВт·ч, определяют по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \cdot \frac{L_{cp.in}}{3600 \cdot \eta_{в.у.}} \cdot 10^{-3} \cdot z,$$

где  $\Delta P$  – дополнительные суммарные потери давления в теплоутилизационной установке по тракту приточного и удаляемого воздуха, Па;

$L_{cp.in}$  – средний за время работы системы расход приточного воздуха, м<sup>3</sup>/ч;

$\eta_{в.у.}$  – КПД вентиляционной установки с приводом.

Экономия топлива  $\Delta B$ , т у. т., в результате внедрения энергосберегающего мероприятия

$$\Delta B = \Delta Q \cdot b_{мэ} - \Delta \mathcal{E} \cdot b_{э} \cdot (1 + 0,01 \cdot k_{ном}),$$

где  $b_{мэ}$  – удельный расход топлива на производство тепловой энергии на теплоисточнике, г у. т./Гкал;

$b_{э}$  – удельный расход топлива на отпуск электроэнергии принимается равным фактическому расходу топлива на замыкающей станции в энергосистеме (Лукомльской ГРЭС) за год, предшествующий составлению расчета, г у. т./(кВт·ч); в задаче принимается равным 300,2 г у. т./(кВт·ч);

$k_{ном}$  – потери электроэнергии в электросетях (с учетом распределительных) в системе ГПО «Белэнерго»; принимаются равными 11,3.

Расчёт укрупненных капиталовложений и срок окупаемости мероприятия производится так же, как в п. 5.1.

#### 5.4 Расчет экономии электроэнергии и срока окупаемости от внедрения когенерационной установки.

Для расчета экономии топлива при внедрении когенерационных установок необходимо знать затраты топлива на производство электрической и тепловой энергии на ней. Для этого следует рассчитать удельный и часовой расход топлива на производство электрической и тепловой энергии.

Удельный расход топлива  $b_{э}$ , г у. т./(кВт·ч), на производство электрической энергии

$$b_{э} = \frac{123}{\eta_{э}} \cdot 100,$$

где  $\eta_{э}$  – коэффициент полезного действия когенерационной установки по

конденсационному циклу, %.

Часовой расход условного топлива  $B_{\text{э}}$ , кг у. т./ч, на производство электроэнергии по конденсационному циклу

$$B_{\text{э}} = \frac{b_{\text{э}} \cdot N_{\text{уст}}}{1000},$$

где  $b_{\text{э}}$  – удельный расход топлива на производство электроэнергии по конденсационному циклу, г у. т./(кВт·ч);

$N_{\text{уст}}$  – установленная электрическая мощность когенерационной установки, кВт.

Для упрощения расчетов при сравнении затрат на выработку электроэнергии на электростанциях ГПО «Белэнерго» и затрат на комбинированную выработку электроэнергии на когенерационных установках удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии принимается на уровне удельного расхода топлива котельной, работающей на газе, и определяется расход топлива  $B_{\text{тэ}}$ , кг у. т./ч, на отпуск тепловой энергии:

$$B_{\text{тэ}} = b_{\text{тэ}} \cdot Q_{\text{уст}},$$

где  $Q_{\text{уст}}$  – установленная тепловая мощность принятой за аналог когенерационной установки, Гкал.

Годовой расход условного топлива на выработку электроэнергии  $B_{\text{ээ}}$ , кг у. т., на выбранной когенерационной установке по комбинированному циклу

$$B_{\text{ээ}} = (B_{\text{э}} - B_{\text{тэ}}) \cdot T_{\text{уст}}.$$

Электроэнергия, выработанная за год когенерационной установкой,  $\mathcal{E}_{\text{выр}}$ , кВт·ч,

$$\mathcal{E}_{\text{выр}} = N_{\text{уст}} \cdot T_{\text{уст}},$$

где  $N_{\text{уст}}$  – установленная мощность когенерационной установки, кВт;

$T_{\text{уст}}$  – число часов использования установленной мощности, ч.

Количество электроэнергии  $\mathcal{E}_{\text{отп}}^{\text{КГУ}}$ , кВт·ч, отпущенной когенерационной установкой,

$$\mathcal{E}_{\text{отп}}^{\text{КГУ}} = \mathcal{E}_{\text{выр}} \cdot (1 - \alpha_{\text{сн}}^{\text{ээ}}),$$

где  $\alpha_{\text{сн}}^{\text{ээ}}$  – коэффициент потребления электроэнергии на собственные нужды когенерационной установки (на пусковые устройства и другое электрическое оборудование), %.

Необходимое количество электроэнергии, отпущенной с шин электростанций ГПО «Белэнерго»,  $\mathcal{E}_{\text{отп}}^{\text{ЭС}}$ , кВт·ч, с учетом потерь в электрических сетях на

ее транспортировку до вводов токоприемников предприятия определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{omn}^{\mathcal{E}C} = \mathcal{E}_{omn}^{KGV} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta \mathcal{E}_{nom}}{100} \right),$$

где  $\mathcal{E}_{omn}^{KGV}$  – электроэнергия, отпущенная турбогенератором и потребленная предприятием, кВт·ч;

$\Delta \mathcal{E}_{nom}$  – коэффициент, учитывающий потери в электрических сетях, %.

Экономия топлива  $\Delta B^{KGV}$ , т у. т., при применении выбранной когенерационной установки

$$\Delta B^{KGV} = (\mathcal{E}_{omn}^{\mathcal{E}C} \cdot b_{\mathcal{E}\mathcal{E}}^{cp} - B_{\mathcal{E}\mathcal{E}}) \cdot 10^{-3},$$

где  $\mathcal{E}_{omn}^{\mathcal{E}C}$  – количество электроэнергии, отпущенной с шин электростанций ГПО «Белэнерго», с учетом потерь в электросетях на транспорт электроэнергии, кВт·ч;

$b_{\mathcal{E}\mathcal{E}}^{cp}$  – удельный расход топлива на отпуск электроэнергии принимается равным фактическому расходу топлива на замыкающей станции в энергосистеме (Лукомльской ГРЭС) за год, предшествующий составлению расчета, кг у. т./кВт·ч; в задаче принимается равным 0,3 кг у. т./кВт·ч;

$B_{\mathcal{E}\mathcal{E}}$  – годовой расход топлива на выработку электроэнергии выбранной когенерационной установкой, кг у. т.

Расчёт укрупненных капиталовложений и срок окупаемости мероприятия производится так же, как в п. 5.1.

### Практическое задание

1 Рассчитать экономию электроэнергии и срок окупаемости замены пневмотранспорта на механическую систему транспортировки на предприятии. Исходные данные к задаче приведены в таблице 5.1.

2 Рассчитать экономию электроэнергии и срок окупаемости от децентрализации компрессорного хозяйства. Исходные данные к задаче приведены в таблице 5.2.

3 Рассчитать экономию теплоэнергии и топлива, срок окупаемости от внедрения теплоутилизаторов в системах механической приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования воздуха на предприятии. Исходные данные к задаче приведены в таблице 5.3.

4 Рассчитать экономию электроэнергии и срок окупаемости от внедрения когенерационной установки. Исходные данные к задаче приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.1 – Исходные данные к задаче 1

| Вариант | Пневмооборудование |       |           | Оборудование механической транспортировки |       |           |               |
|---------|--------------------|-------|-----------|-------------------------------------------|-------|-----------|---------------|
|         | $N_y$ , кВт        | $K_u$ | $T_c$ , ч | $N_y$ , кВт                               | $K_u$ | $T_c$ , ч | $C_{об}$ , р. |
| 1       | 200                | 0,84  | 7300      | 160                                       | 0,84  | 7300      | 120800        |
| 2       | 160                | 0,75  | 5840      | 120                                       | 0,75  | 5840      | 158400        |
| 3       | 220                | 0,66  | 4380      | 180                                       | 0,66  | 4380      | 144800        |
| 4       | 180                | 0,8   | 6570      | 140                                       | 0,8   | 6570      | 178900        |
| 5       | 160                | 0,72  | 4380      | 120                                       | 0,72  | 4380      | 173700        |
| 6       | 180                | 0,84  | 7300      | 140                                       | 0,84  | 7300      | 212800        |
| 7       | 220                | 0,75  | 5840      | 180                                       | 0,75  | 5840      | 198400        |
| 8       | 160                | 0,66  | 4380      | 120                                       | 0,66  | 4380      | 104800        |
| 9       | 200                | 0,8   | 7300      | 160                                       | 0,8   | 7300      | 118900        |
| 10      | 200                | 0,72  | 7300      | 160                                       | 0,72  | 7300      | 123700        |
| 11      | 160                | 0,84  | 6570      | 120                                       | 0,84  | 6570      | 140800        |
| 12      | 220                | 0,75  | 5840      | 180                                       | 0,75  | 5840      | 188400        |
| 13      | 180                | 0,66  | 4380      | 140                                       | 0,66  | 4380      | 124800        |
| 14      | 160                | 0,8   | 4380      | 120                                       | 0,8   | 4380      | 178900        |
| 15      | 180                | 0,72  | 5840      | 140                                       | 0,72  | 5840      | 173700        |

Таблица 5.2 – Исходные данные к задаче 2

| Вариант | Пневмооборудование |       |           | Новое оборудование |                |          |              |               |
|---------|--------------------|-------|-----------|--------------------|----------------|----------|--------------|---------------|
|         | $N_y$ , кВт        | $K_u$ | $T_c$ , ч | $n$                | $N_{y1}$ , кВт | $K_{u1}$ | $T_{c1}$ , ч | $C_{об}$ , р. |
| 1       | 200                | 0,84  | 7300      | 4                  | 70             | 0,66     | 7300         | 15500         |
| 2       | 160                | 0,75  | 5840      | 3                  | 60             | 0,71     | 5840         | 15840         |
| 3       | 220                | 0,66  | 4380      | 5                  | 50             | 0,64     | 4380         | 14800         |
| 4       | 180                | 0,8   | 6570      | 3                  | 60             | 0,84     | 6570         | 38900         |
| 5       | 160                | 0,72  | 4380      | 4                  | 40             | 0,75     | 4380         | 13370         |
| 6       | 180                | 0,84  | 7300      | 4                  | 60             | 0,66     | 7300         | 45500         |
| 7       | 220                | 0,75  | 5840      | 3                  | 60             | 0,8      | 5840         | 158400        |
| 8       | 160                | 0,66  | 4380      | 4                  | 40             | 0,72     | 4380         | 14800         |
| 9       | 200                | 0,8   | 7300      | 4                  | 65             | 0,66     | 7300         | 38900         |
| 10      | 200                | 0,72  | 7300      | 4                  | 50             | 0,75     | 7300         | 13370         |
| 11      | 160                | 0,84  | 6570      | 3                  | 70             | 0,71     | 6570         | 12500         |
| 12      | 220                | 0,75  | 5840      | 3                  | 70             | 0,8      | 5840         | 15840         |
| 13      | 180                | 0,66  | 4380      | 4                  | 45             | 0,72     | 4380         | 14800         |
| 14      | 160                | 0,8   | 4380      | 3                  | 70             | 0,66     | 4380         | 18900         |
| 15      | 180                | 0,72  | 5840      | 3                  | 60             | 0,75     | 5840         | 13370         |

Таблица 5.3 – Исходные данные к задаче 3

| Вариант | $\varepsilon_{tot}$ | $t_{cp,l}, ^\circ\text{C}$ | $t_{cp,ext}, ^\circ\text{C}$ | $L_{cp,ext}, \text{м}^3/\text{ч}$ | $z, \text{ч}$ | $\Delta P, \text{Па}$ | $b_{mэ},$<br>$\text{г у.т./Гкал}$ | $\eta_{в.у}$ | $L_{cp.in}, \text{м}^3/\text{ч}$ | $C_{об}, \text{р.}$ |
|---------|---------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------|
| 1       | 0,5                 | 24                         | 5,5                          | 300                               | 8760          | 300                   | 168,1                             | 0,85         | 2                                | 1120800             |
| 2       | 0,45                | 23                         | 7,1                          | 280                               | 7200          | 250                   | 169,21                            | 0,9          | 1                                | 1158400             |
| 3       | 0,65                | 20                         | 6,2                          | 400                               | 7920          | 350                   | 164,75                            | 0,8          | 3                                | 1144800             |
| 4       | 0,7                 | 18                         | 6,8                          | 320                               | 8760          | 400                   | 166,87                            | 0,75         | 1                                | 1178900             |
| 5       | 0,85                | 21                         | 5,8                          | 380                               | 7200          | 300                   | 162,78                            | 0,85         | 5                                | 1173700             |
| 6       | 0,55                | 19                         | 5,5                          | 340                               | 7920          | 250                   | 165,45                            | 0,9          | 2                                | 1212800             |
| 7       | 0,6                 | 22                         | 7,1                          | 360                               | 8760          | 350                   | 168,04                            | 0,8          | 3                                | 1198400             |
| 8       | 0,75                | 24                         | 6,2                          | 300                               | 7200          | 400                   | 169,16                            | 0,75         | 3                                | 1104800             |
| 9       | 0,8                 | 23                         | 6,8                          | 280                               | 7920          | 300                   | 164,8                             | 0,85         | 4                                | 1118900             |
| 10      | 0,5                 | 20                         | 5,8                          | 400                               | 8760          | 250                   | 166,93                            | 0,9          | 3                                | 1123700             |
| 11      | 0,45                | 18                         | 5,5                          | 320                               | 7200          | 350                   | 162,73                            | 0,8          | 1                                | 1140800             |
| 12      | 0,65                | 21                         | 7,1                          | 380                               | 7920          | 400                   | 165,4                             | 0,75         | 2                                | 1188400             |
| 13      | 0,7                 | 19                         | 6,2                          | 340                               | 8760          | 300                   | 168,1                             | 0,85         | 3                                | 1124800             |
| 14      | 0,85                | 22                         | 6,8                          | 360                               | 7200          | 250                   | 169,21                            | 0,9          | 7                                | 1178900             |
| 15      | 0,55                | 24                         | 5,8                          | 300                               | 7920          | 350                   | 164,75                            | 0,8          | 2                                | 1173700             |

Таблица 5.4 – Исходные данные к задаче 4

| Вариант | $\eta_{э}, \%$ | $N_{уст}, \text{кВт}$ | $Q_{уст}, \text{Гкал}$ | $b_{mэ}, \text{нм}^3/\text{ч}$ | $T_{уст}, \text{ч}$ | $\alpha_{сн}^{ээ}, \%$ | $\Delta \mathcal{E}_{ном}, \%$ | $C_{об}, \text{р.}$ |
|---------|----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 1       | 36             | 300                   | 36,4                   | 2,3                            | 8760                | 0,8                    | 12                             | 45500               |
| 2       | 37             | 199                   | 22,6                   | 2,2                            | 7200                | 0,6                    | 11                             | 158400              |
| 3       | 36             | 238                   | 31,2                   | 2,4                            | 7920                | 0,9                    | 14                             | 44800               |
| 4       | 34             | 179                   | 25,6                   | 2,1                            | 8760                | 0,8                    | 15                             | 38900               |
| 5       | 38             | 401                   | 47,2                   | 2,5                            | 7200                | 0,85                   | 13                             | 133700              |
| 6       | 36             | 300                   | 36,4                   | 2,3                            | 7920                | 0,8                    | 12                             | 45500               |
| 7       | 37             | 199                   | 22,6                   | 2,2                            | 8760                | 0,6                    | 11                             | 158400              |
| 8       | 36             | 238                   | 31,2                   | 2,4                            | 7200                | 0,9                    | 14                             | 44800               |
| 9       | 34             | 179                   | 25,6                   | 2,1                            | 7920                | 0,8                    | 15                             | 38900               |
| 10      | 38             | 401                   | 47,2                   | 2,5                            | 8760                | 0,85                   | 13                             | 133700              |
| 11      | 36             | 300                   | 36,4                   | 2,3                            | 7200                | 0,8                    | 12                             | 45500               |
| 12      | 37             | 199                   | 22,6                   | 2,2                            | 7920                | 0,6                    | 11                             | 158400              |
| 13      | 36             | 238                   | 31,2                   | 2,4                            | 8760                | 0,9                    | 14                             | 44800               |
| 14      | 34             | 179                   | 25,6                   | 2,1                            | 7200                | 0,8                    | 15                             | 38900               |
| 15      | 38             | 401                   | 47,2                   | 2,5                            | 7920                | 0,85                   | 13                             | 133700              |

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие энергосберегающие мероприятия можно реализовать на предприятии?
- 2 Какие энергосберегающие мероприятия имеют самый короткий срок окупаемости?
- 3 За счет каких показателей можно сократить срок окупаемости?

## **6 Практическая работа № 6. Оценка снижения выбросов парниковых газов в результате осуществления энергосберегающих мероприятий**

**Цель работы:** изучить методику оценки снижения выбросов парниковых газов в результате осуществления энергосберегающих мероприятий в ЖКХ.

### **Теоретическая часть**

*6.1 Определение экономии топлива и теплоты за счёт термореновации ограждающих конструкций зданий.*

Экономический эффект от термореновации ограждающих конструкций зданий достигается за счет увеличения термосопротивления ограждающих конструкций и уменьшения тепловых потерь.

Годовая экономия тепловой энергии  $\Delta Q$ , Гкал, за счет снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции

$$\Delta Q = F_{СТ} \cdot (t_{вн} - t_{н}) \cdot \left( \frac{1}{R_{Тфакт}} - \frac{1}{R_{Тдост}} \right) \cdot T_{от} \cdot 24 \cdot n \cdot 0,86 \cdot 10^{-6},$$

где  $F_{СТ}$  – площадь ограждающих конструкций, подвергнутых термореновации, м<sup>2</sup>;

$t_{вн}, t_{н}$  – температура воздуха внутри помещения и снаружи соответственно, °С;

$R_{Тфакт}, R_{Тдост}$  – фактическое и достигнутое термосопротивления ограждающих конструкций здания до выполнения и после выполнения мероприятия, м<sup>2</sup>·°С/Вт;

$R_{Тдост}$  – для ограждающих конструкций представляет собой сумму термосопротивлений для материала ограждающих конструкций и материала теплоизоляции;

$T_{от}$  – продолжительность отопительного периода, сут;

24 – число часов в сутках, ч;

$n$  – поправочный коэффициент на разность температур; принимается по климатологическим данным для региона, где внедряется мероприятие.

Термосопротивление  $R_T$ , м<sup>2</sup>·°С/Вт, ограждающих конструкций

$$R_T = \frac{d}{l},$$

где  $d$  – толщина материала ограждающих конструкций, м;

$l$  – коэффициент теплопроводности материала ограждающих конструкций и материала теплоизоляции.

Снижение потребления электроэнергии на теплоисточнике  $\Delta \mathcal{E}$ , кВт · ч, на производство тепловой энергии

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{сн}} \cdot \Delta Q,$$

где  $\mathcal{E}_{\text{сн}}$  – удельный расход электроэнергии на производство и транспорт тепловой энергии для теплоисточника, кВт·ч/Гкал;

$\Delta Q$  – годовое снижение тепловых потерь через ограждающие конструкции (экономия тепловой энергии), Гкал.

Экономия топлива  $\Delta B_{\mathcal{E}}$ , т у. т., на источнике электроснабжения

$$\Delta B_{\mathcal{E}} = \Delta \mathcal{E} \cdot (1 + 0,01 \cdot k_{\text{ном}}^{\mathcal{E}}) \cdot b_{\mathcal{E}} \cdot 10^{-6},$$

где  $\Delta \mathcal{E}$  – снижение потребления электроэнергии на теплоисточнике на производство тепловой энергии, кВт·ч;

$k_{\text{ном}}^{\mathcal{E}}$  – коэффициент потерь электроэнергии в электросетях; принимается равным 11,3;

$b_{\mathcal{E}}$  – удельный расход топлива на отпуск электроэнергии принимается равным фактическому расходу топлива на замыкающей станции в энергосистеме (Лукомльской ГРЭС) за год, предшествующий составлению расчета, г у.т./(кВт·ч); принимается равным 300,2 г у.т./(кВт·ч).

Экономия топлива  $\Delta B_{T\mathcal{E}}$ , т у. т., от снижения потребления тепловой энергии

$$\Delta B_{T\mathcal{E}} = \Delta Q \cdot (1 + 0,01 \cdot k_{\text{ном}}) \cdot b_{T\mathcal{E}} \cdot 10^{-3},$$

где  $\Delta Q$  – годовое снижение тепловых потерь через ограждающие конструкции (экономии тепловой энергии), Гкал;

$b_{T\mathcal{E}}$  – удельный расход топлива на производство тепловой энергии на теплоисточнике, кг у. т./Гкал; в целях соблюдения сопоставимости в расчётах средний удельный расход принимается равным коэффициенту пересчёта тепловой энергии в условное топливо 175 кг у. т./Гкал;

$k_{\text{ном}}$  – коэффициент потерь в существующих тепловых сетях.

Суммарная экономия топлива

$$\Delta B = \Delta B_{\mathcal{E}} + \Delta B_{T\mathcal{E}}.$$

*6.2 Расчёт уменьшения выбросов парниковых газов в результате термореновации ограждающих конструкций зданий.*

Потребление (расход) топлива  $E^{\text{те}}$ , ГДж/год, в общих энергетических единицах при переводе тепловой энергии

$$E^{\text{те}} = 4,187 \cdot \Delta B,$$

Выбросы диоксида углерода  $M_{CO_2}$ , т/год, определяются как

$$M_{CO_2} = E^{te} \cdot K_{CO_2},$$

где  $K_{CO_2}$  – коэффициент выбросов диоксида углерода для данного типа топлива, т/ГДж; принимается равным 0,072.

Выбросы метана  $M_{CH_4}$ , т/год, рассчитываются как

$$M_{CH_4} = 10^{-3} \cdot E^{te} \cdot q_{CH_4},$$

где  $q_{CH_4}$  – удельный выброс метана, кг/ГДж; принимается равным 0,1.

Выбросы закиси азота  $M_{N_2O}$ , т/год, определяются следующим образом:

$$M_{N_2O} = 10^{-3} \cdot E^{te} \cdot q_{N_2O},$$

где  $q_{N_2O}$  – удельный выброс закиси азота, кг/ГДж; принимается равным 0,0006.

Сокращение выбросов парниковых газов  $P_{GHG}^{PT}$ , т/год, в эквиваленте  $CO_2$  в результате термореновации

$$P_{GHG}^{PT} = M_{CO_2} + 21 \cdot M_{CH_4} + 310 \cdot M_{N_2O},$$

где  $M_{CO_2}$  – выбросы диоксида углерода, т/год;

$M_{CH_4}$  – выбросы метана, т/год;

$M_{N_2O}$  – выбросы закиси азота, т/год.

### 6.3 Определение экономии топлива и теплоты за счёт внедрения энергоэффективных оконных блоков из ПВХ.

Экономический эффект от внедрения оконных блоков из ПВХ достигается за счет:

- увеличения термосопротивления оконных блоков и уменьшения расхода тепловой энергии на компенсацию потерь тепла;
- увеличения коэффициента воздухопроницаемости и уменьшения расхода тепловой энергии на нагревание наружного воздуха, поступающего путем инфильтрации через щели оконных проемов;
- увеличения срока службы и отсутствия эксплуатационных затрат (оклейка, покраска).

Годовой расход тепловой энергии  $Q_{OT}$ , Гкал, на компенсацию потерь тепла через ограждающие конструкции оконных проемов рассчитывается по формуле

$$Q_{OT} = \frac{F_o}{R_T} \cdot (t_{вн} - t_{н}) \cdot n \cdot T_{OT} \cdot 24 \cdot 10^{-6},$$

где  $F_o$  – площадь оконных проемов, м<sup>2</sup>;

$R_T$  – сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций оконных

проемов,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{ч/ккал}$ ;

$t_{\text{вн}}, t_{\text{н}}$  – расчетные температуры воздуха внутри помещения и наружного воздуха,  $^\circ\text{С}$ ;

$n$  – коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху;

$T_{\text{от}}$  – длительность отопительного периода, сут.

Годовой расход теплоэнергии  $Q_{\text{зам}}$ , Гкал, на компенсацию потерь тепла через ограждающие конструкции оконных проемов, предлагаемые в качестве замены,

$$Q_{\text{зам}} = \frac{F_o}{R_{\text{дост}}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}) \cdot n \cdot T_{\text{от}} \cdot 24 \cdot 10^{-6},$$

где  $R_{\text{дост}}$  – сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций оконных проемов,  $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{ч/ккал}$ .

Годовая экономия тепловой энергии  $\Delta Q$ , Гкал, от внедрения энергоэффективных оконных блоков из ПВХ

$$\Delta Q = Q_{\text{от}} - Q_{\text{зам}},$$

где  $Q_{\text{от}}$  – годовой расход теплоэнергии на компенсацию потерь тепла через существующие ограждающие конструкции оконных проемов, подлежащие замене, Гкал;

$Q_{\text{зам}}$  – годовой расход теплоэнергии на компенсацию потерь тепла через ограждающие конструкции оконных проемов, предлагаемые в качестве замены, Гкал.

Определение экономии топлива от снижения потребления тепловой энергии производится так же, как в п. 6.1.

*6.4 Расчёт уменьшения выбросов парниковых газов в результате замены оконных проемов зданий.*

Потребление (расход) топлива  $E^{te}$ , ГДж/год, в общих энергетических единицах при переводе тепловой энергии

$$E^{te} = 4,187 \cdot \Delta B_{TЭ}.$$

Далее расчеты производятся так же, как в п. 6.2.

### **Практическое задание**

Рассчитать снижение выбросов парниковых газов в результате проведения термореновации ограждающих конструкций жилого здания и замены оконных рам. Исходные данные к задаче приведены в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – Исходные данные для расчетов

| Вариант | Параметры здания |                   |                   | Процент остекления | Параметры стен       |               | Параметры утепления  |            | $R_m$ ,<br>м <sup>2</sup> ·°C/Вт | $R_{доп}$ ,<br>м <sup>2</sup> ·°C/Вт |
|---------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------|----------------------|------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|         | Длина<br>$L$ , м | Высота<br>$H$ , м | Ширина<br>$B$ , м |                    | $l_1$ ,<br>Вт/(м·°C) | $d_1$ ,<br>см | $l_2$ ,<br>Вт/(м·°C) | $d_2$ , см |                                  |                                      |
| 1       | 60               | 36                | 8                 | 18                 | 0,21                 | 40            | 0,06                 | 5          | 0,40                             | 0,76                                 |
| 2       | 80               | 40                | 10                | 20                 | 0,11                 | 30            | 0,07                 | 6          | 0,44                             | 0,68                                 |
| 3       | 40               | 20                | 12                | 19                 | 0,52                 | 35            | 0,05                 | 7          | 0,34                             | 0,66                                 |
| 4       | 100              | 24                | 10                | 21                 | 0,21                 | 40            | 0,06                 | 5          | 0,38                             | 0,78                                 |
| 5       | 120              | 48                | 8                 | 22                 | 0,11                 | 30            | 0,07                 | 6          | 0,36                             | 0,82                                 |
| 6       | 80               | 48                | 12                | 19                 | 0,52                 | 35            | 0,05                 | 7          | 0,42                             | 0,70                                 |
| 7       | 80               | 36                | 12                | 20                 | 0,21                 | 40            | 0,06                 | 5          | 0,40                             | 0,74                                 |
| 8       | 60               | 40                | 10                | 18                 | 0,11                 | 30            | 0,07                 | 6          | 0,44                             | 0,84                                 |
| 9       | 100              | 20                | 8                 | 22                 | 0,52                 | 35            | 0,05                 | 7          | 0,34                             | 0,76                                 |
| 10      | 120              | 24                | 8                 | 21                 | 0,21                 | 40            | 0,06                 | 5          | 0,38                             | 0,68                                 |
| 11      | 40               | 48                | 10                | 18                 | 0,11                 | 30            | 0,07                 | 6          | 0,36                             | 0,66                                 |
| 12      | 60               | 64                | 12                | 19                 | 0,52                 | 35            | 0,05                 | 7          | 0,42                             | 0,78                                 |
| 13      | 100              | 36                | 10                | 20                 | 0,21                 | 40            | 0,06                 | 5          | 0,40                             | 0,82                                 |
| 14      | 120              | 40                | 12                | 21                 | 0,11                 | 30            | 0,07                 | 6          | 0,44                             | 0,70                                 |
| 15      | 80               | 20                | 8                 | 22                 | 0,52                 | 35            | 0,05                 | 7          | 0,34                             | 0,74                                 |

Таблица 6.2 – Исходные данные для расчетов

| Вариант | $T_{от}$ ,<br>сут | $t_{вн}$ ,<br>°C | $t_n$ ,<br>°C | $t_{ср о}$ ,<br>°C | $t_p$ ,<br>°C | $n$  | $\mathcal{E}_{сн}$ ,<br>кВт·ч/<br>Гкал | $k_{пот}$ ,<br>% | $q_o$ ,<br>ккал/<br>(ч·м <sup>2</sup> ) | $Q_{св}$ ,<br>ккал/ч |
|---------|-------------------|------------------|---------------|--------------------|---------------|------|----------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| 1       | 204               | 20               | -5,6          | 0,2                | -21           | 0,67 | 1040                                   | 9,55             | 81,69                                   | 51840                |
| 2       | 200               | 18               | -3,2          | -2,0               | -25           | 0,92 | 1250                                   | 10,16            | 87,7                                    | 64020                |
| 3       | 202               | 20               | -6,7          | -1,6               | -22           | 1,20 | 1140                                   | 11,68            | 55,89                                   | 56126                |
| 4       | 206               | 22               | -4,8          | -0,5               | -24           | 0,98 | 1090                                   | 9,87             | 60,19                                   | 58680                |
| 5       | 200               | 21               | -3,7          | -1,9               | -23           | 1,07 | 1060                                   | 9,31             | 127,3                                   | 61240                |
| 6       | 204               | 18               | -7,8          | 0,2                | -21           | 0,76 | 1050                                   | 9,55             | 81,69                                   | 52360                |
| 7       | 206               | 20               | -5,9          | -2,0               | -25           | 0,84 | 1200                                   | 10,16            | 87,7                                    | 63440                |
| 8       | 202               | 22               | -6,3          | -1,6               | -22           | 1,11 | 1250                                   | 11,68            | 55,89                                   | 62123                |
| 9       | 200               | 19               | -7,4          | -0,5               | -24           | 0,88 | 1040                                   | 9,87             | 60,19                                   | 54320                |
| 10      | 204               | 21               | -3,5          | -1,9               | -23           | 0,99 | 1250                                   | 9,31             | 127,3                                   | 55111                |

### Контрольные вопросы

- 1 Какие парниковые газы вносят наибольший эффект в изменение климата?
- 2 За счет чего снижаются выбросы парниковых газов при термореновации зданий?

3 За счет чего достигается экономический эффект от внедрения оконных блоков из ПВХ?

## **7 Практическая работа № 7. Решение задач оптимизации для рационального использования ресурсов**

**Цель работы:** ознакомиться с методами решения задач оптимизации для рационального использования ресурсов.

### ***Теоретическая часть***

Задачи оптимизации используют для расчёта параметров, которые позволяют максимально приблизиться к поставленной цели. Например, получить наибольшую прибыль при производстве и реализации товаров, исходя из имеющихся ресурсов. При этом нужно определить, какой из ресурсов является лимитирующим, т. е. ограничивает производство товаров и получение прибыли. Методы решения таких задач используют при решении так называемых «транспортных задач», то есть при определении оптимального маршрута при доставке грузов со складов в магазины или от поставщиков на склад. Их можно применять для расчёта коэффициентов уравнений аппроксимирующих кривых при анализе экспериментальных данных.

Особенность задач оптимизации – это наличие целевой функции. Целевая функция – это уравнение, выражающее достигаемую цель.

Кроме того, в этих задачах указывают ограничения. Например, количество товара не может быть отрицательным, Если оно измеряется «в штуках», то оно должно быть целым числом.

Пример решения задачи оптимизации графическим способом.

Условие задачи.

Две кормовые культуры (вика и овес) потребляют три вида ресурсов (N, P, K). Для производства 1 ц биомассы клевера необходимо 1 кг N, 2 кг P, 5 кг K. Для производства 1 ц зерна овса – 4 кг N, 1 кг P, 3 кг K. 1 ц биомассы клевера имеет пищевую ценность 30 к. е. 1 ц зерна овса – 100 к. е. В почве хозяйства на одном гектаре содержится 45 кг доступного растениям азота, 25 кг доступного фосфора и 70 кг доступного калия. Определить оптимальное количество клевера и овса при посеве вико-овсяной кормовой смеси.

### ***Решение***

1 Выберем ось X для представления количества биомассы клевера и ось Y для представления количества овса. Обозначим количество клевера как  $x$ , количество овса как  $y$ .

2 Определим условия ограничений.

2.1 Количество биомассы клевера не может быть меньше нуля. Выделим область, не удовлетворяющую условию (рисунок 7.1, а).

2.2 Количество зерна овса также не меньше нуля (рисунок 7.1, б).

2.3 Количество азота в почве 45 ц/га. Запишем формулу ограничения по азоту

$$1x + 4y \leq 45.$$

Формула линии, отсекающей зону, не удовлетворяющую условию,

$$y = (45 - x)/4.$$

2.4 Проведем на графике эту линию и выделим область, не удовлетворяющую условию (рисунок 7.1, в).

2.5 Аналогично выделим области, не удовлетворяющие ограничению по фосфору и калию (рисунок 7.1, з).

3 Определим целевую функцию (максимально возможное производство кормовых единиц):

$$30x + 100y \rightarrow \max.$$

4 Примем любое произвольное значение целевой функции, например 10:

$$30x + 100y = 10.$$

5 Проведем на графике прямую, соответствующую этому уравнению (рисунок 7.1, д).

6 Произвольно увеличим значение целевой функции, например 100.

При этом получим прямую, параллельную первой, но сдвинутую вправо (рисунок 7.1, е)

$$30x + 100y = 100.$$

7 Продолжим сдвигать прямую вправо, сохраняя ее параллельность исходной прямой, до тех пор, пока она не коснется последней точки, еще принадлежащей к области, удовлетворяющей условиям ограничений (рисунок 7.1, ж).

Эта точка соответствует максимальному, возможному при данных ограничениях, значению целевой функции. Ее координаты  $x$  и  $y$  являются ответом данной задачи. Так как эта точка принадлежит одновременно двум пересекающимся линиям, решение системы уравнений этих линий позволит определить координаты точки и, соответственно, оптимальное количество производства каждой культуры.

Графический способ очень нагляден, но для решения сложных задач он не годится. Существует большое количество методов решения задач оптимизации и, в частности, транспортных задач.

### Практическое задание

1 Решить задачу оптимизации в программе Microsoft Excel.

Условия задачи.

1 Предприятие планирует выпускать автомобили, компьютеры, стиральные машины, телевизоры, холодильники. Для изготовления 1 единицы товара требуются ресурсы, указанные в таблице 7.1.

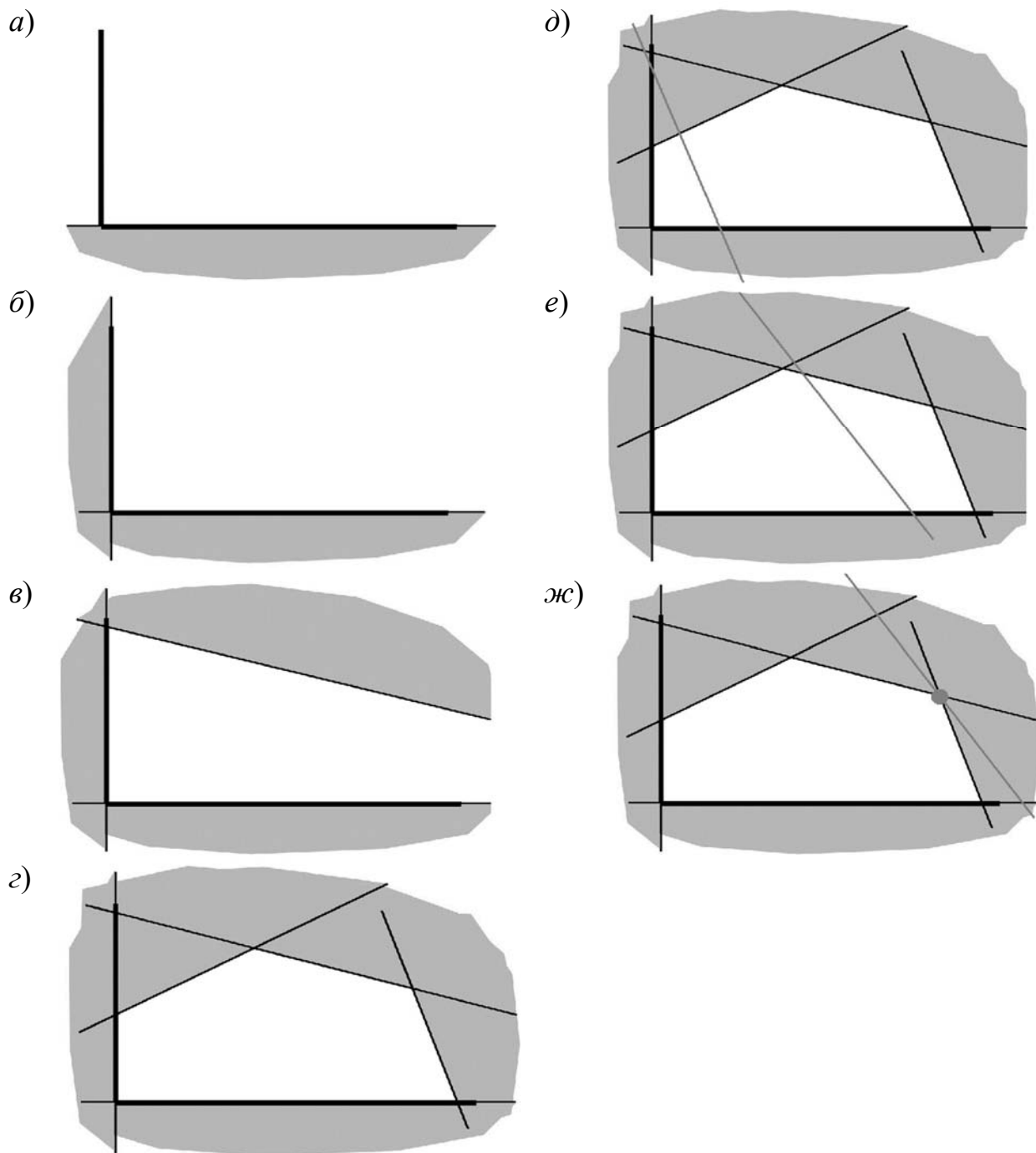


Рисунок 7.1 – Решение задач оптимизации графическим способом

Таблица 7.1 – Ресурсы, необходимые для производства 1 единицы товара, условных единиц измерения

| Ресурс | Автомобиль | Компьютер | Стиральная машин | Телевизор | Холодильник |
|--------|------------|-----------|------------------|-----------|-------------|
| № 1    | 3          | 0         | 1                | 0         | 2           |
| № 2    | 8          | 4         | 0                | 4         | 6           |
| № 3    | 1          | 3         | 1                | 2         | 2           |
| № 4    | 0          | 1         | 0                | 1         | 0           |
| № 5    | 2          | 10        | 3                | 8         | 3           |

При изготовлении 1 единицы товара в атмосферу выбрасываются вредные вещества:

- изготовление автомобилей – 5 кг;
- изготовление компьютеров – 3 кг;
- изготовление стиральных машин – 4 кг;
- изготовление телевизоров – 4 кг;
- изготовление холодильников – 10 кг.

Завод располагает следующими ресурсами:

- ресурс № 1 – 150;
- ресурс № 2 – 240;
- ресурс № 3 – 180;
- ресурс № 4 – 28;
- ресурс № 5 – 330.

Заводу разрешено выбрасывать 500 кг вредных веществ за производственный цикл.

Цена товара (у. е.):

- автомобили – 25;
- компьютеры – 20;
- стиральные машины – 13;
- телевизоры – 12;
- холодильники – 18.

### Решение

1 Откройте Excel.

2 В ячейки C1–G1 вместо названий установите начальные значения количества производимого товара – 0. При решении задачи программа заменит эти значения на оптимальное количество товаров.

3 В ячейки A2–A7 вместо названий запишите количество ресурсов, имеющихся на предприятии, и количество разрешённых выбросов (рисунок 7.2).

|   | A        | B | C          | D          | E                 | F          | G            | H |
|---|----------|---|------------|------------|-------------------|------------|--------------|---|
| 1 |          |   | Автомобили | Компьютеры | Стиральные машины | Телевизоры | Холодильники |   |
| 2 | 1 ресурс |   |            |            |                   |            |              |   |
| 3 | 2 ресурс |   |            |            |                   |            |              |   |
| 4 | 3 ресурс |   |            |            |                   |            |              |   |
| 5 | 4 ресурс |   |            |            |                   |            |              |   |
| 6 | 5 ресурс |   |            |            |                   |            |              |   |
| 7 | Выбросы  |   |            |            |                   |            |              |   |
| 8 |          |   |            |            |                   |            |              |   |

Рисунок 7.2 – Внесение данных в таблицу

4 В ячейки C2–G7 запишите количество ресурсов, необходимых для производства каждого товара.

5 В ячейку B2 запишите формулу для расчета общего расхода первого ресурса при производстве всех товаров (формула ограничения по первому

ресурсу):  $=\$C\$1*C2+\$D\$1*D2+\$E\$1*E2+\$F\$1*F2+\$G\$1*G2$ .

При протаскивании формулы количество каждого ресурса будет меняться, поэтому ссылка C2 должна быть на относительный адрес ячейки, а количество товара будет неизменным, поэтому ссылка на абсолютный адрес – \$C\$1 и т. д..

6 Нажмите Enter, вернитесь в ячейку B2 и протащите формулу за черный крестик в нижнем правом углу до ячейки B7. В ячейках C1–G1, где записано количество товара, пока стоят нули, поэтому в ячейках B2–B7 тоже будут выставлены нули до тех пор, пока программа не подберет оптимальное количество товаров.

7 Выделите ячейку H1. Запишите формулу целевой функции – цена товара умноженная на его количество:  $= 25 * C1 + 20 * D1$  ... и т. д.

Нажмите Enter и вернитесь в H1.

8 В меню «Сервис» найдите опцию «Поиск решения» (рисунок 7.3). Если ее нет, нажмите опцию «Настройки» и в открывшемся диалоговом окне установите флажок на опции «Поиск решения», затем снова откройте «Сервис» и вызовите эту опцию.

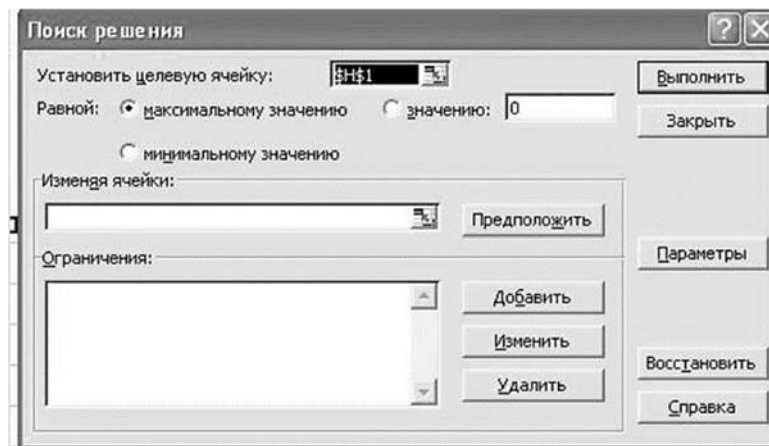


Рисунок 7.3 – Диалоговое окно «Поиск решения»

9 Целевая ячейка в диалоговом окне уже установлена, по умолчанию, поскольку эта ячейка выделена. Предлагается найти ее максимальное значение, что соответствует условиям задачи. В строке «Изменяя ячейки» установим ссылку на ячейки, в которых должно быть записано количество товара, – C1:G1.

10 Добавьте систему ограничений. Для этого нажмите кнопку «Добавить». Откроется новое диалоговое окно «Добавление ограничения» (рисунок 7.4).

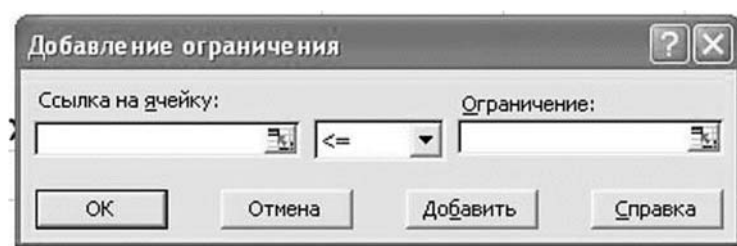


Рисунок 7.4 – Диалоговое окно «Добавление ограничения»

В строке «Ссылка на ячейку» укажите адрес ячеек, в которых содержатся формулы расчета потребности в ресурсах, – В2:В7. Во второй строке по умолчанию выставлен знак  $\leq$ . Это соответствует условию задачи. В третьем окне укажите адрес ячеек, в которых перечислено количество имеющихся на предприятии ресурсов, – А2:А7. Нажмите ОК и ограничение будет добавлено в основное диалоговое окно.

11 Таким же образом добавьте еще два ограничения:

- C1:G1  $\geq$  0;
- C1:G1 цел целое.

12 Нажмите «Выполнить». Программа выставит в ячейках C1:G1 оптимальные количества товара, в H1 – размер максимально возможной выручки, в ячейках В2–В7 – количество израсходованных ресурсов и количество выбросов. Определите, какие ресурсы оказались лимитирующими.

13 Придумайте и решите задачу оптимизации со своими параметрами.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Для чего применяют задачи оптимизации?
- 2 Что такое целевая функция?
- 3 Для чего нужны ограничения?
- 4 Какие значения может принимать целевая функция?

## **8 Практическая работа № 8. Определение кислотности осадков и почвы в зоне промышленного предприятия**

**Цель работы:** изучить влияние кислотности на компоненты окружающей среды; провести измерения кислотности воды и растворов.

### ***Теоретическая часть***

Вода является очень слабым электролитом, но тем не менее тоже диссоциирует. Для чистой воды и воды в разбавленных растворах константа диссоциации воды зависит от температуры и при нормальных условиях  $K_d = 1,8 \cdot 10^{-16}$ .

Произведение равновесных концентраций ионов или ионное произведение воды всегда одинаково и равно  $1 \cdot 10^{-14}$ .

В чистой воде количество ионов  $H^+$  и  $OH^-$  одинаково, молярная концентрация каждого из них составляет  $1 \cdot 10^{-7}$ . При добавлении в воду какого-либо электролита, например кислоты, количество ионов  $H^+$  увеличивается. Но произведение ионов  $H^+$  и  $OH^-$  всегда остаётся одинаковым. Поэтому увеличение концентрации  $H^+$  сопровождается уменьшением концентрации  $OH^-$ . И, наоборот, добавление в воду какого-либо основания приводит к увеличению концентрации  $OH^-$  и уменьшению концентрации  $H^+$ .

Оказалось удобным оценивать «кислотность» раствора по концентрации ионов  $H^+$ . В 1909 г. С. П. Л. Серенсен предложил понятие «водородный пока-

затель» и обозначил его как  $pH$  от *pondus Hydrogenii* («сила водорода»):  $pH = -\lg[H^+]$ .

Для чистой воды  $pH = 7$ , при добавлении кислоты концентрация  $H^+$  возрастает, например, до  $1 \cdot 10^{-4}$ . Тогда  $pH = 4$ . При добавлении основания концентрация  $H^+$  уменьшается, например, до  $1 \cdot 10^{-10}$ . Тогда  $pH = 10$ .

То есть:

- $pH = 7$  – раствор нейтральный;
- $pH < 7$  – раствор кислый;
- $pH > 7$  – раствор щелочной.

Кислотность раствора – очень важный параметр, определяющий условия протекания химических реакций. Например, в щелочном растворе снижается растворимость соединений металлов, являющихся микроэлементами, поэтому в щелочной почве растения страдают от недостатка этих металлов в почвенном растворе. В кислой почве растворимость металлов возрастает, и растения могут накапливать их в токсичных для себя количествах. Для большинства сельскохозяйственных растений умеренного климата оптимальное значение  $pH$  почвенного раствора составляет 5,5...6,5.

Биохимические реакции протекают при строго определённом значении  $pH$ . Кровь человека имеет  $pH$  7,35...7,45. При закислении – ацидозе – или защелачивании – алкалозе – развиваются нарушения биохимических и физиологических процессов, что может привести к коме, тяжёлой патологии или к смерти.

Точное значение  $pH$  определяют с помощью иономеров ( $pH$ -метров) (рисунок 8.1).



Рисунок 8.1 – Лабораторный  $pH$ -метр/ОВП-метр/термометр HI 5221-02

Электродная система прибора при погружении в контролируемый раствор развивает ЭДС, линейно зависящую от  $pH$  и температуры раствора.

Электролитический контакт комбинированного электрода с контролируемым раствором осуществляется с помощью электролитического ключа, обеспе-

чивающего истечение насыщенного раствора хлористого калия KCl из полости электрода в анализируемый раствор. Раствор KCl, непрерывно просачиваясь через электролитический ключ, предотвращает проникновение из анализируемого раствора в систему комбинированного электрода посторонних ионов, которые могли бы изменить величину потенциала электрода.

ЭДС электродной системы преобразуется в аналого-цифровом преобразователе. В микропроцессоре происходит расчет значения pH и выводится на цифровое табло прибора.

Приблизительное значение pH при титровании, оценке кислотности почвы, осаждении некоторых соединений в аналитической химии и радиохимии определяют с помощью индикаторов – веществ, изменяющих свой цвет при определённых значениях pH. Некоторые индикаторы, например метиловый фиолетовый, имеют до трёх переходов цвета при изменении pH.

Диссоциация солей, попадающих в объекты окружающей среды в виде минеральных удобрений или при техногенном загрязнении атмосферы, воды или почвы, и результат их гидролиза зависят от того из какого основания и какой кислоты образуется соль.

1 Соль сильного основания и сильной кислоты также является сильным электролитом, полностью диссоциирует и практически не влияет на pH раствора. Среда имеет нейтральную реакцию.

2 Соль слабой кислоты и сильного основания при взаимодействии с водой образует малодиссоциирующую молекулу кислоты, которая связывает часть имеющихся в растворе ионов  $H^+$ . Образуется избыток  $OH^-$ . Реакция среды щелочная.

3 Соль сильной кислоты и слабого основания образует малодиссоциирующую молекулу основания, которая связывает ионы  $OH^-$ , образуется избыток ионов  $H^+$ . Реакция среды кислая.

4 При гидролизе солей слабой кислоты и слабого основания реакция среды зависит от значений констант диссоциации кислоты и основания. Вещество, которое диссоциирует больше, определяет pH раствора соли.

При гидролизе солей многоосновных кислот или оснований поливалентных металлов диссоциация происходит ступенчато и результат зависит от констант диссоциации всех ступеней. Поэтому результат гидролиза определить сложнее.

Явление гидролиза солей необходимо учитывать, в частности, при выборе минеральных удобрений. Гидролитически кислые или гидролитически щелочные удобрения изменяют pH почвенного раствора и влияют на рост и развитие растений.

В естественных условиях атмосферные осадки обычно имеют нейтральную ( $pH \approx 7$ ) или слабокислую ( $pH = 5,6$ ) реакцию. Это происходит из-за того, что содержащиеся в атмосфере углекислый газ и оксиды азота природного происхождения вступают в реакцию с дождевой водой.

Кислотными считают такие осадки, pH которых не выше 5. Они образуются чаще всего при сжигании топлива, содержащего серу и азот. Оксиды серы и азота при взаимодействии с атмосферной, гидросферной или почвенной водой образуют серную, азотную и другие кислоты. Источниками антропогенных кислот-

ных осадков являются также некоторые технологические процессы в металлургии, нефтехимической промышленности, на транспорте.

В поступлении на территорию Беларуси серы и окисленного азота основная доля принадлежит странам-соседям – Польше, Германии, Украине. Средняя кислотность осадков в Беларуси колеблется от 5,1 до 6,2.

Выделяют три стадии воздействия кислотных дождей на водоёмы:

1) с увеличением кислотности воды ( $\text{pH} < 7$ ) водяные растения начинают погибать, лишая других животных водоёма пищи, уменьшается количество кислорода в воде, начинают бурно развиваться водоросли (буро-зеленые). Первая стадия эвтрофикации (заболачивания) водоема. При кислотности  $\text{pH} = 6$  погибают пресноводные креветки;

2) кислотность повышается до  $\text{pH} = 5,5$ , погибают донные бактерии, которые разлагают органические вещества и листья, и органический мусор начинает скапливаться на дне. Затем гибнет планктон – крошечное животное, которое составляет основу пищевой цепи водоема и питается веществами, образующимися при разложении бактериями органических веществ;

3) кислотность достигает  $\text{pH} 4,5$ , погибает вся рыба, большинство лягушек и насекомых.

Таким образом, основные последствия кислотных дождей:

- гибель флоры и фауны в водоемах;
- коррозия металлов, нарушение целостности покрытий из красок;
- снижение урожайности;
- деградация лесов (усыхание хвойных лесов и дубрав);
- растворение тяжелых металлов (кадмий, ртуть, свинец) и попадание их в пищевые цепи.

### **Практическое задание**

Провести измерения проб воды и приготовленных растворов.

Порядок проведения измерений:

- 1) комбинированный измерительный электрод закрепить в штативе и подключить к гнезду ИЗМ;
- 2) автоматический термокомпенсатор закрепить в штативе и подключить к входу ТКА;
- 3) иономер включить в сеть и прогреть в течение 15 мин;
- 4) промыть электрод дистиллированной водой и удалить остатки воды фильтровальной бумагой;
- 5) промыть электрод измеряемым раствором;
- 6) погрузить электрод и термокомпенсатор в измеряемый раствор;
- 7) нажать клавишу СЕТЬ. На дисплее отражается значение  $\text{pH}$  раствора;
- 8) записать полученные значения в тетрадь;
- 9) сравнить результаты измерений с оптимальными значениями для различных биологических объектов.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое рН?
- 2 Какие значения рН характерны для природных вод?
- 3 Почему природные осадки имеют кислую реакцию?
- 4 Какие осадки называют кислотными?
- 5 Назовите источники поступления в атмосферу оксидов серы и азота.
- 6 Какие последствия для водных и наземных экосистем имеет техногенное закисление атмосферных осадков?
- 7 На чём основан принцип работы иономера?

### **Список литературы**

- 1 Инструкция о порядке инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух : постановление М-ва ПР и ООС Респ. Беларусь, 23 июня 2009 г., № 42 // Эталон-Беларусь / НЦПИ. – Мн., 2019. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=W21934641> (дата обращения: 20.02.2026).
- 2 Инструкция о порядке установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух : постановление М-ва ПР и ООС Респ. Беларусь, 23 июня 2009 г., № 43 // Эталон-Беларусь / НЦПИ. – Мн., 2019. – URL: [https://etalonline.by/document/?regnum=W20921380#load\\_text\\_none\\_5\\_1](https://etalonline.by/document/?regnum=W20921380#load_text_none_5_1) (дата обращения: 26.02.2026).
- 3 Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий // Департамент по энергоэффективности Гос. комитета по стандартизации Респ. Беларусь. – Мн., 2020. – 144 с. – URL: [http://energoeffekt.gov.by/programs/forming/20201118\\_tepem](http://energoeffekt.gov.by/programs/forming/20201118_tepem). (дата обращения: 18.02.2026).
- 4 Методы исследований в экологии : краткий курс лекций / сост. Н. Н. Гусакова, Ю. М. Мохонько. – Саратов : Саратовский ГАУ, 2014. – 174 с.
- 5 **Рогова, Т. В.** Общая экология: учебн. пособие / Т. В. Рогова, Н. Р. Шафигулина. – 2-е изд., перераб. – Казань : Казан. ун-т, 2023. – 79 с.
- 6 **Щур, А. В.** Энергосбережение : учеб. пособие / А. В. Щур. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т ; Рязань : Рязан. гос. ун-т им. П. А. Костычева, 2020. – 261 с.
- 7 Экология : учебник и практикум / под общ. ред. А. В. Тотая, А. В. Корсакова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2020. – 352 с.
- 8 **Щур, А. В.** Экология : учебник / А. В. Щур. – Рязань : ИП Викулов К. В., 2021. – 248 с.