

**Кафедра отопления и вентиляции**

**РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА В УСТАНОВКАХ СИСТЕМ  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

Методические указания к расчетно-графической работе  
по дисциплине «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение»  
для студентов специальности 140104.65 Промышленная  
теплоэнергетика очной и заочной форм обучения

**УДК 628.23**

**РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА В УСТАНОВКАХ СИСТЕМ  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

Методические указания к расчетно-графической работе по дисциплине «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение» для студентов специальности 140104.65 Промышленная теплоэнергетика очной и заочной форм обучения.

**Нижний Новгород, издание ННГАСУ, 2010, С. 42.**

В методических указаниях представлены рекомендации по расчету процессов обработки приточного воздуха в установках кондиционирования воздуха с примерами, даны рекомендации по оформлению результатов работы.

**Табл. 2, рис. 9, библиогр. назв. 6, прил. 2.**

**Составители:     Осипов Ю.В.  
                          Козлов Е.С.**

©: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	4
1. Построение процессов тепловлажностной обработки воздуха .....	5
2. Прямоточная система кондиционирования воздуха .....	6
3. Система кондиционирования воздуха с первой рециркуляцией .....	15
4. Система кондиционирования воздуха с первой и второй рециркуляциями .....	25
Список литературы .....	36
Приложения .....	37
Приложение А. Исходные данные .....	38
Приложение Б. Соотношение между некоторыми единицами физических величин МКГСС и единицами СИ .....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Формирование микроклимата зданий зависит от взаимодействия ограждающих конструкций с внутренней и наружной средами, тепло- и массообменных процессов при контакте ограждений и воздуха вентиляционных систем помещений, характеристик наружного климата и законов их изменения. Действия по расчету, организации и регулированию микроклимата помещения должны базироваться на знаниях по климатологии, термодинамике влажного воздуха, теплопередаче, теории подобия, теории тепло- и массообмена и др. общепрофессиональных дисциплинах.

В настоящих методических указаниях, подготовленных на основе положений [5], излагаются методы построения на  $I-d$ -диаграмме основных процессов кондиционирования воздуха.

Все задачи, приведенные в методических указаниях, иллюстрируются рисунками и примерами расчетов.

Теоретические сведения и справочные материалы пособия приводятся в объеме, необходимом для решения задач. Необходимо дополнительно пользоваться учебниками, учебными пособиями, нормативными и справочными материалами по списку литературы.

При изучении курса «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение» студентам следует выполнить графо-аналитическим способом задания по расчетам процессов обработки наружного воздуха при различных схемах его обработки в установке кондиционирования воздуха.

Расчетная работа должна быть выполнена четко, аккуратно и разборчиво (с полями для пометок преподавателя), с необходимыми для оформления задач рисунками.

## 1. ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА

Для поддержания заданной температуры и относительной влажности внутри помещений приточный воздух, поступающий в эти помещения, подвергают тепловлажностной обработке в кондиционерах [5].

В зависимости от особенностей обработки воздуха системы кондиционирования воздуха (СКВ) бывают прямоточными (работают только на наружном воздухе) и рециркуляционными. СКВ по периодичности действия делятся на сезонные и круглогодичные, а в зависимости от расположения кондиционеров по отношению к обслуживаемым помещениям – на центральные и местные.

СКВ, которые в теплый период года работают на охлаждение с понижением теплосодержания, называют системами полного кондиционирования, а системы, работающие в теплый период года в адиабатном режиме увлажнения, – системами неполного кондиционирования. В холодный период года тепловлажностная обработка воздуха в обеих системах одинакова и заключается в нагревании и увлажнении воздуха.

Наиболее рациональным и дешевым является адиабатный процесс обработки воздуха. Политропные процессы применяют только тогда, когда для заданных условий адиабатный процесс обработки воздуха в камере кондиционера не может быть осуществлен.

Исходными данными для расчета и построения процессов являются параметры наружного воздуха: температура  $t_n$ , °C, относительная влажность  $\varphi_n$ , %, удельная энтальпия  $I_n$ , кДж/кг, влагосодержание  $d_n$ , г/кг. сух. возд. (из приведенных четырех параметров достаточно знать любые два, а остальные можно определить с помощью  $I$ - $d$ -диаграммы); параметры внутреннего воздуха: температура  $t_v$ , °C, относительная влажность  $\varphi_v$ , %, или

влажностное содержание  $d_{в}$ , г/кг. сух. возд. (далее: г/кг); полные теплоизбытки в помещении  $Q_{п}$ , Вт; избыточные влаговыделения  $M_{вл}$ , кг/ч.

Температуру приточного воздуха  $t_{п}$ , °C, следует принимать в зависимости от схемы воздухораспределения. Так, при ассимиляции тепло- и влагоизбытков допускается принимать разность температур воздуха помещения и приточного  $\Delta t = 2$  °C при подаче воздуха в рабочую зону, 4...6 °C – при подаче на высоте 2,5...4 м от уровня пола, 6...8 °C – при подаче на высоте более 4 м от уровня пола [5]. При одновременном выделении в помещении теплоты и влаги для определения параметров приточного воздуха можно пользоваться не только допустимым перепадом температур  $\Delta t$ , но и ассимилирующей способностью приточного воздуха по влаге  $\Delta d$ :

$$\Delta d = d_{в} - d_{п}, \quad (1)$$

где  $d_{п}$  – влажностное содержание приточного воздуха, г/кг.

Результатом построения на  $I-d$ -диаграмме процессов кондиционирования воздуха является определение производительности СКВ, расходов теплоты и холода, необходимых для обработки приточного воздуха. При построении процессов обработки воздуха в приведенных примерах решения задач условно принято, что параметры воздуха, уходящего из кондиционируемого помещения, такие же, как и параметры воздуха в обслуживаемой зоне.

## 2. ПРЯМОТОЧНАЯ СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Прямоточные СКВ применяются для тех помещений или зданий, где согласно санитарным нормам не допускается рециркуляция воздуха [5]. Принципиальная схема прямоточного центрального кондиционера приведена на рисунке 1.

В зависимости от возникающих требований воздух в кондиционере может нагреваться, охлаждаться, увлажняться или осушаться.

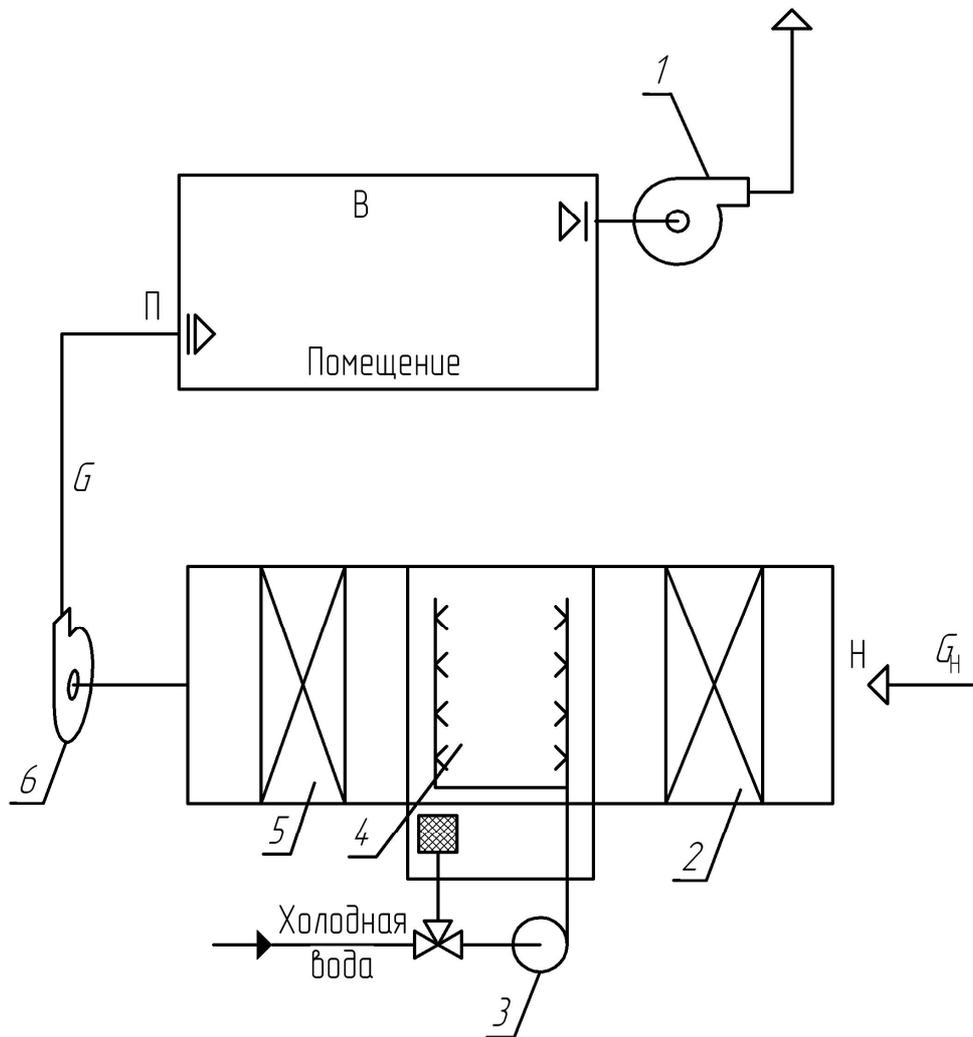


Рис. 1. Схема проточной системы кондиционирования воздуха:  
 1 – вытяжной вентилятор; 2 – воздухонагреватель 1-го подогрева; 3 – насос;  
 4 – камера орошения; 5 – воздухонагреватель 2-го подогрева;  
 6 – вентиляционный агрегат

**Задача №1.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс проточной обработки воздуха при его кондиционировании в теплый период года. Определить расходы приточного воздуха, теплоты и холода для осуществления процессов нагрева, осушки и охлаждения воздуха.

**Исходные данные** (Приложение А). Параметры наружного воздуха: температура  $t_n$ , °C, удельная энтальпия  $I_n$ , кДж/кг; полная избыточная теплота в помещении  $Q_{п}$ , Вт, избыточные влаговыделения в помещении  $M_{вл}$ , кг/ч; температура приточного воздуха  $t_{п}$ , °C; параметры внутреннего воздуха: температура  $t_{в}$ , °C (для всех вариантов  $t_{в} = 23$  °C) и относительная влажность  $\phi_{в}$ , % (для всех вариантов  $\phi_{в} = 50$  %) [5].

**Порядок расчета и построения.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 2) наносим точки, соответствующие параметрам воздуха: наружного – точка **Н**, внутреннего – точка **В**.

2. Вычисляем угловой коэффициент луча процесса в помещении  $\varepsilon_T$ , кДж/кг. вл. (далее кДж/кг), по формуле:

$$\varepsilon_T = \frac{3,6Q_{\Pi}}{M_{\text{вл}}}. \quad (2)$$

3. На  $I-d$ -диаграмме через точку **В** проводим луч процесса  $\varepsilon_T$  до пересечения с выбранной температурой приточного воздуха  $t_{\Pi}$ , находим точку **П**, соответствующую параметрам приточного воздуха.

4. Через точку **П** проводим линию постоянного влагосодержания  $d_{\Pi} = \text{const}$  до пересечения с кривой  $\phi = 95\%$ ; находим точку **О**, характеризующую состояние воздуха, выходящего из камеры орошения. На линии **ОП** от точки **П** вниз по линии  $d_{\Pi} = \text{const}$  откладываем отрезок, равный  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответствующий нагреву воздуха в вентиляторе и воздуховодах [5]; получаем точку **П'**, параметры которой соответствуют состоянию воздуха после воздухонагревателя второго подогрева.

5. Определяем необходимый расход приточного воздуха  $G$ , кг/ч, по формуле:

$$G = 3,6Q_{\Pi} / (I_{\text{в}} - I_{\text{п}}). \quad (3)$$

При высоте помещения до 4 м удельную энтальпию  $I_{\text{в}}$  воздуха, удаляемого из помещения, и энтальпию  $I_{\text{в}}$  воздуха помещения можно принять равными, т.е.  $I_{\text{в}} = I_{\text{в}}$ .

6. Вычисляем тепловую нагрузку воздухонагревателя второго подогрева  $Q_2$ , Вт:

$$Q_2 = 0,278G(I_{\text{п'}} - I_{\text{о}}), \quad (4)$$

где  $I_{\text{п'}}$  и  $I_{\text{о}}$  – удельная энтальпия воздуха, соответствующая точкам **П'** и **О**, кДж/кг.

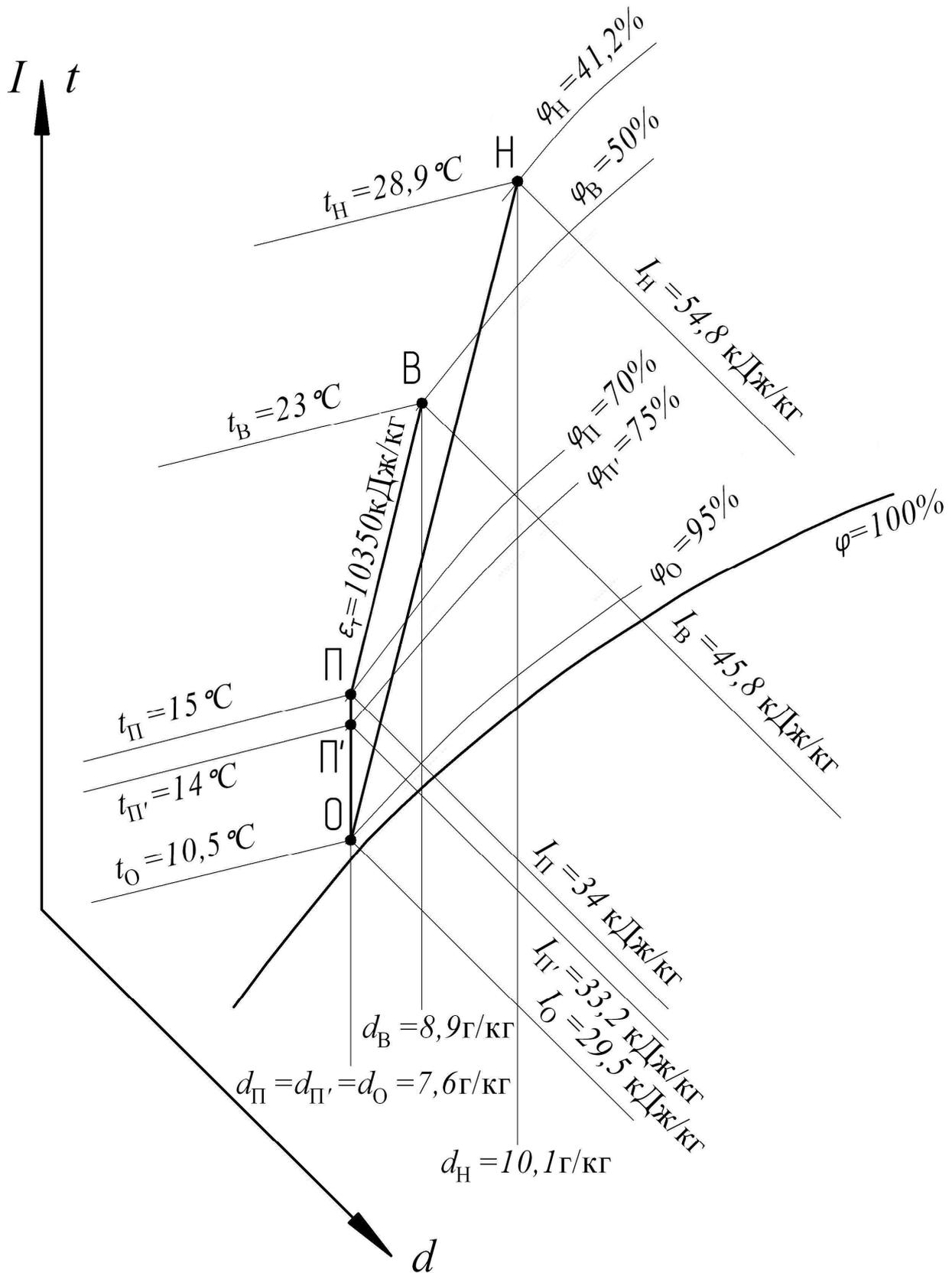


Рис. 2. Построение на  $I$ - $d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в прямомочном кондиционере для теплого периода года [5]

7. Точку **О** соединяем с точкой **Н**. Прямая **НО** соответствует процессу обработки наружного воздуха в камере орошения.

8. Находим количество сконденсировавшейся влаги в камере орошения  $M_o$ , кг/ч:

$$M_o = G(d_n - d_o) \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $d_n$ ,  $d_o$  – влагосодержание воздуха до и после его обработки в камере орошения, г / кг.

9. Определяем охлаждающую мощность камеры орошения  $Q_x$ , Вт, по формуле:

$$Q_x = 0,278G(I_n - I_o), \quad (6)$$

где  $I_o$  – удельная энтальпия воздуха после его обработки в камере орошения, кДж/кг.

**Пример №1.** Построить на  $I$ - $d$ -диаграмме процесс прямоточной обработки воздуха в кондиционере в теплый период года для помещения общественного здания. Определить расходы приточного воздуха  $G$ , кг/ч, теплоты  $Q_2$ , Вт, и холода  $Q_x$ , Вт, при следующих исходных данных:  $t_n = 28,9$  °С;  $I_n = 54,8$  кДж/кг;  $t_b = 23$  °С;  $\phi_b = 50\%$ ;  $Q_{п} = 115000$  Вт;  $M_{вл} = 40$  кг/ч;  $t_{п} = 15$  °С [5].

**Решение.**

1. На  $I$ - $d$ -диаграмму (рис. 2) наносим точки **Н**, **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха.

2. Вычисляем угловой коэффициент луча процесса в помещении по формуле (2):

$$\varepsilon_T = 3,6 \cdot 115000 / 40 = 10350 \text{ кДж/кг.}$$

3. На  $I$ - $d$ -диаграмме через точку **В** проводим луч процесса  $\varepsilon_T = 10350$  кДж/кг до пересечения с изотермой приточного воздуха  $t_{п} = 15$  °С, находим точку **П**, соответствующую параметрам приточного воздуха.

Удельная энтальпия приточного воздуха составит  $I_{п} = 34$  кДж/кг, влагосодержание  $d_{п} = 7,6$  г/кг.

4. Определяем расход приточного воздуха по формуле (3):

$$G = 3,6 \cdot 115000 / (45,8 - 34) = 35085 \text{ кг/ч.}$$

5. Через точку **П** проводим линию  $d_{\text{п}} = \text{const}$  до пересечения с кривой  $\varphi = 95 \%$ , находим точку **О**, характеризующую состояние воздуха после камеры орошения, параметры которой равны:  $I_o = 29,5$  кДж/кг;  $d_o = 7,6$  г/кг.

6. Определяем тепловую нагрузку воздухонагревателя второго подогрева по формуле (4):

$$Q_2 = 0,278 \cdot 35085 (33,2 - 29,5) = 36088 \text{ Вт.}$$

7. Количество сконденсировавшейся в камере орошения влаги вычисляем по формуле (5):

$$M_o = 35085 (10,1 - 7,6) 10^{-3} = 87,7 \text{ кг/ч.}$$

8. Находим охлаждающую мощность камеры орошения по формуле (6):

$$Q_x = 0,278 \cdot 35085 (54,8 - 29,5) = 24676 \text{ Вт.}$$

**Задача №2.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс прямоточной обработки воздуха при его кондиционировании в холодный период года. Определить расходы теплоты для воздухонагревателей первого и второго подогрева и количество испарившейся воды в камере орошения.

**Исходные данные** (Приложение А). Параметры наружного воздуха: температура  $t_{\text{н}}$ , °С, удельная энтальпия  $I_{\text{н}}$ , кДж/кг; избыточная теплота  $Q_{\text{п}}$ , Вт, избыточные влаговыведения в помещении  $M_{\text{вл}}$ , кг/ч; параметры внутреннего воздуха – температура  $t_{\text{в}}$ , °С (для всех вариантов  $t_{\text{в}} = 20$  °С); относительная влажность  $\varphi_{\text{в}}$ , % (для всех вариантов  $\varphi_{\text{в}} = 45$  %). Расход приточного воздуха  $G$ , кг/ч, принят по теплому периоду года [5].

### **Порядок расчета и построения.**

На  $I-d$ -диаграмму (рис. 3) наносим точки **Н** и **В**, соответствующие параметрам внутреннего и наружного воздуха.

2. По формуле (2) определяем угловой коэффициент луча процесса в помещении  $\epsilon_x$ , кДж/кг.

3. Находим ассимилирующую способность приточного воздуха по влаге  $\Delta d$ , г/кг:

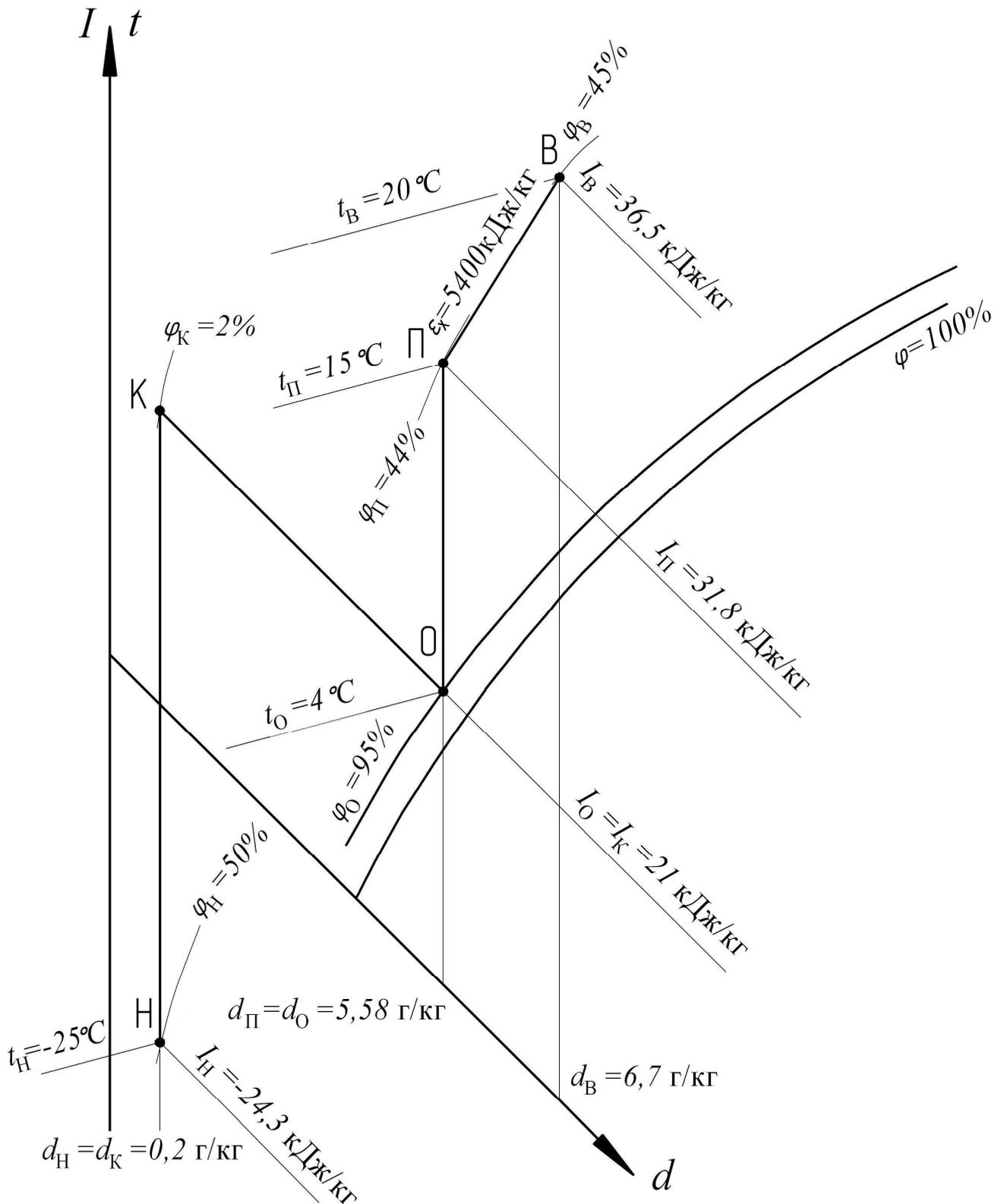


Рис. 3. Построение на  $I$ - $d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в приточном кондиционере для холодного периода года [5]

$$\Delta d = (M_{\text{вл}} / G)10^3 . \quad (7)$$

4. Определяем влагосодержание приточного воздуха  $d_{\text{п}}$ , г/кг, по формуле :

$$d_{\text{п}} = d_{\text{в}} - \Delta d . \quad (8)$$

5. Проводим через точку **В**, характеризующую заданное состояние внутреннего воздуха, луч процесса в помещении до пересечения с линией  $d_{\text{п}} = \text{const}$ , находим точку **П**, определяющую необходимое состояние приточного воздуха.

6. Через точку **П** проводим линию  $d_{\text{п}} = \text{const}$  до пересечения с кривой  $\phi = 95 \%$ , находим положение точки **О**, характеризующей состояние воздуха после камеры орошения.

7. Через точку **О** проводим линию  $I_{\text{о}} = \text{const}$ , а через точку **Н** – линию  $d_{\text{н}} = \text{const}$  до их взаимного пересечения в точке **К**. Отрезок **НК** соответствует процессу нагревания воздуха в воздухонагревателе первого подогрева, а отрезок **КО** – процессу адиабатного увлажнения воздуха в камере орошения.

8. Определяем расход теплоты  $Q_1$ , Вт, в воздухонагревателе первого подогрева по формуле:

$$Q_1 = 0,278G(I_{\text{к}} - I_{\text{н}}) , \quad (9)$$

где  $I_{\text{к}}$  – удельная энтальпия воздуха перед камерой орошения, кДж/кг.

9. Находим расход теплоты  $Q_2$ , Вт, в воздухонагревателе второго подогрева по формуле:

$$Q_2 = 0,278G(I_{\text{п}} - I_{\text{о}}) , \quad (10)$$

где  $I_{\text{п}}$  и  $I_{\text{о}}$  – удельная энтальпия воздуха, соответствующая точкам **П** и **О**, кДж/кг.

10. Определяем количество испарившейся воды в камере орошения  $M_{\text{о}}$ , кг/ч, по формуле:

$$M_{\text{о}} = G(d_{\text{о}} - d_{\text{к}})10^{-3} , \quad (11)$$

где  $d_{\text{о}}$  и  $d_{\text{к}}$  – влагосодержание воздуха, соответствующее точкам **О** и **К**, г/кг.

**Пример №2.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс прямоточной обработки воздуха в кондиционере в холодный период года для помещения общественного здания. Определить расходы теплоты для воздухонагревателей первого  $Q_1$ , Вт, и второго  $Q_2$ , Вт, подогрева, количество испарившейся воды в камере орошения  $M_o$ , г/кг, при следующих исходных данных [5]:  $t_n = -25$  °C;  $I_n = -24,3$  кДж/кг;  $t_b = 20$  °C;  $\phi_b = 45$  %;  $Q_n = 60000$  Вт;  $M_{вл} = 40$  кг/ч;  $G = 35085$  кг/ч.

**Решение.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 3) наносим точки **Н**, **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха.

2. Вычисляем угловой коэффициент луча процесса по формуле (2):

$$\epsilon_x = 3,6 \cdot 60000 / 40 = 5400 \text{ кДж/кг.}$$

3. По формуле (7) определяем ассимилирующую способность приточного воздуха по влаге:

$$\Delta d = 40000 / 35085 = 1,14 \text{ г/кг.}$$

4. Определяем влагосодержание приточного воздуха по формуле (8), принимая по  $I-d$ -диаграмме  $d_b = 6,7$  г/кг:

$$d_n = 6,7 - 1,14 = 5,56 \text{ г/кг.}$$

5. Проводим через точку **В** луч процесса в помещении  $\epsilon_x = 5400$  кДж/кг до пересечения с линией  $d_n = 5,56$  г/кг, находим положение точки **П**, соответствующей параметрам приточного воздуха,  $I_n = 31,8$  кДж/кг.

6. Определяем параметры воздуха после камеры орошения на пересечении линии  $d_n = const$  с кривой  $\phi = 95$  %:  $I_o = 21$  кДж/кг;  $d_o = 5,56$  г/кг.

7. Определяем параметры воздуха перед камерой орошения:

$$I_k = I_o = 21 \text{ кДж/кг; } d_k = 0,2 \text{ г/кг.}$$

8. По формуле (9) находим расход теплоты в воздухонагревателе первого подогрева:

$$Q_1 = 0,278 \cdot 35085 [21 - (-24,3)] = 441839 \text{ Вт.}$$

9. По формуле (10) высчитываем расход теплоты в воздухонагревателе второго подогрева:

$$Q_2 = 0,278 \cdot 35085 (31,8 - 21) = 105339 \text{ Вт.}$$

10. По формуле (11) определяем количество испарившейся воды в камере орошения [5]:

$$M_o = 35085 (5,56 - 0,2) 10^{-3} = 188 \text{ кг/ч.}$$

### 3. СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С ПЕРВОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Рециркуляция воздуха – подмешивание воздуха помещения к наружному воздуху и подача этой смеси в данное или другие помещения [6].

В системах кондиционирования воздуха с первой рециркуляцией применяют, как правило, подачу рециркуляционного воздуха перед воздухонагревателем первого подогрева (рис. 4) [5].

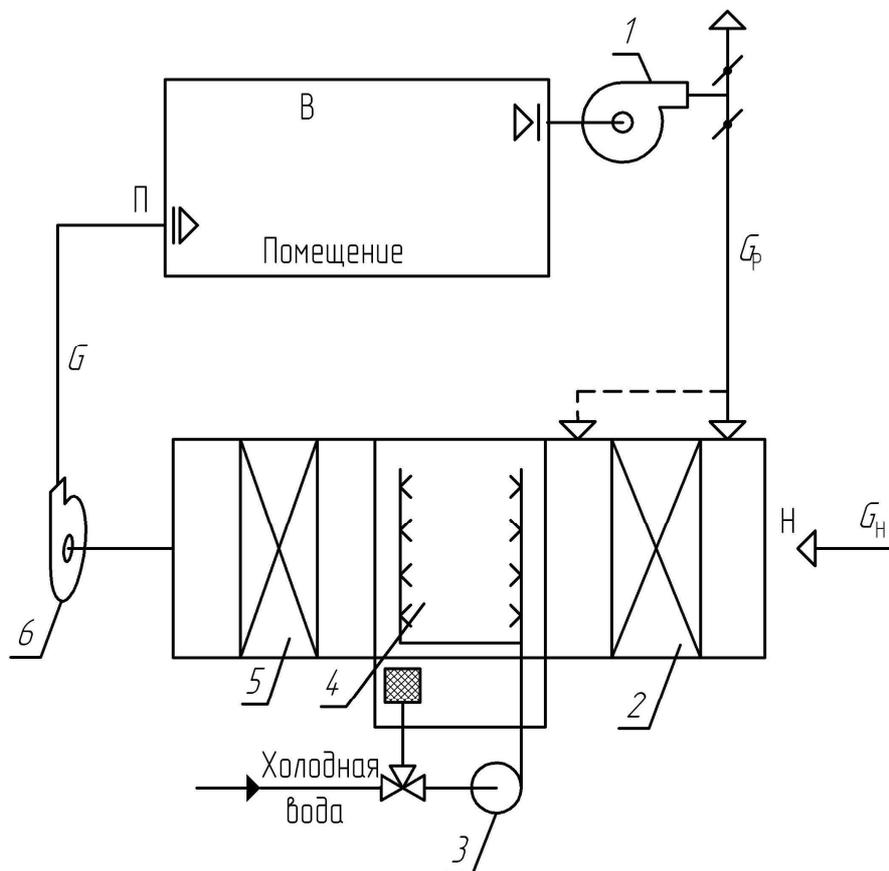


Рис. 4. Система кондиционирования воздуха с применением первой рециркуляции:

- 1 – рециркуляционный вентилятор; 2 – воздухонагреватель 1-го подогрева;
- 3 – насос; 4 – камера орошения; 5 – воздухонагреватель 2-го подогрева;
- 6 – вентиляционный агрегат кондиционера

В теплый период года с целью экономии холода наружный воздух смешивается с более холодным внутренним воздухом. Смесь очищается в фильтре, охлаждается и осушается в камере орошения, а затем, при необходимости, нагревается в воздухонагревателе второго подогрева. Обработанный воздух подается в обслуживаемое помещение с параметрами приточного воздуха. В помещении приточный воздух ассимилирует тепло- и влагоизбытки, его параметры уравниваются с параметрами внутреннего воздуха. Часть воздуха, удаляемого из помещения, возвращается на рециркуляцию, остальное количество воздуха удаляется наружу.

В холодный период с целью экономии теплоты смесь теплого воздуха помещения и холодного наружного очищается в фильтре и нагревается в воздухонагревателе первого подогрева, обрабатывается в камере орошения, подогревается в воздухонагревателе второго подогрева до требуемых параметров приточного воздуха и поступает в помещение.

Для упрощения расчетов во всех вариантах задач условно принято количество наружного воздуха  $G_n$ , кг/ч [5]:

$$G_n = 0,6G_o, \quad (12)$$

где  $G_o$  – расход воздуха, проходящего через камеру орошения, кг/ч.

**Задача №3.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха для теплого периода года с первой рециркуляцией. Определить расходы приточного воздуха, теплоты и холода для осуществления процессов нагрева, осушки и охлаждения воздуха.

**Исходные данные** (Приложение А). Параметры наружного воздуха: температура  $t_n$ , °С, удельная энтальпия  $I_n$ , кДж/кг; полная избыточная теплота  $Q_n$ , Вт, избыточные влаговыведения в помещении  $M_{вл}$ , кг/ч; температура приточного воздуха  $t_p$ , °С; параметры внутреннего воздуха: температура  $t_b$ , °С (для всех вариантов  $t_b = 23$  °С) и относительная влажность  $\phi_b$ , % (для всех вариантов  $\phi_b = 50$  %) [5].

**Порядок построения и расчета.**

1. Пункты 1...5 выполняют аналогично соответствующим пунктам

расчета прямоточной системы кондиционирования воздуха (задача № 1).

6. На  $I-d$ -диаграмме находим положение точки  $\mathbf{B}_\zeta$  соответствующей параметрам рециркуляционного воздуха при условии  $d_{\mathbf{B}} = d_{\mathbf{B}'}; t_{\mathbf{B}'} = t_{\mathbf{B}} + 1^\circ\text{C}$  (рис. 5).

7. По формуле (4) определяем тепловую нагрузку воздухонагревателя второго подогрева.

8. Находим количество наружного воздуха по формуле (12).

9. Определяем количество рециркуляционного воздуха  $G_p$ , кг/ч, по формуле:

$$G_p = G - G_n. \quad (13)$$

10. Находим положение точки  $\mathbf{C}$ , соответствующей параметрам смеси рециркуляционного и наружного воздуха, для чего определяем удельную энтальпию смеси  $I_c$ , кДж/кг, по формуле:

$$I_c = (G_p I_{\mathbf{B}'} + G_n I_n) / G. \quad (14)$$

11. Определяем потребность в холоде камеры орошения  $Q_x$ , Вт, по формуле:

$$Q_x = 0,278G(I_c - I_o). \quad (15)$$

12. Находим количество сконденсировавшейся воды в камере орошения  $M_o$ , кг/ч:

$$M_o = G(d_c - d_o)10^{-3}. \quad (16)$$

где  $d_c$  – влагосодержание смеси рециркуляционного и наружного воздуха, г/кг.

**Пример №3.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха в теплый период года при схеме его обработки с первой рециркуляцией для помещения общественного здания. Определить расходы приточного  $G$ , кг/ч, и рециркуляционного воздуха  $G_p$ , кг/ч, расходы теплоты  $Q_2$ , Вт, и холода  $Q_x$ , Вт, а также количество сконденсировавшейся влаги  $M_o$ , кг/ч, при следующих исходных данных [5]:  $t_n = 28,9^\circ\text{C}$ ;  $I_n = 54,8$  кДж/кг;  $t_{\mathbf{B}} = 23^\circ\text{C}$ ;  $\phi_{\mathbf{B}} = 50\%$ ;  $Q_{\text{п}} = 115000$  Вт;  $M_{\text{вл}} = 40$  кг/ч;  $t_{\text{п}} = 15^\circ\text{C}$ .

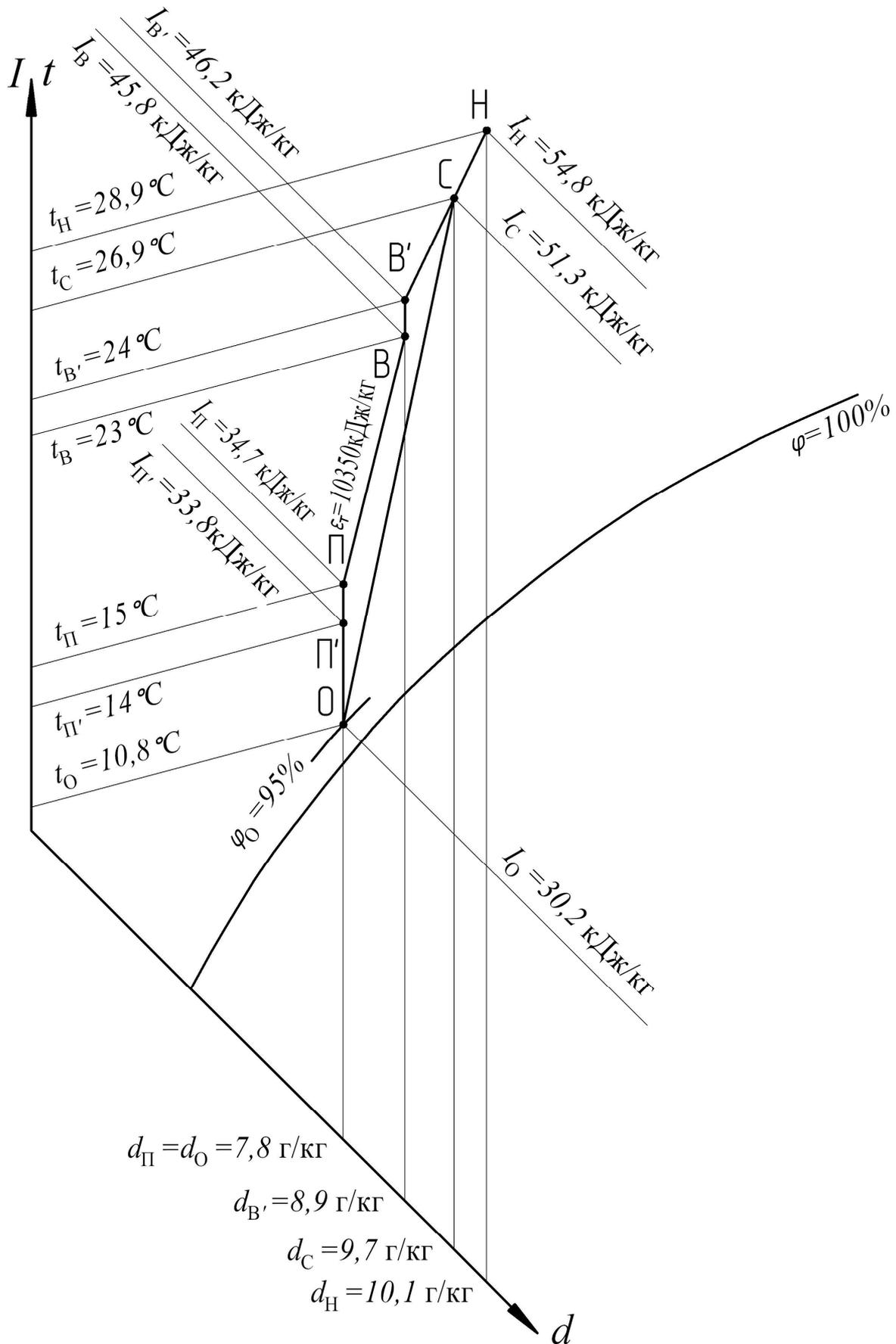


Рис. 5. Построение на  $I$ - $d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в кондиционере с первой рециркуляцией для теплого периода года [5]

**Решение.**

1. На  $I-d$ -диаграмму наносим точки **Н**, **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха (рис. 5).

2. Вычисляем угловой коэффициент луча процесса по формуле (2):

$$\varepsilon_T = (3,6 \cdot 115000) / 40 = 10350 \text{ кДж/кг.}$$

3. На  $I-d$ -диаграмме через точку **В** проводим луч процесса до пересечения с температурой приточного воздуха  $t_{\text{п}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , находим точку **П**, соответствующую параметрам приточного воздуха:  $\varphi_{\text{п}} = 72 \%$ ;  $I_{\text{п}} = 34,7 \text{ кДж/кг}$ ;  $d_{\text{п}} = 7,8 \text{ г/кг}$ .

4. Через точку **П** проводим линию  $d_{\text{п}} = \text{const}$  до пересечения с кривой  $\varphi = 95 \%$ , находим точку **О**, соответствующую параметрам воздуха, выходящего из камеры орошения:  $t_{\text{о}} = 10,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{\text{о}} = 95 \%$ ;  $I_{\text{о}} = 30,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $d_{\text{о}} = 7,8 \text{ г/кг}$ . От точки **П** вниз по  $d_{\text{п}} = \text{const}$  откладываем отрезок, равный  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответствующий нагреву воздуха в вентиляторе и воздуховодах, получаем точку **П'**, соответствующую параметрам воздуха после воздухонагревателя второго подогрева:  $t_{\text{п}'} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{\text{п}'} = 77 \%$ ;  $I_{\text{п}'} = 33,8 \text{ кДж/кг}$ .

5. Определяем расход приточного воздуха по формуле (3):

$$G = 3,6 \cdot 115000 / (45,8 - 34,7) = 37297 \text{ кг/ч.}$$

6. На  $I-d$ -диаграмме находим точку **В'**, соответствующую параметрам рециркуляционного воздуха при  $d_{\text{в}} = d_{\text{в}'} = 8,9 \text{ г/кг}$ ;  $t_{\text{в}'} = t_{\text{в}} + 1 \text{ }^\circ\text{C} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_{\text{в}'} = 46,2 \text{ кДж/кг}$ .

7. Рассчитаем тепловую нагрузку воздухонагревателя второго подогрева по формуле (4):

$$Q_2 = 0,278 \cdot 37297 (33,8 - 30,2) = 37327 \text{ Вт.}$$

8. Определяем количество наружного воздуха при  $G = G_{\text{о}}$  по формуле (12):

$$G_{\text{н}} = 0,6 \cdot 37297 = 22378 \text{ кг/ч.}$$

9. Находим количество рециркуляционного воздуха по формуле (13):

$$G_{\text{р}} = 37297 - 22378 = 14919 \text{ кг/ч.}$$

10. Рассчитаем удельную энтальпию смеси рециркуляционного и наружного воздуха по формуле (14):

$$I_c = (14919 \cdot 46,2 + 22 \cdot 378 \cdot 54,8) / 37297 = 51,3 \text{ кДж/кг.}$$

Определяем остальные параметры смеси по  $I-d$ -диаграмме:  $t_c = 26,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_c = 44 \text{ \%}$ ;  $d_c = 9,7 \text{ г/кг}$ .

11. Вычисляем потребность в холоде камеры орошения по формуле (15):

$$Q_x = 0,278 \cdot 37297 (51,3 - 30,2) = 219388 \text{ Вт.}$$

12. Количество воды, конденсирующейся в камере орошения, определяем по формуле (16):

$$M_o = 37297 (9,7 - 7,8) \cdot 10^{-3} = 70,86 \text{ кг/ч.}$$

**Задача №4.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха для холодного периода года при схеме его обработки с первой рециркуляцией. Определить расходы теплоты и холода для обработки кондиционируемого воздуха.

**Исходные данные** (Приложение А). Параметры наружного воздуха: температура  $t_n$ ,  $^\circ\text{C}$ , удельная энтальпия  $I_n$ , кДж/кг; избыточная теплота  $Q_n$ , Вт, избыточные влаговыделения в помещении  $M_{вл}$ , кг/ч; параметры внутреннего воздуха – температура  $t_b$ ,  $^\circ\text{C}$  (для всех вариантов  $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ); относительная влажность  $\varphi_b$ , % (для всех вариантов  $\varphi_b = 45 \text{ \%}$ ). Расход приточного воздуха  $G$ , кг/ч, и рециркуляционного воздуха  $G_p$ , кг/ч, приняты по теплому периоду года [5].

#### **Порядок расчета и построения.**

При использовании системы кондиционирования воздуха с первой рециркуляцией в холодный период года возможен быть два варианта смешения наружного и рециркуляционного воздуха. В первом варианте рециркуляционный воздух смешивается с не подогретым наружным воздухом. Такой вариант рекомендуется использовать, если точка смеси оказывается выше кривой  $\varphi = 100 \text{ \%}$  и выпадения влаги воздуха не происходит. Если точка смеси оказывается ниже кривой  $\varphi = 100 \text{ \%}$ , применяется второй вариант, при

котором рециркуляционный воздух подмешивают к подогретому наружному воздуху после воздухонагревателя первого подогрева.

Рассмотрим последовательность построения процесса и расчета в первом варианте.

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 6) наносим точки **Н** и **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха.

2. Вычисляем по формуле (2) угловой коэффициент луча процесса в помещении.

3. На  $I-d$ -диаграмме через точку **В** проводим луч процесса в помещении.

4. Определяем ассимилирующую способность приточного воздуха по влаге  $\Delta d$ , г/кг, по формуле (7).

5. Находим влагосодержание приточного воздуха  $d_{п}$ , г/кг, по формуле (8).

6. На пересечении линии  $d_{п} = const$  с лучом процесса в помещении находим положение точки **П**, соответствующей состоянию приточного воздуха при сохранении его количества, полученного расчетом для теплого периода года.

7. Через точку **П** на  $I-d$ -диаграмме проводим линию  $d_{п} = const$  до пересечения с кривой  $\phi = 95\%$ , получим точку **О**, характеризующую параметры воздуха на выходе из камеры орошения.

8. Через точку **О** проводим луч адиабатного процесса увлажнения воздуха в оросительной камере.

9. Находим точку **С**, соответствующую параметрам смеси рециркуляционного и наружного воздуха. Для этого точки **Н** и **В** соединяем прямой и определяем удельную энтальпию точки смеси  $I_c$ , кДж/кг, по формуле

$$I_c = (G_p I_v + G_n I_n) / G, \quad (17)$$

где  $G_n$ ,  $G_p$  – расход воздуха, кг/ч, наружного и рециркуляционного, принимаемый по теплому периоду.

Точка смеси **С** находится на пересечении линии **НВ** и  $I_c = const$ . Если точка **С** находится выше кривой  $\phi = 100\%$ , применение первого варианта

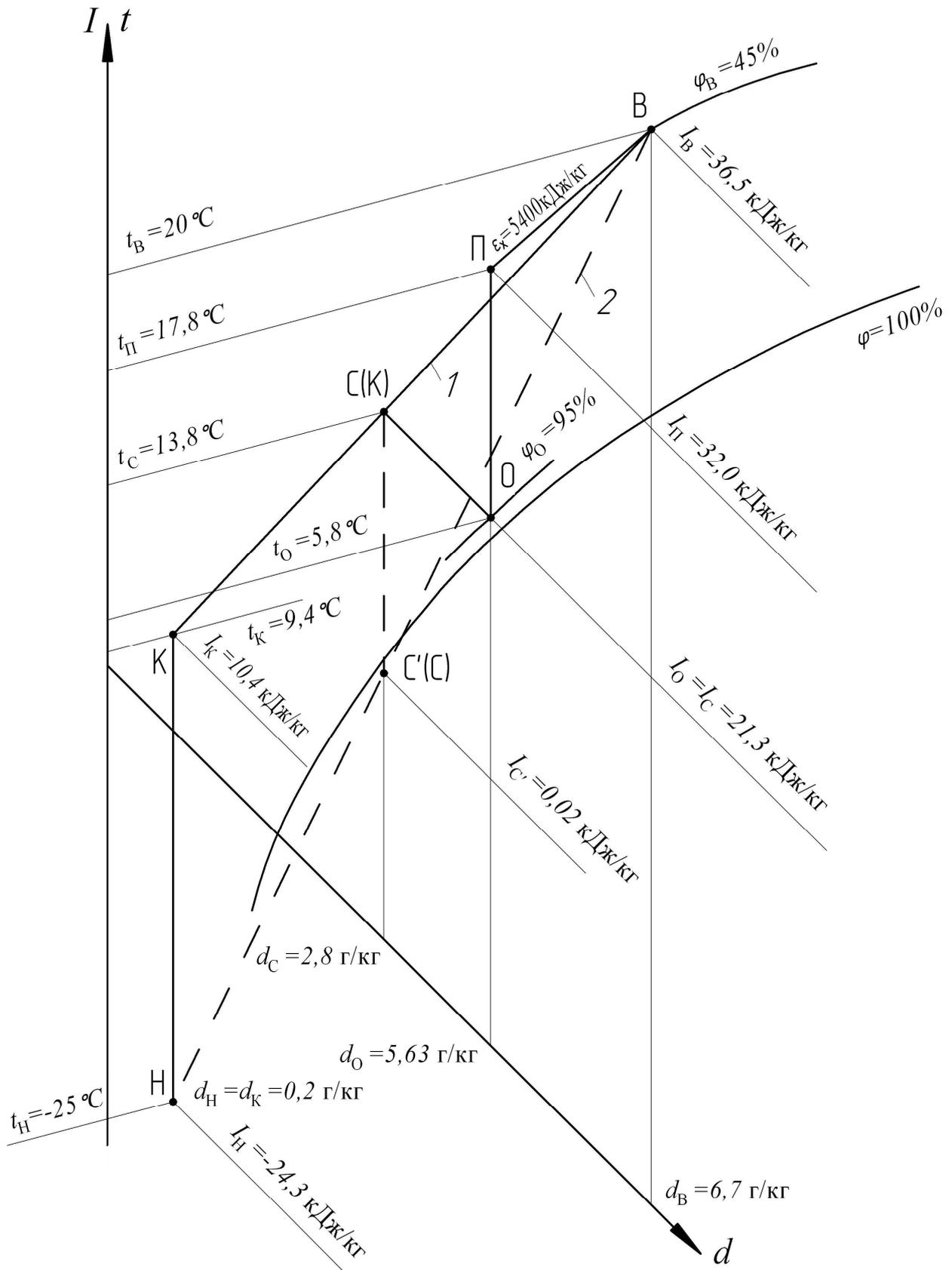


Рис. 6. Построение на  $I$ - $d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в кондиционере с первой рециркуляцией для холодного периода года:

- 1 – рециркуляция воздуха после воздухонагревателя 1-го подогрева;
- 2 – рециркуляция воздуха до воздухонагревателя 1-го подогрева

правомерно. Удельная энтальпия смеси  $I_c$  должна быть не больше удельной энтальпии воздуха после камеры орошения  $I_o$ .

10. Определяем параметры воздуха перед камерой орошения после его нагрева в воздухонагревателе первого подогрева. Для этого проводим линии  $d_c = const$  и  $I_o = const$  до их взаимного пересечения в точке **К**.

11. Находим тепловую нагрузку на воздухонагреватель первого подогрева, Вт:

$$Q_1 = 0,278G_n(I_k - I_c). \quad (18)$$

и на воздухонагреватель второго подогрева  $Q_2$ , Вт, по формуле (10).

12. Вычисляем количество воды, кг/ч, испарившейся в камере орошения, по формуле (11).

При обработке кондиционируемого воздуха по второму варианту, когда подмешивание рециркуляционного воздуха осуществляется после воздухонагревателя первого подогрева, положение точек **Н**, **В**, **П**, **О** определяют аналогично описанному выше (п.п. 1...7 задачи №4),

Для нахождения точки смеси **С** предварительно определяют положение точки **С'**, характеризующей условное состояние смеси. Для этого проводят штриховую линию **ВН** и по формуле (17) находят удельную энтальпию  $I_{c'}$ , кДж/кг.

Условная точка смеси **С'** находится на пересечении линии **ВН** и  $I_{c'} = const$  (рис. 6). Через точку **С'** проводим  $d_{c'} = const$  до пересечения в точке **С** с адиабатой  $I_o$  процесса увлажнения. Параметры точки **С** являются искомыми параметрами смеси воздуха перед камерой орошения.

Положение точки **К**, характеризующей состояние подогретого наружного воздуха, определяем из условия, что его влагосодержание равно влагосодержанию наружного воздуха  $d_n$ . Кроме того, точка **К** должна лежать на одной прямой с точками **С** и **В**. Через точки **В** и **С** проводим прямую линию, а через точку **Н** – линию  $d_n = const$ , на их пересечении находим положение точки

**К.** Тепловую нагрузку воздухонагревателя первого подогрева определяем по формуле:

$$Q_1 = 0,278G_H(I_K - I_H). \quad (19)$$

Тепловую нагрузку воздухонагревателя второго подогрева определяем по формуле (10), количество испарившейся воды в камере орошения – по формуле

$$M_o = G(d_o - d_c)10^{-3}. \quad (20)$$

**Пример №4.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха для холодного периода года для помещения общественного здания при схеме обработки воздуха с первой рециркуляцией. Определить расходы теплоты и холода, необходимые для обработки воздуха, и количество испарившейся воды при следующих исходных данных [5]:  $t_H = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_H = -24,3$  кДж/кг;  $t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\phi_B = 45 \text{ } \%$ ;  $Q_n = 60000$  Вт;  $M_{\text{вл}} = 40$  кг/ч;  $G = 37297$  кг/ч;  $G_H = 22378$  кг/ч;  $G_p = 14919$  кг/ч.

**Решение.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 6) наносим точки **Н** и **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха.

2. По формуле (2) определяем угловой коэффициент луча процесса:

$$\varepsilon_x = (3,6 \cdot 60000) / 40 = 5400 \text{ кДж/кг}.$$

3. Через точку **В** на  $I-d$ -диаграмме проводим луч процесса в помещении.

4. Определяем ассимилирующую способность приточного воздуха по влаге по формуле (7):

$$\Delta d = 40 / 37297 \cdot 10^3 = 1,07 \text{ г/кг}.$$

5. Из формулы (8) находим влагосодержание приточного воздуха:

$$d_n = 6,7 - 1,07 = 5,63 \text{ г/кг}.$$

6. На пересечении линии  $d_n = const$  с лучом процесса в помещении определяем параметры приточного воздуха:  $d_n = 5,63$  г/кг;  $t_n = 17,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_n = 32$  кДж/кг;  $\phi_n = 46 \text{ } \%$ .

7. Находим параметры воздуха после камеры орошения. Параметры точки **О** следующие:  $d_o = 5,63$  г/кг;  $t_o = 6,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_o = 21,3$  кДж/кг;  $\phi_o = 95 \text{ } \%$ .

8. Определяем удельную энтальпию точки смеси наружного и рециркуляционного воздуха по формуле (17):

$$I_c = 14919 \cdot 36,5 + 22 \cdot 378 (-24,3) / 37297 = 0,02 \text{ кДж/кг.}$$

На пересечении линии **НВ** и  $I_c = const$  находим положение точки смеси **С**. Точка смеси находится ниже кривой  $\phi = 100 \%$ , поэтому правомерен вариант подмешивания рециркуляционного воздуха после воздухонагревателя первого подогрева. Положение точки, полученной на пересечении линии **НВ** и  $I_c = const$ , соответствует условной точке смеси **С'** (рис. 6).

9. Находим искомую точку смеси **С** на пересечении  $d_c = const$  и адиабаты  $I_o = const$ . Параметры этой точки следующие:  $d_c = 2,8$  г/кг;  $I_c = 21,3$  кДж/кг;  $\phi_c = 28 \%$ ;  $t_c = 13,8$  °С.

10. Определяем параметры воздуха после воздухонагревателя второго подогрева – точка **К**. Для этого проводим через точки **В** и **С** прямую линию, а через точку **Н** – линию  $d_n = const$ . Параметры воздуха после воздухонагревателя второго подогрева:  $d_k = 0,2$  г/кг;  $\phi_k = 5 \%$ ;  $t_k = 9,5$  °С;  $I_k = 10,4$  кДж/кг.

11. Расход теплоты в воздухонагревателе первого подогрева определяем по формуле (19):

$$Q_1 = 0,278 \cdot 22378 [10,4 - (-24,3)] = 215870 \text{ Вт.}$$

12. Расход теплоты на нагрев воздуха в воздухонагревателе второго подогрева определяем по формуле (10):

$$Q_2 = 0,278 \cdot 37297 (32 - 21,3) = 110940 \text{ Вт.}$$

13. Определяем количество воды, испарившейся в камере орошения, по формуле (20) [5]:

$$M_o = 37297 (5,63 - 2,8) 0,001 = 105,5 \text{ кг/ч.}$$

#### 4. СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЯМИ

Система кондиционирования воздуха с первой и второй рециркуляциями (рис. 7) относится к специальным схемам, и ее применение должно быть

обосновано. Такая система обеспечивает еще большую экономию теплоты и холода, чем система с одной рециркуляцией. В большинстве случаев отпадает необходимость в подогреве воздуха в воздухонагревателе второго подогрева в теплый период года. Вместе с тем требуется более глубокое охлаждение воздуха в камере орошения, что не всегда возможно. Такая схема не применяется, когда продолжение линии, соединяющей точки с параметрами рециркуляционного и параметрами приточного воздуха, не пересекается с кривой  $\phi = 95\%$  или пересекает ее в области отрицательных значений температур [5].

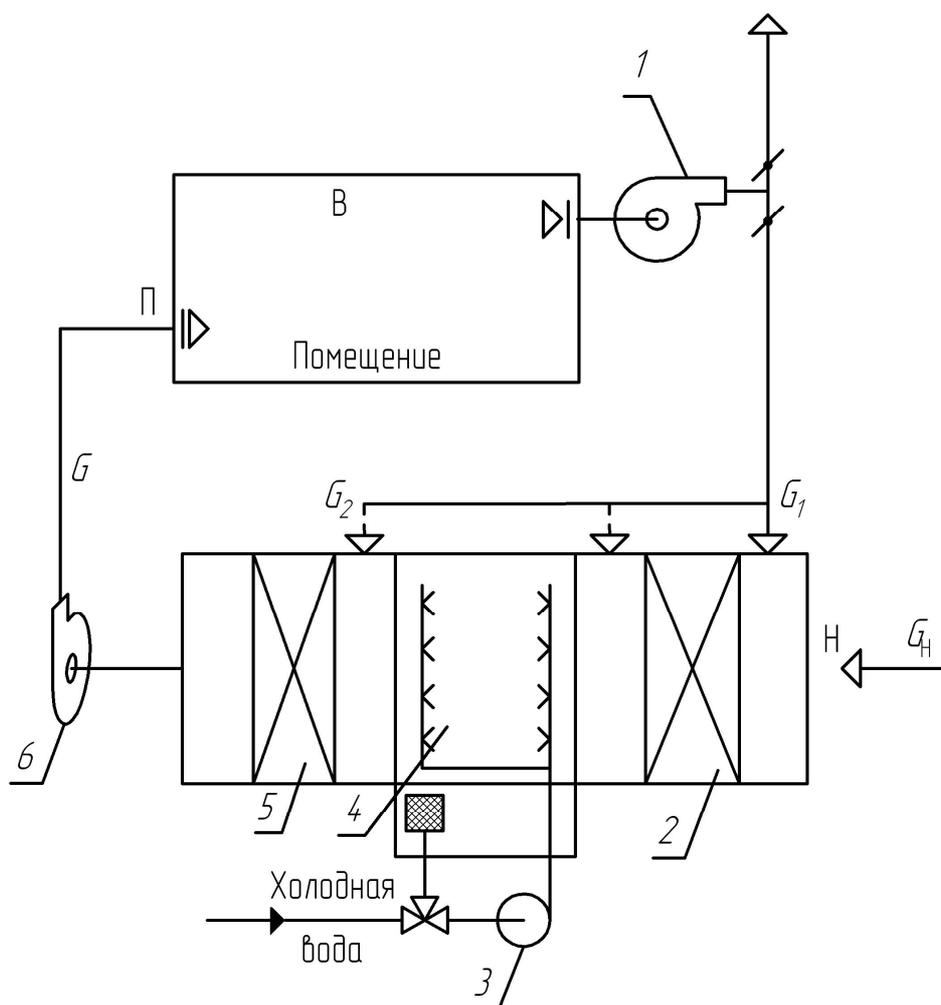


Рис. 7. Схема системы кондиционирования воздуха с применением первой и второй рециркуляции:

- 1 – рециркуляционный вентилятор; 2 – воздухонагреватель 1-го подогрева;
- 3 – насос; 4 – камера орошения; 5 – воздухонагреватель 2-го подогрева;
- 6 – вентиляционный агрегат кондиционера

В холодный период смесь наружного и рециркуляционного воздуха нагревается в воздухонагревателе первого подогрева, обрабатывается в камере

орошения. После камеры орошения добавляется еще часть рециркуляционного воздуха (вторая рециркуляция). Весь воздух проходит через воздухонагреватель второго подогрева и вентилятором подается в обслуживаемое помещение. В теплый период смесь наружного воздуха и воздуха, подаваемого в первую рециркуляцию, обрабатывается в камере орошения. После обработки подмешивается воздух второй рециркуляции с таким расчетом, чтобы отпадала необходимость в работе воздухонагревателя второго подогрева.

**Задача №5.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха для теплого периода года при схеме его обработки с первой и второй рециркуляциями. Определить расходы приточного и рециркуляционного воздуха и расход холода для охлаждения и осушки воздуха.

**Исходные данные** (Приложение А). Параметры наружного воздуха: температура  $t_n$ , °C, удельная энтальпия  $I_n$ , кДж/кг; избыточная теплота  $Q_{п}$ , Вт, избыточные влаговыделения в помещении  $M_{вл}$ , кг/ч; температура приточного воздуха  $t_{п}$ , °C; параметры внутреннего воздуха: температура  $t_v$ , °C (для всех вариантов  $t_v = 23$  °C) и относительная влажность  $\phi_v$ , % (для всех вариантов  $\phi_v = 50$  %) [5].

**Порядок расчета и построения.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 8) наносим точки **Н** и **В**, соответствующие расчетным параметрам наружного и внутреннего воздуха.

2. По величине тепло- и влагоизбытков определяем по формуле (2) угловой коэффициент луча процесса  $\varepsilon$ .

3. Через точку **В** проводим луч процесса до пересечения с изотермой приточного воздуха, получаем параметры приточного воздуха (точка **П**). Находим положение точек **П'**, **В'**, принимая отрезки **ПП'** и **ВВ'** равными  $1^\circ\text{C}$  при  $d_v = d_{v'}$  и  $d_{п} = d_{п'}$  (рис. 8).

4. Определяем параметры воздуха, прошедшего обработку в оросительной камере, проводя через точки **В'** и **П'** прямую до пересечения с кривой  $\phi = 95$  % в точке **О**, соответствующей искомой величине.

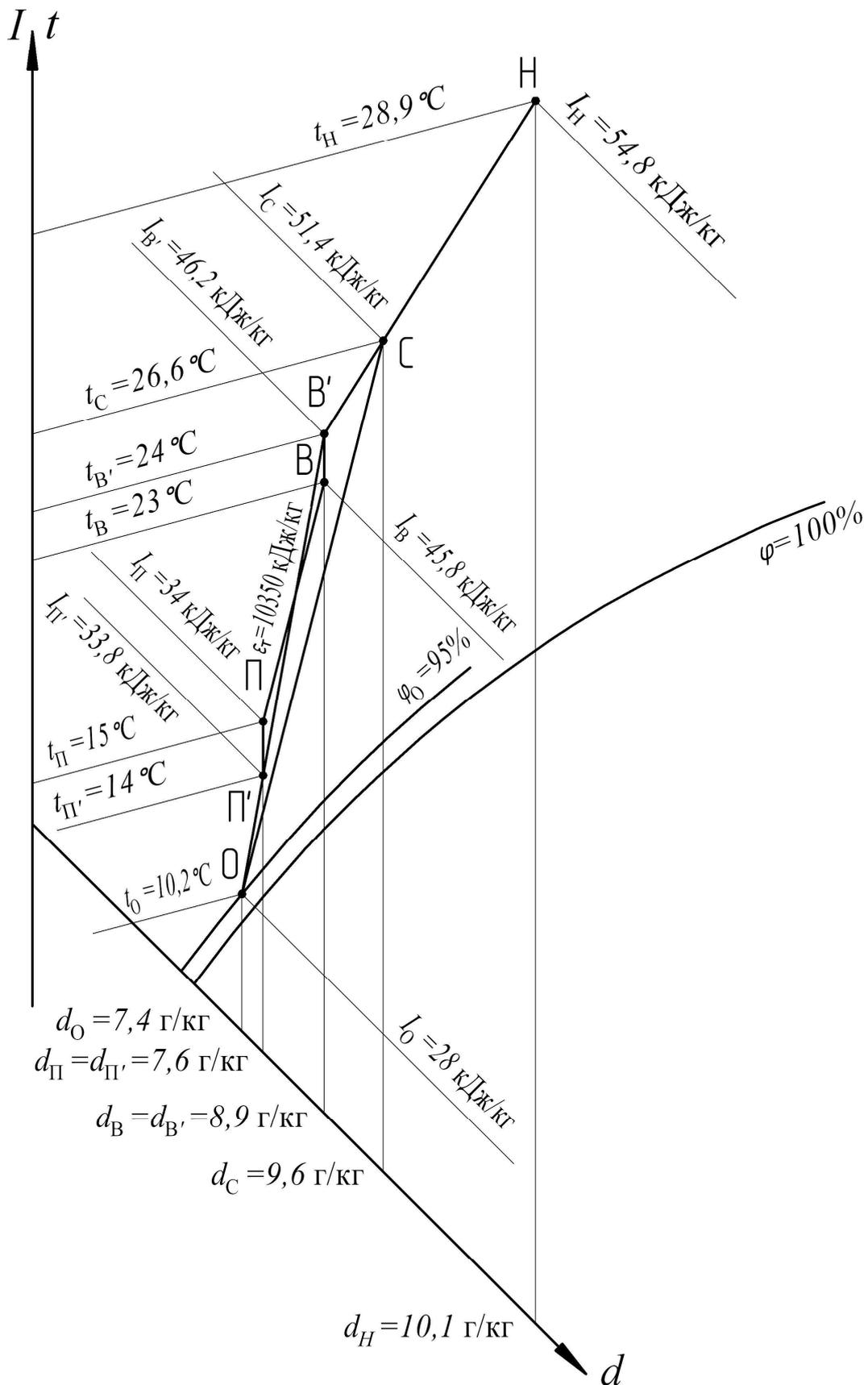


Рис. 8. Построение на  $I$ - $d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в кондиционере с первой и второй рециркуляциями для теплого периода года [5]

5. Находим общее количество приточного воздуха  $G$ , кг/ч, по формуле (3).

6. Определяем расход воздуха второй рециркуляции  $G_2$ , кг/ч, по формуле:

$$G_2 = G \frac{I_{п'} - I_o}{I_{в'} - I_o}. \quad (21)$$

7. Находим расход воздуха, прошедшего через оросительную камеру  $G_o$ , кг/ч, по формуле:

$$G_o = G - G_2. \quad (22)$$

Количество воздуха первой рециркуляции  $G_1$ , кг/ч, находим по формуле:

$$G_1 = G_o - G_n, \quad (23)$$

где  $G_n$  – расход наружного воздуха, определяемый по формуле (12).

9. Определяем удельную энтальпию смеси наружного воздуха и воздуха первой рециркуляции  $I_c$ , кДж/кг, по формуле:

$$I_c = (G_n I_n + G_1 I_{в'}) / G_o. \quad (24)$$

10. На пересечении линий  $I_c = const$  и **ВЧ** находим положение точки смеси **С**.

11. Определяем расход холода  $Q_x$ , Вт, для охлаждения и осушки воздуха по формуле (15).

**Пример №5.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха для теплого периода года для помещения общественного здания при схеме обработки воздуха с первой и второй рециркуляциями. Определить расходы, кг/ч, приточного воздуха  $G$ , первой рециркуляции  $G_1$  и второй рециркуляции  $G_2$ , расход холода  $Q_x$ , Вт, при следующих исходных данных [5]:  $t_n = 28,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $I_n = 54,8 \text{ кДж/кг}$ ;  $t_b = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\phi_b = 50 \text{ } \%$ ;  $Q_{п} = 115000 \text{ Вт}$ ;  $M_{вл} = 40 \text{ кг/ч}$ ;  $t_{п} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 8) наносим точки **Н** и **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха. Определяем по формуле (2) угловой коэффициент луча процесса в помещении:

$$\varepsilon_T = 3,6 \cdot 115000 / 40 = 10350 \text{ кДж/кг.}$$

2. Находим положение точек **П** и **В** и положение точки **О**. В результате построения имеем следующие параметры основных точек процесса (рис. 8):

$$\mathbf{B}: t_B = 23 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_B = 50 \%, I_B = 45,8 \text{ кДж/кг}, d_B = 8,9 \text{ г/кг};$$

$$\mathbf{B}' : t_{B'} = 24 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_{B'} = 47 \%, I_{B'} = 46,2 \text{ кДж/кг}, d_{B'} = 8,9 \text{ г/кг};$$

$$\mathbf{П}: t_{\text{п}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_{\text{п}} = 73 \%, I_{\text{п}} = 34,0 \text{ кДж/кг}, d_{\text{п}} = 7,6 \text{ г/кг};$$

$$\mathbf{П}' : t_{\text{п}'} = 14 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_{\text{п}'} = 77 \%, I_{\text{п}'} = 33,8 \text{ кДж/кг}, d_{\text{п}'} = 7,6 \text{ г/кг};$$

$$\mathbf{О}: t_o = 10,2 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_o = 95 \%, I_o = 28,0 \text{ кДж/кг}, d_o = 7,4 \text{ г/кг.}$$

3. Определяем расход приточного воздуха по формуле (3):

$$G = 3,6 \cdot 115000 / (45,8 - 34) = 35085 \text{ кг/ч.}$$

4. По формуле (21) находим расход воздуха второй рециркуляции:

$$G_2 = 35085 \frac{33,8 - 28,0}{46,2 - 28,0} = 11180 \text{ кг/ч.}$$

5. По формуле (22) находим расход воздуха, прошедшего через оросительную камеру:

$$G_o = 35085 - 11180 = 23905 \text{ кг/ч.}$$

6. Находим по формуле (12) расход наружного воздуха:

$$G_{\text{н}} = 0,6 \cdot 23905 = 14343 \text{ кг/ч.}$$

7. Определяем расход воздуха первой рециркуляции по формуле (23):

$$G_1 = 23905 - 14343 = 9562 \text{ кг/ч.}$$

8. По формуле (24) определяем удельную энтальпию смеси наружного воздуха и воздуха первой рециркуляции:

$$I_c = (14343 \cdot 54,8 + 9562 \cdot 46,2) / 23905 = 51,4 \text{ кДж/кг.}$$

9. На  $I$ - $d$ -диаграмме на пересечении линий  $I_c = const$  и **ВН** находим положение точки смеси **С**, параметры которой равны:  $t_c = 26,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_c = 45 \%$ .

10. Определяем по формуле (15) расход холода  $Q_x$ , Вт, для охлаждения и осушки воздуха:

$$Q_x = 0,278 \cdot 23905 (51,4 - 28,0) = 155240 \text{ Вт.}$$

**Задача №6.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха для холодного периода года при схеме его обработки с первой и второй рециркуляциями. Определить расходы теплоты в воздухонагревателе первого и второго подогрева и воды для осуществления процессов нагрева, увлажнения и охлаждения воздуха.

**Исходные данные** (Приложение А). Параметры наружного воздуха: температура  $t_n$ , °C, удельная энтальпия  $I_n$ , кДж/кг; избыточная теплота  $Q_n$ , Вт, избыточные влаговыделения в помещении  $M_{вл}$ , кг/ч; параметры внутреннего воздуха – температура  $t_b$ , °C (для всех вариантов  $t_b = 20$  °C); относительная влажность  $\phi_b$ , % (для всех вариантов  $\phi_b = 45$  %). Расход приточного воздуха  $G$ , кг/ч, расходы воздуха первой рециркуляции  $G_1$ , кг/ч, и второй рециркуляции  $G_2$ , кг/ч, приняты по расчету для теплого периода года [5].

**Порядок расчета и построения.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 9) наносим точки **Н**, **В**, соответствующие состоянию наружного и внутреннего воздуха. Вычисляем угловой коэффициент луча процесса по формуле (2).

2. По формуле (7) определяем ассимилирующую способность приточного воздуха по влаге, а по формуле (12) находим влагосодержание приточного воздуха  $d_n$ , г/кг. Точка **П**, определяющая состояние приточного воздуха, находится на пересечении линии  $d_n = const$  с лучом процесса в помещении.

3. По формуле (22) определяем расход воздуха, прошедшего через камеру орошения  $G_o$ , кг/ч.

4. Находим положение точки **О**, характеризующей состояние воздуха после камеры орошения перед смешиванием его с воздухом второй рециркуляции, для чего определяем влагосодержание воздуха после камеры орошения по формуле:

$$d_o = (Gd_n - G_2d_b) / G_o. \quad (25)$$

На пересечении линии  $d_o = const$  с кривой  $\phi = 95\%$  определяем положение точки **О**.

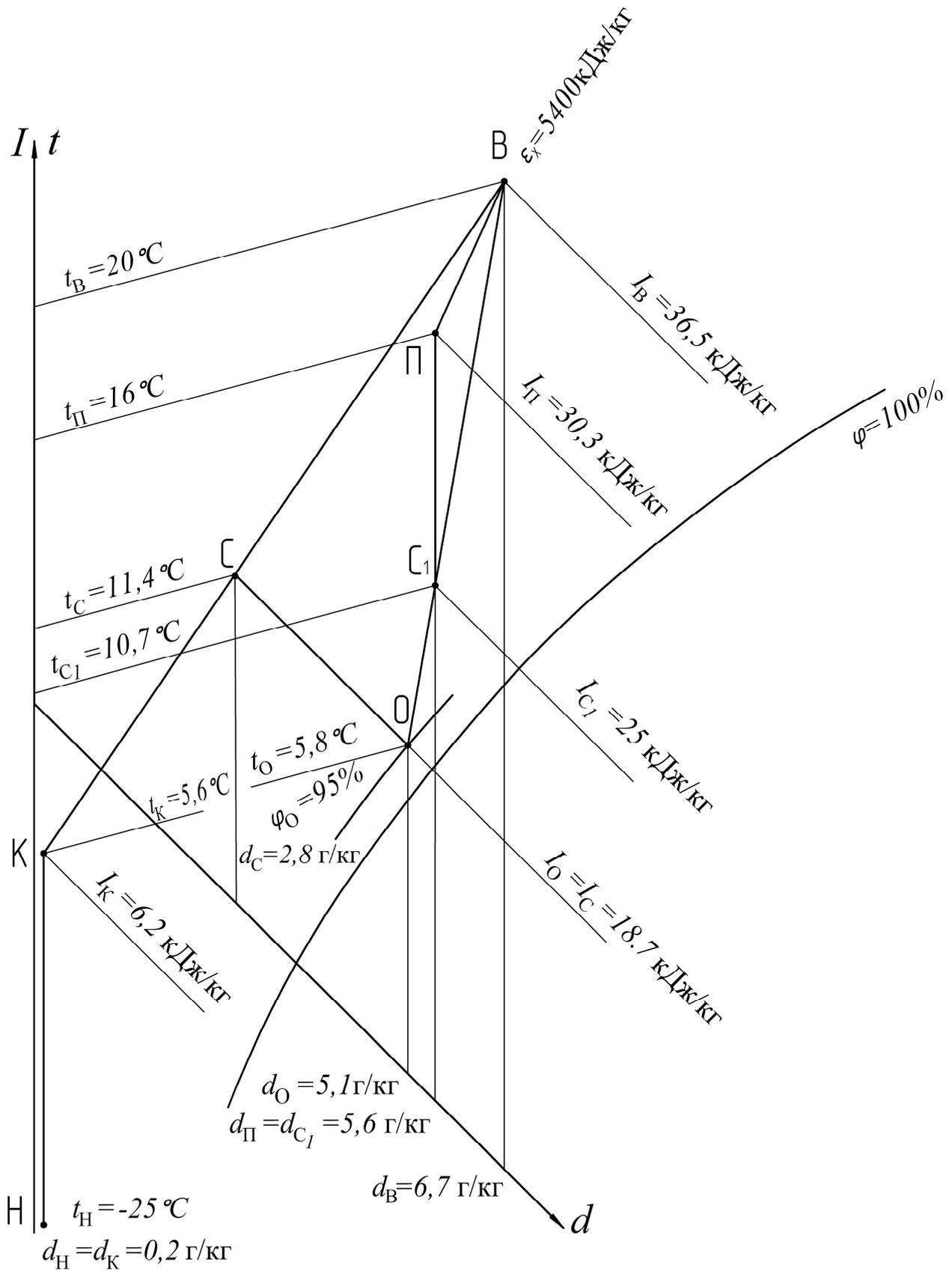


Рис. 9. Построение на  $I$ - $d$ -диаграмме изменения состояния воздуха в кондиционере с первой и второй рециркуляциями для холодного периода года [5]

5. Принимаем расход наружного воздуха  $G_H$ , кг/ч, по расчетам для теплого периода.

6. Определяем влагосодержание смеси воздуха первой рециркуляции и наружного воздуха по формуле:

$$d_c = (G_1 d_b - G_H d_H) / G_o. \quad (26)$$

7. На  $I-d$ -диаграмме на пересечении линий  $d_c = const$  и  $I_c = const$  определяем положение точки смеси **С**.

8. На  $I-d$ -диаграмме на пересечении линий  $d_H = const$  и **BC** находим положение точки **К**, соответствующей параметрам после воздухонагревателя первого подогрева.

9. Определяем параметры воздуха, поступающего в воздухонагреватель второго подогрева. Точка смеси **С<sub>1</sub>** находится на прямой **ВО** в месте пересечения ее с лучом нагревания, проведенном через точку **П**.

10. Вычисляем расход теплоты на нагревание воздуха в воздухонагревателе первого подогрева  $Q_1$ , Вт, по формуле (19) и второго подогрева  $Q_2$ , Вт, по формуле:

$$Q_2 = 0,278G(I_{II} - I_{c_1}). \quad (27)$$

11. Находим расход испарившейся воды в камере орошения  $M_o$ , кг/ч, по формуле (20).

**Пример №6.** Построить на  $I-d$ -диаграмме процесс кондиционирования воздуха в холодный период года для помещения общественного здания при схеме обработки воздуха с первой и второй рециркуляциями. Определить расходы теплоты, Вт, в воздухонагревателе первого подогрева  $Q_1$ , второго подогрева  $Q_2$  и расход воды  $M_o$ , кг/ч, при следующих исходных данных [5]:  $t_H = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_H = -24,3$  кДж/кг;  $t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\phi_B = 45 \text{ } \%$ ;  $Q_{II} = 60000$  Вт;  $M_{вЛ} = 40$  кг/ч;  $G = 35085$  кг/ч;  $G_1 = 9562$  кг/ч;  $G_H = 14343$  кг/ч;  $G_2 = 11180$  кг/ч.

**Решение.**

1. На  $I-d$ -диаграмму (рис. 9) наносим точки **Н** и **В**, соответствующие параметрам наружного и внутреннего воздуха.

2. По формуле (2) вычисляем угловой коэффициент луча процесса в помещении:

$$\varepsilon_x = 3,6 \cdot 60000 / 40 = 5400 \text{ кДж/кг.}$$

3. По формуле (7) определяем ассимилирующую способность приточного воздуха по влаге:

$$\Delta d = 40000 / 35085 = 1,14 \text{ г/кг.}$$

4. Вычисляем влагосодержание приточного воздуха по формуле (8):

$$d_{\text{п}} = 6,7 - 1,14 = 5,56 \text{ г/кг.}$$

На  $I$ - $d$ -диаграмме определяем параметры приточного воздуха:  $t_{\text{п}} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{\text{п}} = 49 \text{ \%}$ ;  $I_{\text{п}} = 30,3 \text{ кДж/кг}$ .

5. По формуле (22) находим расход воздуха, прошедшего через камеру орошения:

$$G_o = 35085 - 11180 = 23905 \text{ кг/ч.}$$

6. По формуле (12) вычисляем расход наружного воздуха:

$$G_{\text{н}} = 0,6 \cdot 23905 = 14343 \text{ кг/ч.}$$

7. Рассчитываем влагосодержание воздуха после камеры орошения по формуле (25):

$$d_o = (35085 \cdot 5,56 - 11180 \cdot 6,7) / 23905 = 5,1 \text{ г/кг.}$$

На  $I$ - $d$ -диаграмме находим параметры воздуха после камеры орошения:  $t_o = 5,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_o = 95 \text{ \%}$ ;  $I_o = 18,7 \text{ кДж/кг}$ .

8. Определяем влагосодержание смеси наружного воздуха и первой рециркуляции по формуле (26):

$$d_c = (9562 \cdot 6,7 + 14343 \cdot 0,2) / 23905 = 2,8 \text{ г/кг.}$$

Точка смеси **С** находится на пересечении линий  $d_c = const$  и  $I_o = const$ . На  $I$ - $d$ -диаграмме находим параметры точки смеси **С**:  $t_c = 11,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_c = 32,5 \text{ \%}$ ;  $I_c = 18,7 \text{ кДж/кг}$ .

9. На пересечении линий  $d_{\text{н}} = const$  и **ВС** находим положение точки **К**, параметры которой равны;  $t_{\text{к}} = 5,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{\text{к}} = 5 \text{ \%}$ ;  $I_{\text{к}} = 6,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $d_{\text{к}} = 0,2 \text{ г/кг}$ .

10. На  $I-d$ -диаграмме находим параметры воздуха, поступающего в воздухонагреватель второго подогрева:  $d_{c_1} = 5,6$  г/кг;  $t_{c_1} = 10,7$  °С;  $j_{c_1} = 70\%$ ;  $I_{c_1} = 25$  кДж/кг.

11. Определяем по формуле (19) расход теплоты на нагревание воздуха в воздухонагревателе первого подогрева:

$$Q_1 = 0,278 \cdot 14343 [6,2 - (-24,3)] = 124\,614 \text{ Вт.}$$

12. Подсчитываем по формуле (27) расход теплоты на нагревание воздуха в воздухонагревателе второго подогрева:

$$Q_2 = 35085 (30,3 - 25) 0,278 = 51694 \text{ Вт.}$$

13. Рассчитываем по формуле (20) расход испарившейся воды в камере орошения [5]:

$$M_o = 35085 (5,1 - 2,8) 10^{-3} = 80,7 \text{ кг/ч.}$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богословский, В.Н.** Кондиционирование воздуха и холодоснабжение [Текст]: Учебник для ВУЗов / В.Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров; Под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с., ил.
2. **Внутренние санитарно-технические устройства.** Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1. [Текст] / В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин и др.; Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера.– 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992. – 319 с.: ил.– (Справочник проектировщика).
3. **Внутренние санитарно-технические устройства.** Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2. [Текст] / Б.В. Баркалов, Н.Н. Павлов, С.С. Амирджанов и др.; Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера.– 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992. – 416 с.: ил.– (Справочник проектировщика).
4. **Нестеренко, А.В.** Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / А.В. Нестеренко – М.: Высшая школа, 1965. – 396 с. : ил.
5. **Сборник задач** по расчету систем кондиционирования микроклимата зданий [Текст] / Э.В. Сазонов – Воронеж.: ВГУ, 1988. – 296 с. : ил.
6. **СНиП 2.04.05–91\***. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – М., ЦИТП Госстроя России, 1991.
7. **СНиП 41-01-2003.** Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – М., ЦИТП Госстроя России, 2004.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Исходные данные [5]

№ ва- риан- та	Параметры наружного воздуха				Теплоизбытки $Q_{п}$ , Вт		Избыточные влаговыведения $M_{вл}$ , кг/ч		Температура приточного воздуха $t_{п}$ , °C
	Температура $t_{н}$ , °C		Удельная энтальпия $I_{н}$ , кДж/кг						
	теплый период года	холодный период года	теплый период года	холодный период года	теплый период года	холод- ный период года	теплый период года	холодный период года	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	33,0	-22	64,5	-20,9	45000	25000	20	20	18
2	32,5	-31	56,9	-30,6	55000	30000	20	20	17
3	28,3	-39	55,7	-38,9	65000	35000	25	25	16
4	27,7	-43	53,2	-43,1	75000	40000	25	25	15
5	27,3	-24	53,2	-23,0	85000	45000	30	30	18
6	31,8	-25	58,6	-24,3	95000	50000	35	35	17
7	33,0	-22	57,8	-20,9	105000	55000	40	40	16
8	28,9	-25	54,8	-24,3	115000	60000	40	40	15
9	26,8	-30	54,9	-29,7	125000	65000	45	45	18
10	31,9	-24	57,4	-23,0	135000	70000	50	50	17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	27,0	-28	52,8	-27,6	145000	75000	50	50	16
12	27,3	-30	54,8	-29,7	155000	80000	55	55	15
13	28,7	-21	56,1	-19,7	165000	85000	60	60	18
14	28,1	-31	56,9	-30,6	175000	90000	65	65	17
15	30,2	-15	59,5	-13,0	185000	95000	65	65	16
16	30,8	-19	63,6	-17,6	195000	100000	70	70	15
17	29,7	-27	55,3	-26,8	205000	105000	75	75	18
18	28,4	-35	53,6	-35,2	215000	110000	75	75	17
19	24,8	-25	51,5	-24,3	225000	125000	80	80	16
20	26,4	-19	57,4	-17,6	235000	120000	85	85	15
21	25,9	-25	53,6	-24,3	245000	125000	90	90	18
22	28,5	-25	54,0	-24,3	225000	115000	80	80	17
23	28,6	-18	62,0	-16,3	205000	105000	75	75	16
24	27,7	-37	53,6	-36,8	185000	95000	65	65	15
25	26,3	-34	53,2	-33,5	165000	85000	60	60	18
26	27,3	-27	53,6	-26,8	145000	75000	50	50	17

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Соотношение между некоторыми единицами физических величин МКГСС и единицами СИ

Наименование величины	Единица				Соотношение единиц
	МКГСС		СИ		
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
1	2	3	4	5	6
Длина	метр	м	метр	м	основная единица
Техническая единица массы (т.е.м.)	Килограмм- сила-секунда в квадрате на метр	$\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}$	килограмм	кг	$1 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м} = 9,81 \text{ кг}$
Время	Секунда	с	секунда	с	основная единица
Сила	Килограмм- сила	кгс	ньютон	Н	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$
Плотность	Килограмм- сила-секунда в квадрате на метр в четвертой степени	$\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	Килограмм на кубический метр	$\text{кг}/\text{м}^3$	$1 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4 = 9,81 \text{ кг}/\text{м}^3$

1	2	3	4	5	6
Давление	Килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см <sup>2</sup>	Паскаль	Па	1 кгс/см <sup>2</sup> = 9,81 · 10 <sup>4</sup> Па ≈ 0,1 МПа
	Миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	Паскаль	Па	1 мм вод. ст. = 9,81 Па ≈ 10 Па
	Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	Паскаль	Па	1 мм рт. ст. = 133,322 Па
Работа (энергия)	Килограмм-сила-метр	кгс · м	Джоуль	Дж	1 кгс · м = 9,81 Дж ≈ 10 Дж
Количество теплоты	Калория килокалория	кал ккал	Джоуль	Дж	1 кал = 4,19 Дж 1 ккал = 4200 Дж = 4,19 кДж
Температура	градус Цельсия	°С	градус Кельвина	°К	$T^{\circ}\text{К} = T^{\circ}\text{С} + 273,15^{\circ}$
Мощность	Килограмм-сила-метр в секунду	кгс м/с	Ватт	Вт	1 кгс м/с = 9,81 Вт ≈ 10 Вт
	Килокалория в час	ккал/ч			1 ккал/ч = 1,163 Вт
Удельная теплоемкость	Килокалория на килограмм-градус Цельсия	ккал/(кг·°С)	Джоуль на килограмм-кельвин	Дж/кг К	1 ккал/(кг·°С) = 4,19 · 10 <sup>3</sup> Дж/(кг · К)
Угловая скорость вращения	Обороты в минуту	об/мин	Радан в секунду	рад/с	1 об/мин = 0,105 рад/с

**Юрий Владимирович Осипов**

**Евгений Сергеевич Козлов**

**РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА В УСТАНОВКАХ СИСТЕМ  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

Методические указания к расчетно-графической работе по дисциплине «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение» для студентов специальности 140104.65 Промышленная теплоэнергетика очной и заочной форм обучения.

Рецензент: проф., д.т.н. Дыскин Л.М.

Подписано к печати \_\_\_\_\_, формат 60x90,1/16,

Бумага газетная, уч. изд. л. – \_\_\_\_\_, усл. печ. л. – \_\_\_\_\_,

Тираж 100 экз., заказ № \_\_\_\_\_.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
603950, Н. Новгород, ул. Ильинская, 65

Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н. Новгород, ул. Ильинская, 65