

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ .....	6
1.1. Физико-математическое описание тепломассообмена в двухзонном вентилируемом помещении .....	6
1.2. Общая математическая модель вентилируемого помещения с двумя контрольными объемами.....	9
1.3. Примеры математических моделей тепломассообмена в вентилируемых помещениях с двумя контрольными объемами .....	13
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ ДВУХЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ.....	24
2.1. Вывод формулы для определения воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения .....	24
2.2. Обоснование отдельных допущений.....	28
2.3. Лучистый теплообмен между контрольными объемами.....	29
2.4. Тепловлажностные процессы на $I-d$ -диаграмме при двухзонной математической модели вентилируемого помещения.....	34
2.5. Определение размеров и числа приточных струй при подаче воздуха воздухораспределителями, расположенными в верхнем КО.....	40
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	45
3.1. Цель и условия проведения экспериментальных исследований. Описание объектов исследования .....	45
3.2. Методика проведения эксперимента.....	53
3.3. Результаты исследований и их анализ .....	54
4. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ .....	56
4.1. Методические основы расчета воздухообмена общеобменной вентиляции .....	56
4.2. Критерии оценки схем организации воздухообмена .....	59
4.3. Эффективность расчета требуемого воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения .....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	65
Библиографический список .....	67
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	72
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	74

## ВВЕДЕНИЕ

Задача определения воздухообмена достаточно изучена в работах [1–10]. В настоящее время методы расчета воздухообмена позволяют с определенной точностью рассчитывать необходимый расход приточного воздуха для ассимиляции избытков вредных выделений.

В работе представлен усовершенствованный расчет воздухообмена методом позонных балансов с учетом процессов тепло- и массообмена в вентилируемом помещении. Предлагаемый метод позволяет не только находить воздухообмен, но и решать более широкий круг задач вентиляции помещений.

Ежегодные затраты на устройство и эксплуатацию систем вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях зданий различного назначения очень велики, поэтому повышение эффективности вентиляции представляется весьма актуальным.

Эффективность вентиляции главным образом зависит от схемы организации воздухообмена (СОВ). Традиционные методы расчета воздухообмена по рекомендациям существующих СП не охватывают всего разнообразия факторов, влияющих на тепломассообмен в вентилируемом помещении, а также не учитывают СОВ, что приводит к отклонению параметров воздуха в рабочей зоне помещения от заданных значений.

В то же время теория тепломассообмена в помещении разработана без достаточного учета влияния вентиляционных процессов в нем. Выбор наиболее рационального способа организации воздухообмена для обеспечения требуемых параметров воздуха необходимо проводить с учетом факторов, влияющих на тепловоздушные процессы в вентилируемом помещении.

Разработаны методические основы физически обоснованного метода расчета воздухообмена в помещениях различного назначения, с максимальным учетом всех факторов, влияющих на тепловоздушные процессы в вентилируемом объеме, что позволит повысить эффективность работы общеобменной вентиляции. Проведен анализ закономерностей перемещения потоков воздуха, теплоты и вредных выделений в вентилируемом помещении на базе двух характерных контрольных объемов (КО). Разработаны: методика для количественной оценки распределения потоков вредных выделений по двум контрольным объемам вентилируемого помещения; математические модели вентилируемого помещения, состоящие из двух контрольных объемов с учетом вторичного тепломассообмена между верхним и

нижним контрольными объемами; основные положения методики оценки параметров воздуха в рабочей (обслуживаемой) зоне с использованием  $I-d$ -диаграммы, а также подборки критериев для оценки и выбора рациональной СОВ при общеобменной вентиляции; математические модели вентилируемого помещения, позволяющие рассчитать требуемый воздухообмен при более полном учете тепловоздушных процессов, влияющих на распределение параметров воздуха ( $t, d, I, C, v$ ) в нижнем КО и по вентилируемому объему в целом; методика определения коэффициента облученности при лучистом теплообмене между нагретыми поверхностями верхнего и нижнего КО при двухзонной модели вентилируемого помещения. Проанализирована физическая картина распределения воздушных и тепловых потоков в вентилируемом помещении с произвольно расположенными источниками теплоты и других выделений. Предложены критерии оптимизации, в том числе уточненный коэффициент эффективности воздухообмена, для выбора оптимальной СОВ. Оценено влияние вторичного лучистого теплообмена в помещении на величину требуемого воздухообмена.

Предложен способ построения процессов изменения состояния воздуха на  $I-d$ -диаграмме. Способ позволяет при заданной схеме организации воздухообмена уточнять параметры приточного воздуха для обеспечения требуемых параметров воздуха в обслуживаемой зоне — это прямая задача, а при заданных параметрах притока уточнять параметры воздуха в обслуживаемой зоне (нижний КО) — обратная задача. Рассмотрена возможность использования начального участка приточной струи по схеме подачи сверху вниз для ассимиляции теплоизбытков в обслуживаемой зоне.

Разработан инженерный способ расчета требуемого воздухообмена по методу позонных балансов для двухзонной модели помещения с достаточно полным учетом всех факторов, влияющих на тепловоздушные процессы в помещении, учитывающих распределение потоков теплоты и массы по КО помещения.

С использованием математического моделирования и экспериментальных методов исследования выявлены закономерности расчета для формирования воздухообмена в помещениях различного назначения.

# 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ

## 1.1. Физико-математическое описание тепломассообмена в двухзонном вентилируемом помещении

Санитарно-гигиенические и технологические требования, предъявляемые к состоянию воздушной среды помещения, сводятся к обеспечению требуемых параметров воздуха в рабочей зоне помещения: температуры, относительной влажности, подвижности воздуха и концентрации вредных выделений.

В настоящей работе сделана попытка усовершенствования расчета требуемого воздухообмена методом позонных балансов с учетом процессов тепло- и массообмена в вентилируемом помещении в стационарном режиме.

В общей постановке задачи вентилируемое помещение рассматривается как элемент здания. Основное внимание уделено процессам, происходящим внутри помещения (внутренняя задача воздушного режима здания — ВРЗ). Рассматриваются процессы, связанные с перемещением воздуха в объеме помещения: струйные течения в замкнутом пространстве, распределение температуры и подвижности воздуха, диффузия примесей в вентилируемом помещении.

Помещение также рассматривается как объект, состоящий из двух контрольных объемов, в каждом из которых могут быть приток и удаление воздуха, поглощение или выделение вредных веществ. К контрольным объемам относятся области пространства помещения. Через границы КО могут проходить потоки вещества и энергии, в пределах КО потоки могут поглощаться или выделяться, а на границах КО могут происходить внешние воздействия.

Поверхность КО принято называть контрольной поверхностью (КП).

Нижний контрольный объем (нижний КО) — это область, где необходимо обеспечить требуемые параметры микроклимата согласно СП (в зависимости от вида помещения) [1]. Верхний контрольный объем (верхний КО) — область, где величины параметров воздуха косвенно влияют на микроклимат в нижнем КО. Параметры воздуха здесь условно приняты однородными (это не исключает возможности учета температурного расслоения воздуха в верхнем КО).

Деление вентилируемого помещения на два контрольных объема — условное. Высоту нижнего КО предлагается принимать равной высоте рабочей зоны для данного типа помещения [11].

Тепловоздушные процессы в КО описываются законами сохранения (массы и энергии).

Закон сохранения *массы* в КО выражается следующим образом: сумма потоков массы с учетом знака равняется нулю (рис. 1.1).

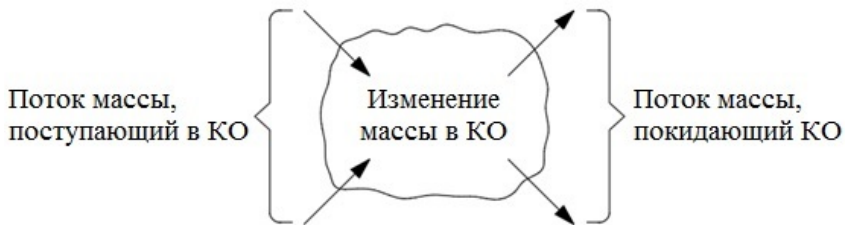


Рис. 1.1. Материальный баланс КО

Закон сохранения *энергии* для КО выражается так: сумма потоков энергии с учетом знака равняется нулю (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Энергетический баланс КО

При рассмотрении вентилируемых помещений, где доминируют теплоизбытки, энергия выражается в форме теплоты, которая передается теплопроводностью, конвекцией или излучением. В помещении при обмене теплом участвует ряд элементов: воздух, внутренние поверхности ограждающих конструкций, объемы струй воздуха, внешняя среда, технологическое оборудование и т.п.

Между перечисленными элементами происходят следующие тепло-массообменные процессы: конвективный (К) теплообмен возникает между воздухом и нагретыми или охлажденными поверхностями стен или оборудования; лучистый (Л) — между отдельными поверхностями; кондуктивный (Т) — на внутренних поверхностях оборудования. Тепловой баланс любой поверхности в помещении (рис. 1.3) может быть представлен на основе закона сохранения энергии следующим уравнением [12]:

$$Л_i + К_i + Т_i = 0. \quad (1.1)$$

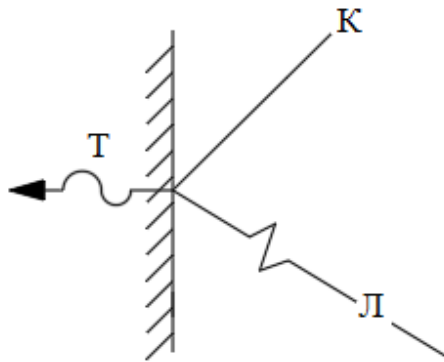


Рис. 1.3. Тепловой баланс поверхности [20]

При этом в подобных помещениях наблюдается непрерывное обновление воздуха с расслоением его на менее и более нагретые области. Более нагретый воздух ( $G_k$ ) поднимается к потолку и удаляется ( $G_{уд}$ ) через вытяжные отверстия. «Тепловая подушка» возникает, когда расход воздуха в конвективных потоках больше количества удаляемого воздуха ( $G_k > G_{уд}$ ) [13–15].

При подаче приточного воздуха в помещение в соответствии с теорией струйных течений импульс струи остается постоянной величиной. Струя, развиваясь, вовлекает в движение окружающие массы воздуха. Расход струи увеличивается, скорость движения воздуха уменьшается.

При наличии в помещении теплоисточников конечных размеров (например отопительных приборов) или источников, распределенных по площади (например зрители в зале театра), в вентилируемом помещении возникают конвективные потоки воздуха, которые также влияют на микроклимат в рабочей зоне помещения.

На тепловоздушные процессы в вентилируемых помещениях воздействуют также всасывающие факелы, влияние которых зависит от объемно-планировочных решений помещения и количества удаляемого механической вентиляцией воздуха.

В общем случае, наряду с перечисленными источниками теплоты, вентилируемое помещение характеризуется теплопотерями, теплопоступлениями, поступлениями других вредных веществ или их поглощением, а также потоками инфильтрационного (или эксфильтрационного) воздуха.

Тепловоздушный режим вентилируемого помещения характеризуется неравномерным распределением тепловых и воздушных потоков через отдельные ограждения, а также лучистым теплообменом между отдельными КО, которые описываются большим числом уравнений, совместное решение которых представляет значительные трудности [16].

Для достоверного описания исследуемого процесса и получения необходимой информации о нем составляются уравнения материального и энергетического балансов в конечном виде для помещения с теплоизбытками или другими доминирующими вредными выделениями. Последние составляются для каждого КО отдельно.

## 1.2. Общая математическая модель вентилируемого помещения с двумя контрольными объемами

Математическое моделирование физического процесса, происходящего внутри помещения, позволяет решить одну из основных задач вентиляции: определить воздухообмен для обеспечения нормируемых параметров воздуха в рабочей зоне помещения.

В общем случае контрольные объемы вентилируемого помещения представляются как ограниченное пространство внутри помещения с произвольно рассредоточенными по ним источниками и стоками вредных выделений  $M(V)$  и потоков вентиляционного воздуха  $G(V)$ . Члены, описывающие потоки через КП, в работе обозначены следующими символами: потоки вредных выделений  $M(F)$  и потоки воздушных масс  $G(F)$ .

На рис. 1.4 представлена общая схема тепломассообмена в вентилируемом помещении с двумя КО. Исходя из этого, общий вид уравнений балансов по расходу и вредным выделениям для вентилируемого помещения с двумя КО следующий:

для верхнего КО:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{V_{\text{ВКО}}} G(V_{\text{ВКО}}) dV_{\text{ВКО}} + \int_{F_{\text{ВКО}}} G(F_{\text{ВКО}}) dF_{\text{ВКО}} = 0; \\ \int_{V_{\text{ВКО}}} M(V_{\text{ВКО}}) dV_{\text{ВКО}} + \int_{F_{\text{ВКО}}} M(F_{\text{ВКО}}) dF_{\text{ВКО}} + \int_{V_{\text{ВКО}}} G(V_{\text{ВКО}}) \Pi(V_{\text{ВКО}}) dV_{\text{ВКО}} + \\ + \int_{F_{\text{ВКО}}} G(F_{\text{ВКО}}) \Pi(F_{\text{ВКО}}) dF_{\text{ВКО}} = 0; \end{array} \right. \quad (1.2)$$

для нижнего КО:

$$\left\{ \begin{aligned} & \int_{V_{\text{нко}}} G(V_{\text{нко}}) dV_{\text{нко}} + \int_{F_{\text{нко}}} G(F_{\text{нко}}) dF_{\text{нко}} = 0; \\ & \int_{V_{\text{нко}}} M(V_{\text{нко}}) dV_{\text{нко}} + \int_{F_{\text{нко}}} M(F_{\text{нко}}) dF_{\text{нко}} + \int_{V_{\text{нко}}} G(V_{\text{нко}}) \Pi(V_{\text{нко}}) dV_{\text{нко}} + \\ & \quad + \int_{F_{\text{нко}}} G(F_{\text{нко}}) \Pi(F_{\text{нко}}) dF_{\text{нко}} = 0. \end{aligned} \right. \quad (1.3)$$

В системах уравнений (1.2)–(1.3) первые члены первых уравнений, а именно  $G(V_{\text{вко}})dV_{\text{вко}}$  и  $G(V_{\text{нко}})dV_{\text{нко}}$  — это расход воздуха, поступающего или уходящего из различных точек КО (общеобменная или местная вентиляция). Вторые члены тех же уравнений  $G(F_{\text{вко}})dF_{\text{вко}}$  и  $G(F_{\text{нко}})dF_{\text{нко}}$  — расходы неорганизованного и организованного воздухообмена через неплотности и отверстия в наружных и внутренних ограждениях КО, а также массообмен между самими КО.

Задача сводится к определению расходов общеобменной вентиляции (притока и вытяжки), а составление уравнений балансов для отдельных КО помещения позволяет находить воздухообмен более обоснованно. При этом необходимо знать функции  $\Pi(V)$ ,  $\Pi(F)$  и  $G(F)$ , которые, как правило, можно определить, используя различного рода приемы.



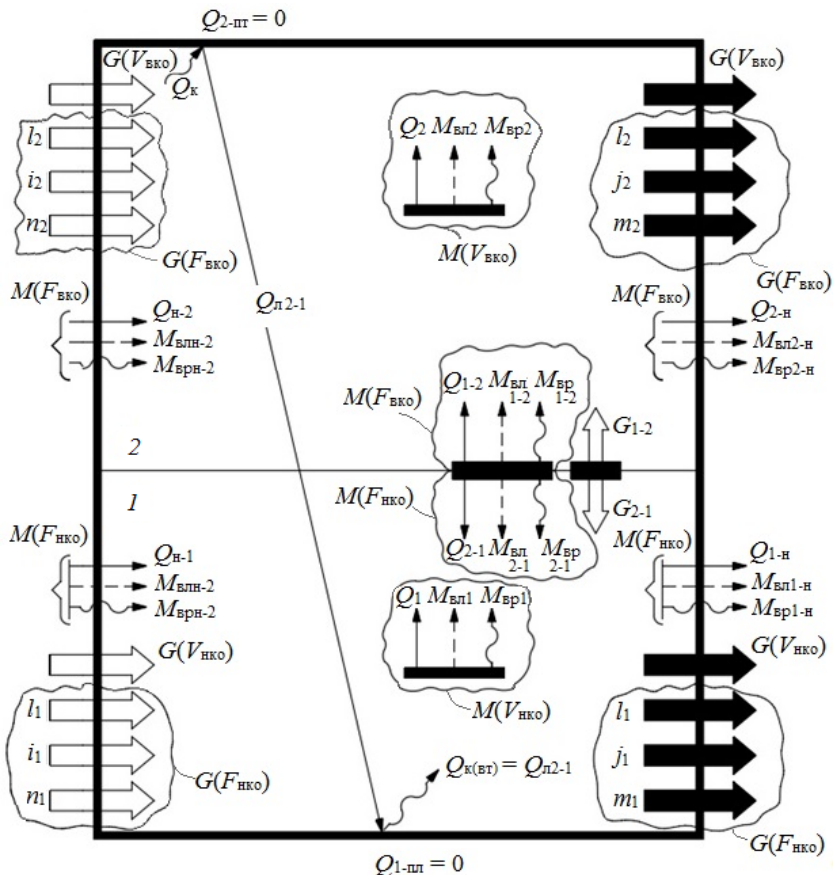


Рис. 1.4. Общая схема тепломассообмена в вентилируемом помещении с двумя КО: 1 — нижний КО; 2 — верхний КО;  $Q_{н-1}$ ,  $Q_{н-2}$  — поступающая теплота из наружной среды соответственно в область НКО и ВКО;  $M_{влн-1}$ ,  $M_{влн-2}$  — влажность, поступающая из наружной среды соответственно в области НКО и ВКО;  $M_{врн-1}$ ,  $M_{врн-2}$  — вредность, поступающая из наружной среды соответственно в области НКО и ВКО;  $Q_1$ ,  $M_{вл1}$ ,  $M_{вр1}$  — теплота, влажность и другие вредности, выделяющиеся в НКО;  $Q_2$ ,  $M_{вл2}$ ,  $M_{вр2}$  — теплота, влажность и другие вредности, выделяющиеся в ВКО;  $Q_{1-2}$ ,  $M_{вл1-2}$ ,  $M_{вр1-2}$  — теплота, влажность и другие вредности, перемещающиеся из НКО в ВКО;  $Q_{2-1}$ ,  $M_{вл2-1}$ ,  $M_{вр2-1}$  — теплота, влажность и другие вредности, перемещающиеся из ВКО в НКО;  $Q_{к(вт)}$  — вторичная конвективная теплота;  $Q_{л2-1}$  — лучистая теплота, поступающая из ВКО в НКО;  $Q_k$  — конвективная теплота;  $Q_{2-пт}$  — теплота, передаваемая из ВКО к потолку

Параметры воздуха в уравнениях (1.2)–(1.3)  $\Pi(V_{\text{вко}})$ ,  $\Pi(V_{\text{нко}})$ ,  $\Pi(F_{\text{вко}})$ ,  $\Pi(F_{\text{нко}})$  в зависимости от метода расчета требуемого воздухообмена меняются (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Параметры притока, вытяжки, перетекания воздуха**

Вредные выделения	Обозначение вредного выделения	Значение параметра воздуха
Теплота, полное	$Q^{\text{пол}}$	$I$
Теплота, явное	$Q^{\text{я}}$	$c_{\text{в}} \cdot t$
Влага	$M^{\text{вл}}$	$d \cdot 10^{-3}$
Газ, пар	$M^{\text{газ}}$	$c_{\text{газ}}/\rho$
Другие	$M^{\text{вп}}$	$c_{\text{вп}}/\rho$

Из общей схемы тепломассообмена в вентилируемом помещении с двумя КО (см. рис. 1.4) следует, что в условиях наличия «тепловой подушки» между верхним и нижним КО помещения происходит теплообмен излучением, подчиняющийся закону Стефана — Больцмана:

$$Q_{\text{л вко-нко}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_{\text{o}} \cdot I_{\text{вко-нко}} \cdot F_{\text{вко}} \left[ \left( \frac{T_{\text{вко}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{нко}}}{100} \right)^4 \right], \quad (1.4)$$

$$T = \frac{\sum F_i \cdot T_i}{\sum F_i}, \quad (1.5)$$

где уравнение (1.5) показывает радиационную температуру.

В подобных случаях, с учетом того что в верхнем КО расположен менее плотный (нагретый) воздух, самопроизвольное разрушение температурного расслоения исключается. При  $P < 5 \cdot 10^{-3}$  в помещении имеется устойчивая стратификация, при  $P > 5 \cdot 10^{-3}$  — неустойчивая [17]

$$P = \frac{(q_{\text{нко}} - q_{\text{o}}) \left( 1 - \frac{29}{M_{\text{г}}} \right)}{(t_{\text{нко}} - t_{\text{o}})}, \quad (1.6)$$

где  $M_{\text{г}}$  — молярный вес газа.

В некоторых случаях расслоение воздуха может быть нарушено вследствие инжектирующего эффекта приточной струи (например при сосредоточенной подаче воздуха в помещении).

Тепломассообмен в виде турбулентного перемешивания происходит на КП двух КО [4; 14]:

$$Q_{\text{ВКО-НКО}} = A_{\text{ЭКВ}} \cdot F_{\text{КП}} (\Pi_{\text{ВКО}} - \Pi_{\text{НКО}}), \quad (1.7)$$

где  $A_{\text{ЭКВ}}$  — коэффициент обмена между КО, в наиболее общей форме является функцией  $A_{\text{ЭКВ}} = f(\epsilon_{\text{НКО}}, \epsilon_{\text{ВКО}}, \Delta\Pi)$ , здесь  $\epsilon_{\text{НКО}}$  и  $\epsilon_{\text{ВКО}}$  — величины удельной кинетической энергии в соответствующем КО:  $\epsilon = f(v_o, \rho, v_{\text{КО}}, N)$ .

На основе вышеизложенного и ввиду большого разнообразия технологических процессов, происходящих внутри помещений, дальнейшая конкретизация математической модели тепловоздушных процессов может быть проведена с учетом их особенностей. Для этого все помещения могут быть сгруппированы по характерным признакам, например, по распределению вредных выделений, интенсивности конвективных потоков и т.д. [36; 41–47].

### **1.3. Примеры математических моделей тепломассообмена в вентилируемых помещениях с двумя контрольными объемами**

Для обеспечения заданных кондиций в рабочей зоне вентилируемого помещения необходимо выбрать рациональную схему общеобменной вентиляции для наиболее характерных случаев распределения вредных выделений по отдельным КО двухзонного вентилируемого помещения. К *первому* случаю относятся помещения, где возникают слабые конвективные потоки или потоки других вредных выделений над источниками (человек, ПК, светильник, медицинское оборудование и т.п.), а также конвективные потоки вблизи холодных или теплых стен. К такому случаю с достаточной точностью можно отнести помещения общественного назначения: аудитории, кабинеты, холлы, жилые помещения, больничные палаты и т.п. *Второй* случай — помещения со значительными избытками вредных выделений. Если эта вредность представлена в форме избытков теплоты, то наиболее рациональная схема общеобменной вентиляции — аэрация. Здесь, как правило, имеются мощные источники теплоты, конвективные потоки от которых поднимаются к потолочной части помещения, «затапливают» его, создавая «тепловую подушку». К *третьему* случаю относятся помещения с равномерным распределением вредных выделений по всему объему помещения — машинные залы тепловых электростанций и т.п.

На рис. 1.5 представлена общая схема тепловоздушных процессов для помещений, относящихся к первому случаю, где основная вредность — это избытки явной теплоты. Свежий воздух в виде струи с расходом  $G_{\text{стр}}$  и температурой  $t_{\text{стр}}$  поступает в нижний КО. Расходы струй над источниками теплоты на высоте нижнего КО и пограничного слоя стены на той же высоте обозначаются соответственно  $G_{\text{ист}(h)}$  и  $G_{\text{в}(h)}$ .

Согласно схеме, изображенной на рис. 1.5, физико-математическое описание тепловоздушных процессов для помещений такого типа имеет следующий вид:

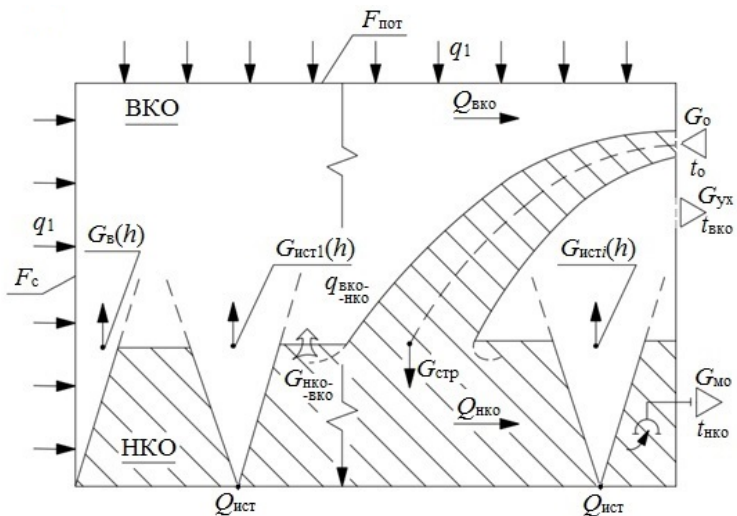
для нижнего КО:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{в}(h)} + G_{\text{стр}} = G_{\text{в}(h)} + \sum_i G_{\text{ист}(h)} + G_{\text{МО}} + G_{\text{НКО-ВКО}} \\ G_{\text{стр}} \cdot t_{\text{стр}} \cdot c_{\text{в}} + \sum_i Q_{\text{ист}(i)} + q_{\text{ВКО-НКО}} + q_{\text{О}} \cdot l \cdot h_{\text{НКО}} + G_{\text{Н}} (H_{\text{ПОМ}} - H_{\text{НКО}}) c_{\text{в}} \cdot t_{\text{Н}} + \\ + Q_{\text{НКО}} = q_{\text{О}} \cdot H_{\text{НКО}} \cdot l + G_{\text{в}(H_{\text{НКО}})} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}(H_{\text{НКО}})} + c_{\text{в}} \sum_i G_{\text{ист}(H_{\text{НКО}})} \cdot t_{\text{ист}(H_{\text{НКО}})} + \\ + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{МО}} \cdot t_{\text{НКО}} + G_{\text{НКО-ВКО}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{НКО}}^{\text{max}} \end{array} \right. \quad (1.8)$$

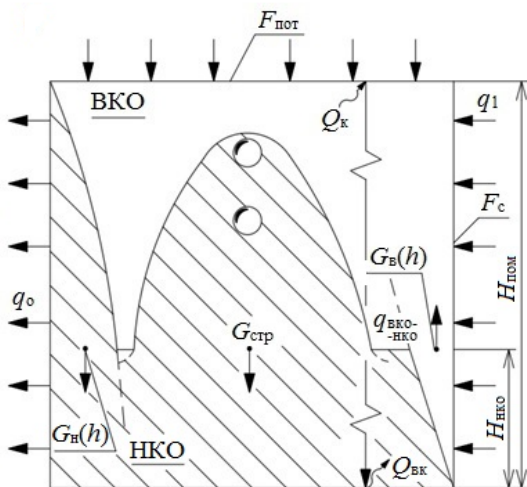
где  $G_{\text{МО}}$  — расход удаляемого воздуха системы местной вытяжной вентиляции;  $H_{\text{ПОМ}}$  — высота вентилируемого помещения;  $l$  — ширина НКО;

для верхнего КО:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{в}(H_{\text{НКО}})} + \sum_i G_{\text{ист}(H_{\text{НКО}})} + G_{\text{О}} + G_{\text{НКО-ВКО}} = G_{\text{стр}} + G_{\text{УХ}} \\ G_{\text{в}(H_{\text{НКО}})} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}(H_{\text{НКО}})} + c_{\text{в}} \sum_i G_{\text{ист}(H_{\text{НКО}})} \cdot t_{\text{ист}(i)} + q_{\text{О}} [l(H - H_{\text{НКО}}) + F_{\text{ПОТ}}] + \\ + G_{\text{О}} \cdot t_{\text{О}} \cdot c_{\text{в}} + Q_{\text{ВКО}} + G_{\text{НКО-ВКО}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{НКО}}^{\text{max}} = q_{\text{ВКО-НКО}} + \\ + q_1 [l(H_{\text{ПОМ}} - H_{\text{НКО}})] + G_{\text{стр}} \cdot t_{\text{стр}} \cdot c_{\text{в}} + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{УХ}} \cdot t_{\text{ВКО}} \end{array} \right. \quad (1.9)$$



*a*



*б*

Рис. 1.5. Общая схема тепловоздушных процессов для вентилируемого помещения с двумя КО (первый случай):  
*a* — продольный разрез; *б* — поперечный разрез;  
 $F_{\text{пот}}$  — площадь потолка;  $G_{\text{ух}}$  — количество уходящего воздуха

Совместное решение систем уравнений (1.8) и (1.9) позволяет находить требуемый воздухообмен более обоснованно для помещений, относящихся к *первому* случаю.

На рис. 1.6 изображена схема тепловоздушных процессов для помещений с мощным источником теплоты в теплый (а) и холодный (б) периоды года.

Математическая модель тепловоздушных процессов для помещений, где возникают слабые конвективные потоки или потоки других вредных выделений над источниками, а также конвективные потоки вблизи холодных или теплых стен в теплый и холодный периоды года, описываются следующими уравнениями:

в *холодный* период:

для нижнего КО:

$$\begin{cases} G_{\text{стр}} - G_{\text{к}} + G_{\text{нкс}} - G_{\text{мо}} - G_{\text{нко-вко}} = 0, \\ c_{\text{в}} \cdot G_{\text{стр}} \cdot t_{\text{стр}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}} + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{нкс}} \cdot t_{\text{вко}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{мо}} \cdot t_{\text{нко}} - \\ - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{нко-вко}} \cdot t_{\text{нко}} + Q_{\text{нко}} + Q_{\text{л}} = 0; \end{cases} \quad (1.10)$$

для верхнего КО:

$$\begin{cases} G_{\text{о}} - G_{\text{стр}} - G_{\text{нкс}} + G_{\text{к}} + G_{\text{нко-вко}} = 0, \\ c_{\text{в}} \cdot G_{\text{о}} \cdot t_{\text{о}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{стр}} \cdot t_{\text{стр}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{нкс}} \cdot t_{\text{нко}} + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{к}} \cdot t_{\text{нко}} + \\ + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{нко-вко}} \cdot t_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}} - Q_{\text{п}} - Q_{\text{л}} = 0; \end{cases} \quad (1.11)$$

в *теплый* период:

для нижнего КО:

$$\begin{cases} G_{\text{стр}} - G_{\text{к}} - G_{\text{мо}} - G_{\text{нко-вко}} - G_{\text{вкс}} = 0, \\ c_{\text{в}} \cdot G_{\text{стр}} \cdot t_{\text{стр}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{к}} \cdot t_{\text{нко}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{мо}} \cdot t_{\text{нко}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{нко-вко}} \cdot t_{\text{нко}} - \\ - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{вкс}} \cdot t_{\text{нко}} + Q_{\text{нко}} - Q_{\text{л}} = 0; \end{cases} \quad (1.12)$$

для верхнего КО:

$$\begin{cases} G_{\text{о}} - G_{\text{стр}} + G_{\text{вкс}} + G_{\text{к}} + G_{\text{нко-вко}} = 0, \\ c_{\text{в}} \cdot G_{\text{о}} \cdot t_{\text{о}} - c_{\text{в}} \cdot G_{\text{стр}} \cdot t_{\text{стр}} + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{вкс}} \cdot t_{\text{нко}} + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{к}} \cdot t_{\text{нко}} + \\ + c_{\text{в}} \cdot G_{\text{нко-вко}} \cdot t_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}} - Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}} = 0. \end{cases} \quad (1.13)$$

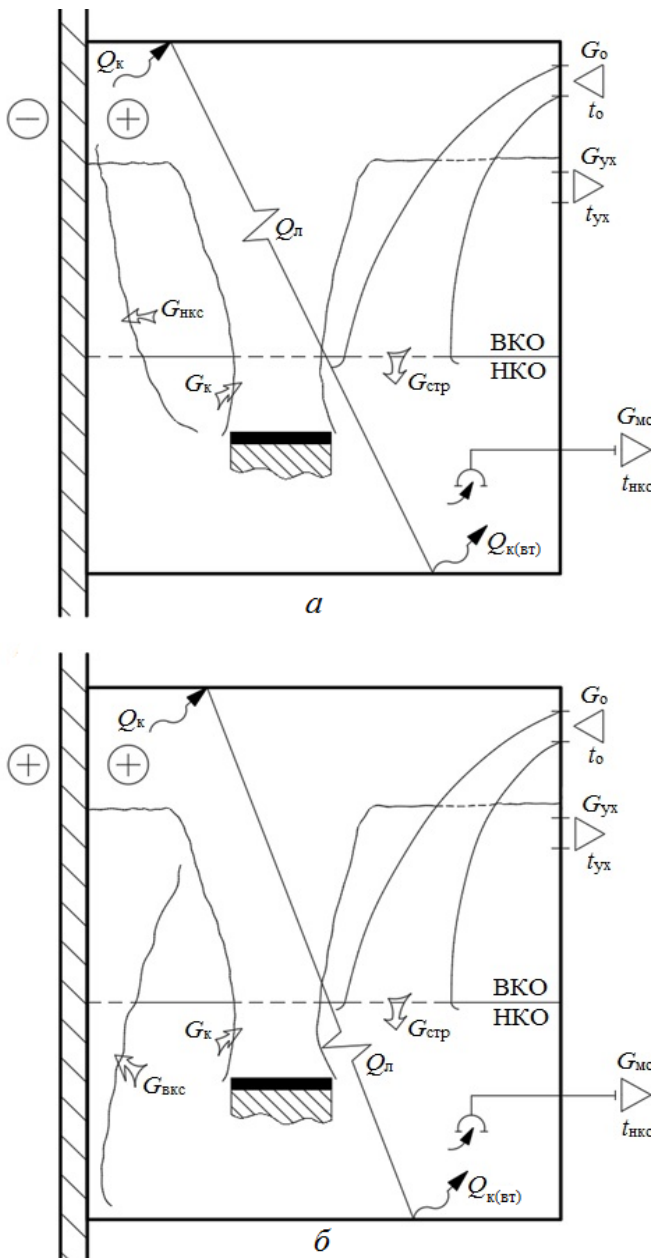


Рис. 1.6. Общая схема тепловоздушных процессов для помещений с мощным локальным источником теплоты в холодный (а) и теплый (б) периоды года;  $G_{\text{нkc}}$  — количество воздуха в ниспадающей конвективной струе;  $Q_{\text{к(вт)}}$  — конвективная вторичная теплота

Совместное решение систем уравнений (1.10) и (1.11) позволяет находить требуемый воздухообмен более обоснованно в теплый и холодный периоды года для помещений, относящихся ко *второму* случаю.

Схема распространения тепловых и воздушных потоков, возникающих в помещениях, относящихся к *третьему* случаю, показана на рис. 1.7.

Математическая модель тепломассообмена для верхнего и нижнего КО в *холодный* период года описывается следующими уравнениями:

для верхнего КО:

$$\begin{cases} G_o - G_{стр1} - G_{стр2} + G_{нко-вко} - G_{нкс} = 0, \\ c_b \cdot G_o \cdot t_o - c_b \cdot G_{стр1} \cdot t_{вко} - c_b \cdot G_{стр2} \cdot t_{вко} + c_b \cdot G_{нко-вко} \cdot t_{нко} - \\ - c_b \cdot G_{нкс} \cdot t_{вко} + Q_{вко} - Q_{л\ вко-нко} = 0; \end{cases} \quad (1.14)$$

для нижнего КО:

$$\begin{cases} G_{стр1} + G_{стр2} - G_{нко-вко} - G_{мо} + G_{нкс} = 0, \\ c_b \cdot G_{стр1} \cdot t_{вко} + c_b \cdot G_{стр2} \cdot t_{вко} - c_b \cdot G_{нко-вко} \cdot t_{нко} + c_b \cdot G_{к} \cdot t_{вко} - \\ - c_b \cdot G_{мо} \cdot t_{нко} + Q_{нко} + Q_{л\ вко-нко} = 0. \end{cases} \quad (1.15)$$

Математическая модель тепломассообмена для *теплого* периода года описывается системой уравнений:

для нижнего КО:

$$\begin{cases} G_{стр1} + G_{стр2} - G_{нко-вко} - G_{мо} - G_{вкс} = 0, \\ c_b \cdot G_{стр1} \cdot t_{вко} + c_b \cdot G_{стр2} \cdot t_{вко} - c_b \cdot G_{нко-вко} \cdot t_{нко} - c_b \cdot G_{мо} \cdot t_{нко} - \\ - c_b \cdot G_{вкс} \cdot t_{нко} + Q_{нко} + Q_{л\ вко-нко} = 0; \end{cases} \quad (1.16)$$

для верхнего КО:

$$\begin{cases} G_o - G_{стр1} - G_{стр2} + G_{нко-вко} + G_{вкс} = 0, \\ c_b \cdot G_o \cdot t_o - c_b \cdot G_{стр1} \cdot t_{вко} - c_b \cdot G_{стр2} \cdot t_{вко} + c_b \cdot G_{нко-вко} \cdot t_{нко} + \\ + c_b \cdot G_{вкс} \cdot t_{нко} + Q_{вко} - Q_{л\ вко-нко} = 0. \end{cases} \quad (1.17)$$



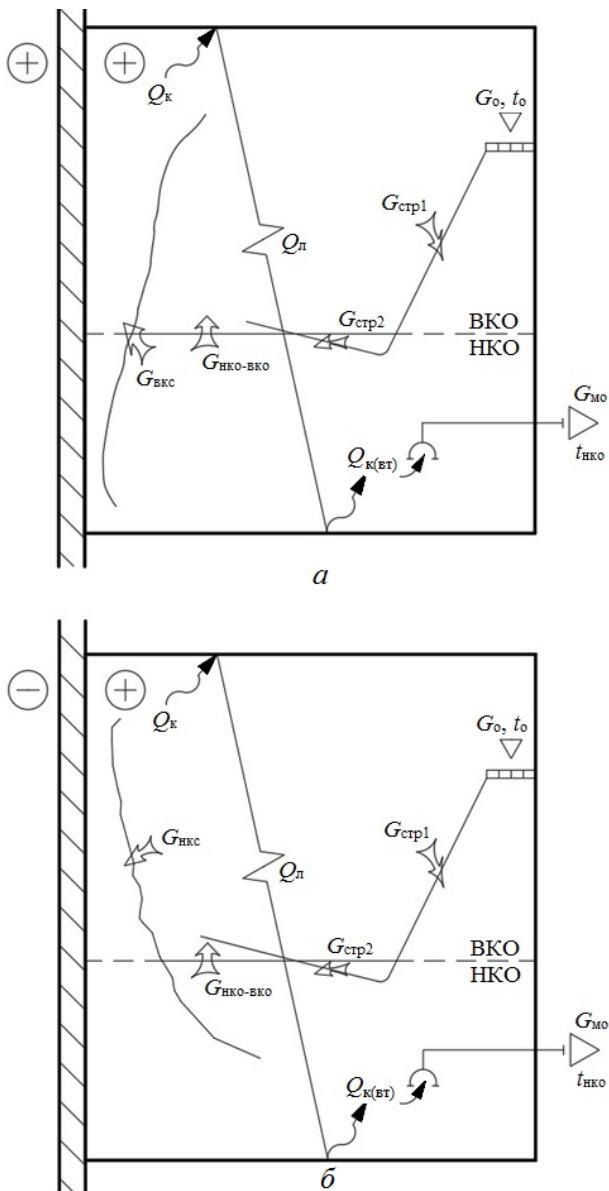


Рис. 1.7. Общая схема тепловоздушных процессов для помещений, где теплота равномерно распределена по объему:  
*a* — теплый период; *б* — холодный период

Совместное решение систем уравнений (1.14) и (1.15) или (1.16) и (1.17) позволяет определить требуемый воздухообмен более обоснованно в теплый и холодный периоды года для помещений с равномерным распределением вредных выделений по всему объему помещения, относящихся к третьему случаю.

Машинный зал тепловой электростанции характеризуется наличием процесса перетекания воздуха в котельный отсек через высокий проем. В таких случаях описание тепловоздушных процессов математическими выражениями усложняется главным образом из-за отсутствия надежного способа прогнозирования распределения температуры по высоте помещения. При этом расчет организованного перетекания невозможен без знания упомянутой величины.

Для составления математической модели необходимо определить закономерность изменения температуры по высоте, без перетекания (рис. 1.8, *a*) и с перетеканием (рис. 1.8, *б*).

Расход воздуха на уровне  $h$  в схеме рис. 1.8, *a* при условии, что  $h \leq H_{\text{п}}$ , определяется так:

$$G_h = G_{\text{п}} \left( \beta - \frac{\beta - 1}{H_{\text{п}}} h \right). \quad (1.18)$$

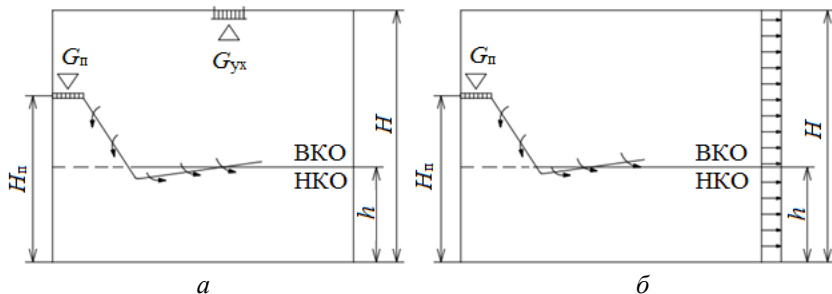


Рис. 1.8. Схема распределения потоков в машинном зале ТЭЦ:  
*a* — без перетекания; *б* — при наличии перетекания

В условиях, когда  $h > H_{\text{п}}$ :

$$G_h = G_{\text{п}} = \text{const.} \quad (1.19)$$

На схеме (см. рис. 1.8, *б*) представлено помещение с организованным перетеканием воздуха через вертикальное ограждение.

При равномерном по высоте перетекании расход вертикального потока воздуха через вертикальное ограждение определяется так:

при  $h \leq H_n$

$$G_h = G_n \left[ \beta - h \left( \frac{\beta - 1}{H_n} + \frac{1}{H} \right) \right]; \quad (1.20)$$

при  $h > H_n$

$$G_h = G_n \left( 1 - \frac{h}{H} \right). \quad (1.21)$$

Распределение температуры воздуха в помещении с равномерным тепловыделением  $q$ , Вт/м<sup>3</sup>, зависит от величины вертикального потока воздуха. Общий случай приращения температуры воздуха по вертикали:

$$dt = \frac{dQ}{c_b \cdot G_h}, \quad (1.22)$$

где  $dQ$  — тепловыделение в элементарном объеме помещения высотой  $dh$ , площадью  $f_n$ :

$$dQ = q_t \cdot f_n \cdot dh. \quad (1.23)$$

Подставляя уравнения (1.23) и (1.18)–(1.20) в уравнение (1.22), получим дифференциальное уравнение, связывающее распределение температуры воздуха со схемой организации воздухообмена.

При схеме (см. рис. 1.8, а), когда  $h \leq H_n$ :

$$dt = \frac{q_t \cdot f_n \cdot dh}{c_b \cdot G_n \left( \beta - \frac{\beta - 1}{H_n} h \right)}. \quad (1.24)$$

Интегрируя выражение (1.24) в пределах от  $t_b$  до  $t_h$  и от  $h = 0$  до  $h$ , получим

$$t_h = t_b + \left( \frac{q_t \cdot f_n}{c_b \cdot G_n} \right) \left( \frac{H}{\beta - 1} \right) \ln \left( \frac{\beta}{\beta - \frac{h(\beta - 1)}{H_n}} \right), \quad (1.25)$$

где  $q_t$  — удельное тепlopоступление, [Вт/м<sup>3</sup>].

Приращение температуры внутреннего воздуха в верхней зоне при  $h > H_n$  (см. рис. 1.8, а):

$$dt = \frac{q_t \cdot f_n \cdot dh}{c_b \cdot G_n}. \quad (1.26)$$

После интегрирования от  $t_h$  до  $t_{\text{нп}}$  и  $h = H_{\text{п}}$  до  $h$ :

$$t_h = t_{\text{нп}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} (h - H_{\text{п}}), \quad (1.27)$$

где  $t_{\text{нп}}$  — температура воздуха верхней точки,

$$t_{\text{нп}} = t_{\text{в}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}} \cdot H_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} \ln \beta^{\frac{1}{\beta-1}}. \quad (1.28)$$

Следовательно, при  $h \geq H_{\text{п}}$

$$t_h = t_{\text{в}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} \left[ h - H_{\text{п}} \left( 1 - \ln \beta^{\frac{1}{\beta-1}} \right) \right]. \quad (1.29)$$

Температура воздуха, уходящего из верхней точки помещения, в схеме без перетекания (см. рис. 2.8, а) определяется так:

$$t_{\text{yx}} = t_{\text{в}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} \left[ H - H_{\text{п}} \left( 1 - \ln \beta^{\frac{1}{\beta-1}} \right) \right]. \quad (1.30)$$

Для схемы с перетеканием (см. рис. 2.8, б) аналитическое вычисление позволяет получить:

при  $h \leq H_{\text{п}}$

$$t_h = t_{\text{в}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} \left( \frac{H_{\text{п}}}{\frac{H_{\text{п}}}{H} + \beta - 1} \right) \ln \frac{\beta}{\beta - \frac{h}{H_{\text{п}}} \left( \frac{H_{\text{п}}}{H} + \beta - 1 \right)}; \quad (1.31)$$

при  $h = H_{\text{п}}$

$$t_{\text{нп}} = t_{\text{в}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} \left( \frac{H}{\frac{H_{\text{п}}}{H} + \beta - 1} \right) \ln \frac{1 - \frac{H_{\text{п}}}{H}}{1 - \frac{h}{H}}. \quad (1.32)$$

Приращение температуры воздуха в верхней зоне помещения ( $h \geq H_{\text{п}}$ ) с учетом выражения (1.31):

$$t_h = t_{\text{нп}} + \frac{q_{\text{т}} \cdot f_{\text{п}}}{c_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}} H \cdot \ln \frac{1 - \frac{H_{\text{п}}}{H}}{1 - \frac{h}{H}}. \quad (1.33)$$

Особенностью выражения (1.33) является то, что предел второго слагаемого при стремлении  $h$  к  $H$  — это бесконечность.

Фактическая температура в верхней части помещения может быть весьма высокой, стремящейся к температуре поверхностей теплоисточников. Следовательно, наличие перетекания воздуха приводит к перегреву верхней зоны помещения, что усиливает перетекание в верхней части проема, способствуя тем самым поступлению воздуха из смежного помещения в нижней части проема.

Для того чтобы воспользоваться формулой (1.33), следует задаться вытяжкой из верхней зоны помещения: например ее величина может быть  $0,1G_{\text{п}}$ . Следовательно, расход воздуха через проем составит  $0,9G_{\text{п}}$ . Это можно учесть с определенной долей приближения, подставив в предельное значение  $0,9 \cdot H$ . Тогда будет получен результат, соответствующий реальным условиям с достаточной степенью точности. График на рис. 1.9 показывает, как изменяется температура воздуха в помещении с равномерным распределением избытков вредностей (теплоты) при наличии перетекания через вертикальный проем и без перетекания.

На основе вышеизложенного возможно предопределить место, количество и температуру перетекающего воздуха, что в конечном счете используется при составлении математической модели для помещений, относящихся к подобным случаям.

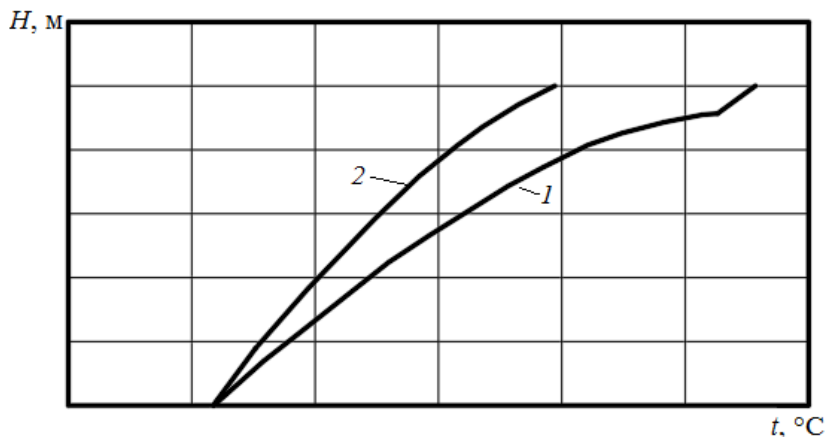


Рис. 1.9. Изменение температуры воздуха по вертикали:  
 1 — при наличии перетекания через вертикальное ограждение;  
 2 — без перетекания

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ ДВУХЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ

### 2.1. Вывод формулы для определения воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения

Данную формулу в наиболее общей форме выводим из систем балансовых уравнений, составленных для вентилируемого помещения в целом ((2.1)–(2.2)) и для нижнего КО ((2.3)–(2.4)) (рис. 2.1) по массе и энергии:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n (G_i)_{\text{НКО}} - \sum_{j=1}^m (G_j)_{\text{НКО}} + \sum_{i=1}^n (G_i)_{\text{ВКО}} - \sum_{j=1}^m (G_j)_{\text{ВКО}} + G_o - G_{yx} = 0, \end{aligned} \right. \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Pi_i (G_i)_{\text{НКО}} - \sum_{j=1}^m \Pi_{\text{НКО}} (G_j)_{\text{НКО}} + \sum_{i=1}^n \Pi_i (G_i)_{\text{ВКО}} - \\ - \sum_{j=1}^m \Pi_{\text{ВКО}} (G_j)_{\text{ВКО}} + G_o \cdot \Pi_o - G_{yx} \cdot \Pi_{\text{ВКО}} + M_{\text{НКО}} + M_{\text{ВКО}} = 0. \end{aligned} \right. \quad (2.2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n (G_i)_{\text{НКО}} + G_o + (\beta - 1)G_o - \sum_{j=1}^m (G_j)_{\text{НКО}} - G_{\text{НКО-ВКО}} = 0, \end{aligned} \right. \quad (2.3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Pi_i (G_i)_{\text{НКО}} + \Pi_o \cdot G_o + \Pi_{\text{ВКО}} (\beta - 1)G_o - \\ - \sum_{j=1}^m \Pi_{\text{НКО}} (G_j)_{\text{НКО}} - \Pi_{\text{НКО}} \cdot G_{\text{НКО-ВКО}} = 0. \end{aligned} \right. \quad (2.4)$$

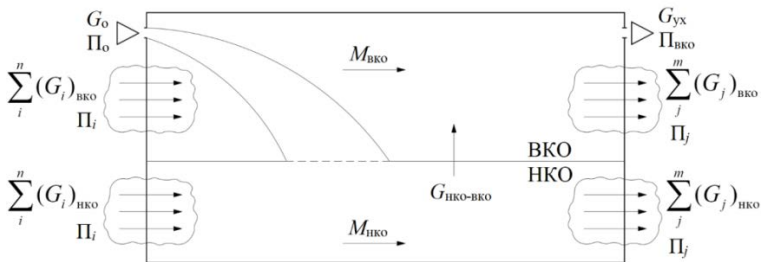


Рис. 2.1. Обобщенная схема двухзонной математической модели вентилируемого помещения

Система балансовых уравнений дает возможность установить связь между параметрами притока воздуха, а также нижнего и верхнего КО помещения.

Из уравнения энергетического баланса помещения (2.2) определяем характерный параметр воздуха в верхнем КО:

$$\Pi_{\text{вко}} = \Pi_{\text{усл.пр}} + \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}}}{G_o \left( 1 + \sum_{i=1}^n \beta_i \Pi_i - \sum_{j=1}^m \beta_j \Pi_j \right)}, \quad (2.5)$$

где  $\Pi_{\text{усл.пр}}$  — параметр величины условного притока, общий вид которого представлен уравнением

$$\Pi_{\text{усл.пр}} = \frac{\Pi_o + \sum_{i=1}^n \beta_i \Pi_i - \sum_{j=1}^m \beta_j \Pi_j}{1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}, \quad (2.6)$$

здесь

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \beta_i \Pi_i &= \sum_{i=1}^n (\beta_i \Pi_i)_{\text{нко}} + \sum_{i=1}^n (\beta_i \Pi_i)_{\text{вко}}, \\ \sum_{j=1}^m \beta_j \Pi_j &= \sum_{j=1}^m (\beta_j \Pi_j)_{\text{нко}} + \sum_{j=1}^m (\beta_j \Pi_j)_{\text{вко}}. \end{aligned}$$

Подставляя уравнение (2.5) в систему (2.4), получим формулу для определения требуемого воздухообмена в наиболее общих случаях, когда помещение имеет  $m$  вытяжек и  $n$  притоков:

$$G_o = \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}}{\left( 1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j \right) (\Pi_{\text{нко}} - \Pi_{\text{усл.пр}})}. \quad (2.7)$$

В случаях, когда в помещении доминирует избыток явной теплоты, формула для определения требуемого воздухообмена имеет вид

$$G_o = \frac{Q_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}}{\left( 1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j \right) (t_{\text{нко}} - t_{\text{усл.пр}})}, \quad (2.8)$$

где

$$t_{\text{усл.пр}} = \frac{t_o + \sum_{i=1}^n \beta_i t_i - \sum_{j=1}^m \beta_j t_j}{1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}. \quad (2.9)$$

В теплонпряженных помещениях при расчете требуемого воздухообмена по избыткам явной теплоты необходимо учесть лучистое теплопоступление из верхнего КО в нижний. В этом случае требуемый воздухообмен с учетом лучистого теплообмена определяется по формуле

$$G_o = \frac{Q_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j} + Q_{\text{л}} \frac{1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}{\beta + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}}{c_v \left( 1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j \right) (t_{\text{нко}} - t_{\text{усл.пр}})}. \quad (2.10)$$

Для более простого случая, когда в помещении есть несколько притоков (перетекание из смежного помещения, инфильтрация) и несколько вытяжек (рис. 2.2), требуемый воздухообмен, исходя из вышеизложенного, определяем по уравнению

$$G_o = \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta + \beta_{\text{п}} - \beta_{\text{мо}}}}{(1 + \beta_{\text{п}} - \beta_{\text{мо}}) (\Pi_{\text{нко}} - \Pi_{\text{усл.пр}})}. \quad (2.11)$$

Для случая, когда в помещении имеются приток и вытяжка (рис. 2.3), требуемый воздухообмен определяем из уравнений материального и энергетического балансов:

для помещения:

$$M_{\text{вко}} + M_{\text{нко}} - G_o (\Pi_{\text{вко}} - \Pi_o) = 0; \quad (2.12)$$

для нижнего КО:

$$M_{\text{нко}} + \beta \cdot G_o (\Pi_{\text{стр}} - \Pi_{\text{нко}}) = 0; \quad (2.13)$$

для струи:

$$G_o \cdot \Pi_o + G_o (\beta - 1) \Pi_{\text{вко}} - \beta \cdot G_o \cdot \Pi_{\text{стр}} = 0. \quad (2.14)$$

Параметр воздуха в верхнем КО определяется из уравнения (2.12):

$$\Pi_{\text{вко}} = \Pi_o + (M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}}) / G_o. \quad (2.15)$$



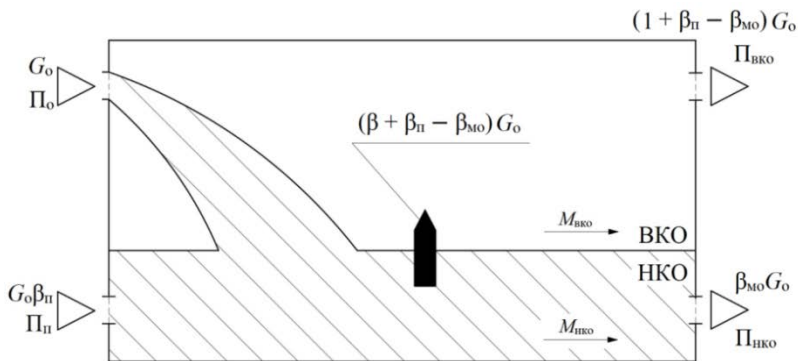


Рис. 2.2. Помещение с двумя притоками ( $n = 2$ ) и двумя вытяжками ( $m = 2$ )

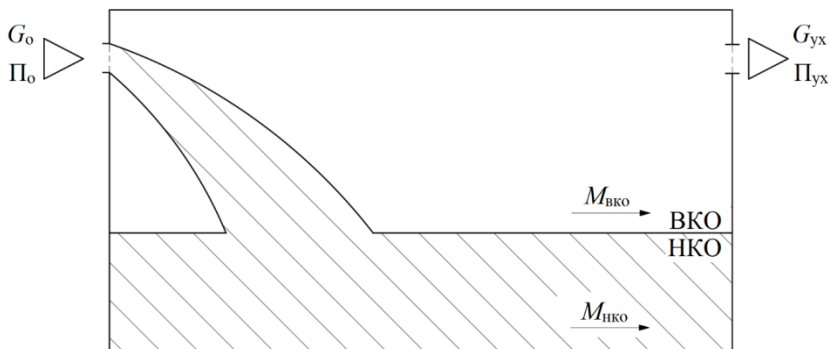


Рис. 2.3. Помещение с одним притоком ( $n = 1$ ) и одной вытяжкой ( $m = 1$ )

Согласно схеме (см. рис. 2.3), это и есть параметр уходящего воздуха.

Средний по сечению струи на входе в нижний КО помещения параметр воздуха определяем из уравнения (2.14):

$$\Pi_{\text{стр}} = (\Pi_o + (\beta - 1) \Pi_{\text{вко}}) / \beta. \quad (2.16)$$

Подставляя уравнения (2.15) и (2.16) в уравнение (2.13), находим связь воздухообмена с параметрами воздуха:

$$G_o = \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}} (\beta - 1) / \beta}{\Pi_{\text{нко}} - \Pi_o}. \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) предназначено для расчета воздухообмена с учетом распределения избытков вредных выделений между КО помещения и разности параметров воздуха в нижнем КО и притока.

Чтобы воспользоваться предлагаемым способом расчета требуемого воздухообмена, необходимо ввести дополнительные условия, учитывающие обеспечение санитарно-гигиенических характеристик струи, при входе ее в обслуживаемую зону (нижний КО).

Для обеспечения допустимой скорости движения воздуха при входе струи в нижний КО помещения необходимо определить скорость воздуха на выходе ее из приточного насадка [11; 14].

Допустимый перепад между температурой воздуха в нижнем КО ( $t_{\text{нко.х}}$ ) и минимальной температурой воздуха в струе ( $t_x$ ) должен удовлетворять условию из [16; 18]:

$$t_x - t_{\text{нко.х}} \leq \Delta t_2.$$

При этом в зоне разворота струи в нижнем КО помещения принимаем, что температура струи  $t_{\text{стр}}$  примерно равна температуре воздуха в нижнем КО ( $t_{\text{стр}} \approx t_{\text{нко}}$ ).

Для струй, настилающихся на потолок (схема 11 [11]), проверяем отсутствие отрыва по рекомендациям [18], обеспечивая условие  $X_{\text{отр}} \geq l$  помещения.

## 2.2. Обоснование отдельных допущений

Подробный учет факторов, влияющих на параметры воздуха в нижнем КО, позволяет определить оптимальный воздухообмен, а также оценить степень обеспеченности в нем заданных параметров воздуха.

Анализ теплового расслоения по объему помещения показал, что в теплонапряженных помещениях необходим учет лучистого теплообмена между КО. Теплообмен между КО способствует:

- увеличению тепловой нагрузки в нижнем КО;
- выравниванию параметров воздуха по высоте помещения;
- снижению коэффициента эффективности воздухообмена.

В холодный период года в помещении (при наличии наружных ограждений — наружных стен (НС), потолков (ПТ)) наблюдается обратное явление, т.е. лучистое тепlopоступление из нижнего КО в верхний КО.

Качественная картина распределения теплоты и влаги по КО в условиях определенно принятой схемы воздухообмена показала, что тепловлажностное соотношение, определяющее угловой коэффициент луча вентиляционного процесса, в различных КО разное. Это позволяет точнее определить параметры воздуха в рабочей зоне при заданных параметрах приточного воздуха.

Построение процессов в *I-d*-диаграмме для контрольных объемов взаимосвязано. При этом необходимо учитывать изменение тепловлажностного состояния воздуха в приточной струе.

При подаче приточной струи в верхний КО вследствие ее инжектирующего эффекта наблюдается поступление теплоты, водяных паров и вредных выделений из верхнего КО в нижний. Таким образом, струя способствует выравниванию параметров воздуха по всему объему помещения, снижая тем самым эффективность воздухообмена [48–57].

### **2.3. Лучистый теплообмен между контрольными объемами**

Анализ теплового и влажностного режимов помещения показал, что значительная часть теплоты, выделенная от теплоисточников в нижнем КО, конвективными потоками уходит в верхний КО (70÷80 % в производственных цехах и 40÷50 % в помещениях общественных зданий). Характерный график распределения температуры по высоте помещения показан на рис. 2.4, *а* [10; 14]. Повышается радиационная температура верхнего КО и между верхним и нижним КО, в помещении происходит теплообмен излучением [15; 19]. Характерный график распределения температуры по высоте помещения имеет форму, показанную на рис. 2.4, *б*.

При расчете величины лучистого потока теплоты, поступающего из верхнего КО в нижний КО помещения, основной сложностью является определение коэффициента облученности  $\varphi$ ; формулы для расчета, предложенные различными авторами [19; 20], позволяют определить его для наиболее простых случаев. По этим формулам и основным законам лучистого теплообмена [7; 11] составлен алгоритм расчета коэффициента облученности (рис. 2.6) для помещений с теплоизбытками при наличии в нем «тепловой подушки» и наружной стены (рис. 2.5) [21; 30; 34]. При расчете коэффициента облученности условно принято, что параметры воздуха по верхнему КО усреднены.

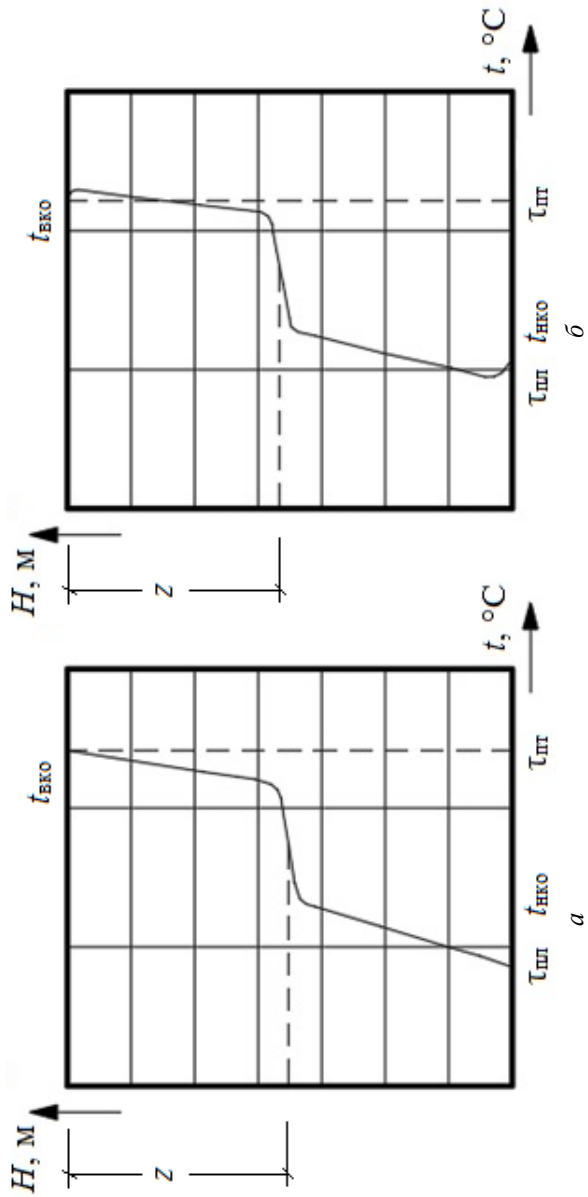


Рис. 2.4. График распределения температуры воздуха в помещении при устойчивой стратификации:

*a* — без учета лучистого теплообмена между КО; *б* — то же с учетом;

*z* — высота температурного перекрытия;  $t_{\text{нко}}$  — температура в нижнем КО;  $t_{\text{вкo}}$  — температура в верхнем КО;

$t_{\text{пк}}$  — температура воздуха на поверхности пола;  $t_{\text{пк}}$  — то же на поверхности потолка

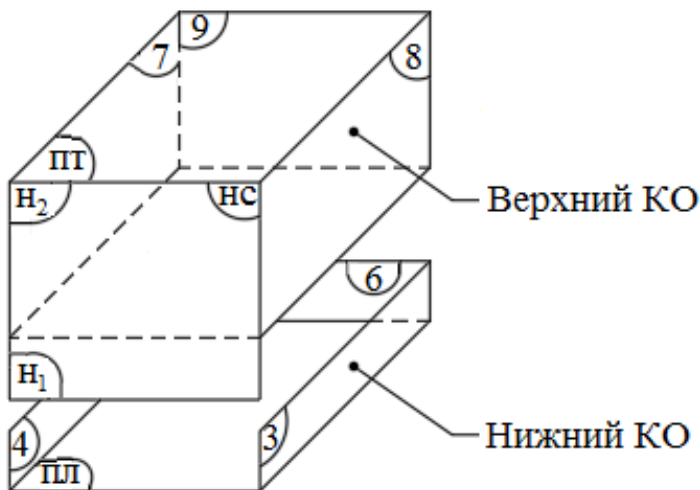


Рис. 2.5. Схема помещения с одной наружной стеной;  
 $H_1$ ,  $H_2$  — части наружной стены; пл — пол; 3–9 — внутренние стены

Алгоритм (см. рис. 2.6) позволяет также определить величины коэффициента облученности от верхнего КО до нижнего КО.

Расчет лучистого теплообмена между верхним и нижним КО, блок-схема которого показана на рис. 2.6, был проведен на ПК (прил. 3). По результатам расчета построен график (рис. 2.7), который позволяет определить коэффициент облученности от поверхностей верхнего КО в нижний КО помещения [22; 26; 37].

Определение коэффициента облученности позволяет вычислить величину лучистого потока теплоты, используя уравнения Стефана — Больцмана (1.4). Лучистый поток теплоты ( $Q_{\text{вко-нко}}$ ), поступающий из верхнего КО в нижний, учитывается при составлении уравнения балансов для отдельных КО (уравнения (2.2)–(2.3), (2.7)–(2.16)) с целью вывода формулы для определения требуемого воздухообмена при двухзонной математической модели вентилируемого помещения.

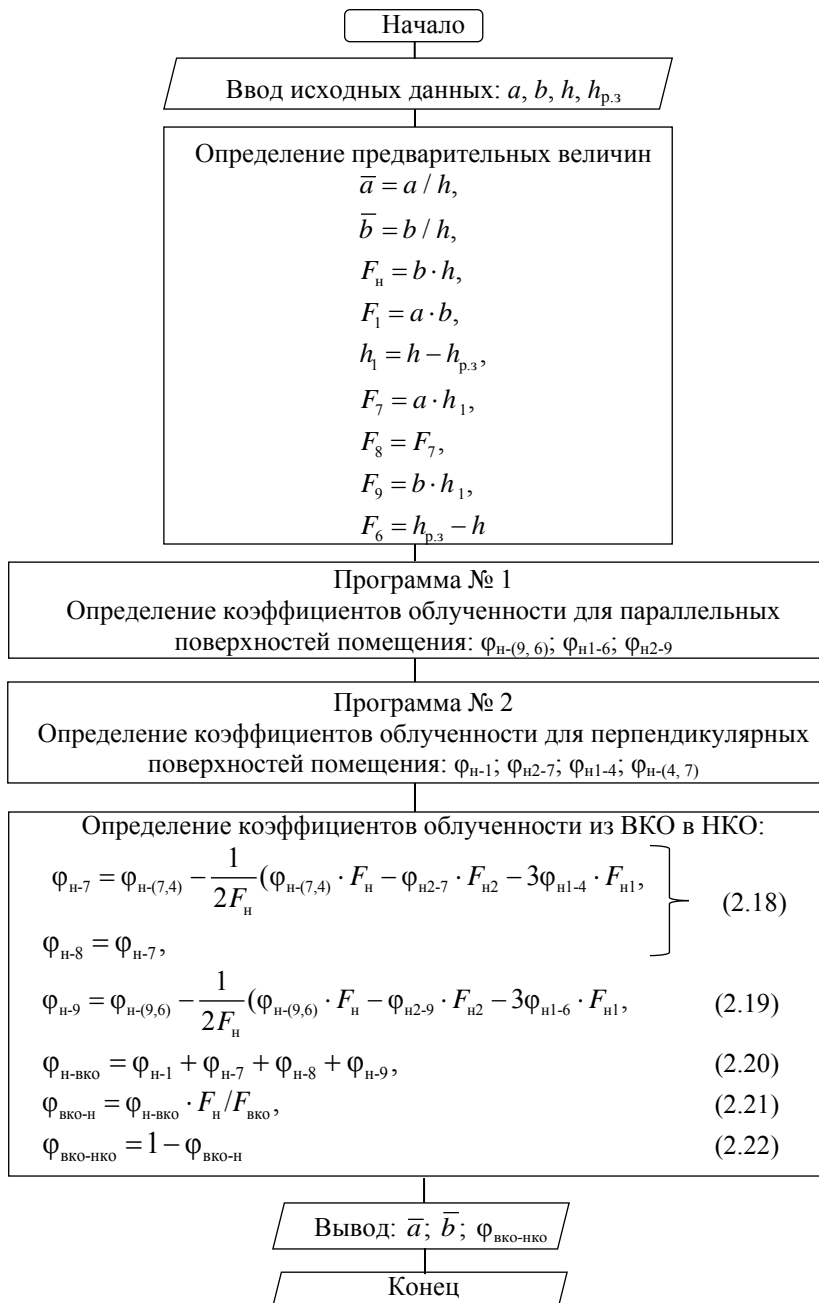


Рис. 2.6. Алгоритм расчета лучистого теплообмена между КО

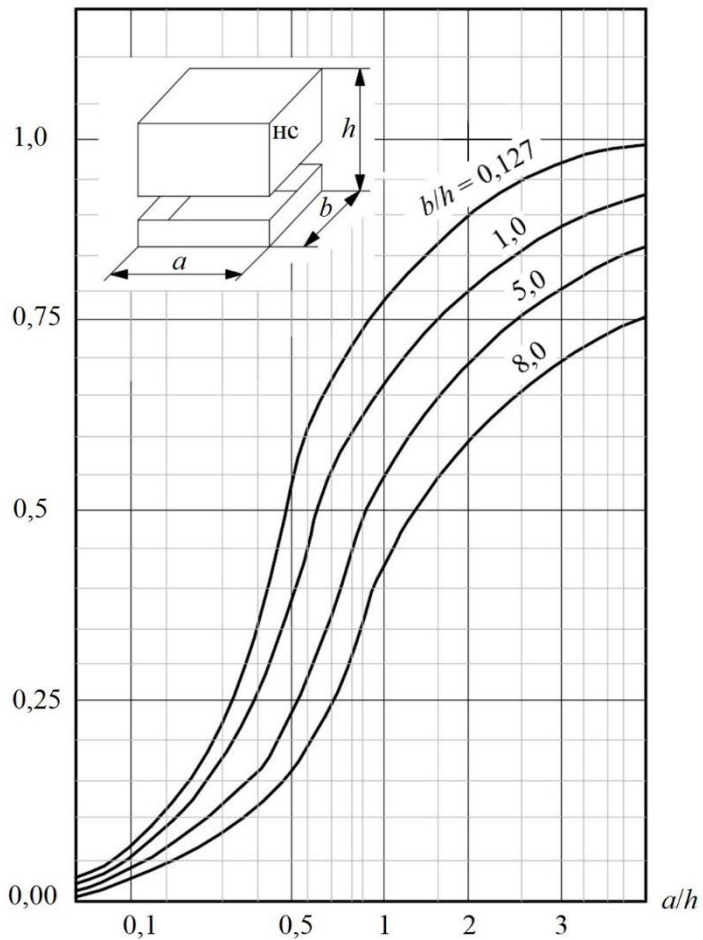


Рис. 2.7. Коэффициент облученности при лучистом теплообмене между верхним и нижним КО в помещении с одним наружным ограждением

## 2.4. Тепловлажностные процессы на *I-d*-диаграмме при двухзонной математической модели вентилируемого помещения

При расчете требуемого воздухообмена с применением метода двухзонного математического моделирования вентилируемого помещения параметры воздуха в характерных точках можно определить, используя *I-d*-диаграмму влажного воздуха. При построении процессов на данной диаграмме КО рассматриваются как области с однородными параметрами воздуха. Угловые коэффициенты  $\epsilon$  луча процесса изменения состояния воздуха определяются по известной методике [2]:

$$\epsilon^{\text{ВКО}} = Q_{\text{ВКО}}^{\text{П}} / M_{\text{ВКО}}^{\text{ВЛ}} \quad (2.23)$$

$$\epsilon^{\text{НКО}} = Q_{\text{НКО}}^{\text{П}} / M_{\text{НКО}}^{\text{ВЛ}} \quad (2.24)$$

$$\epsilon^{\text{ПОМ}} = Q_{\text{ПОМ}}^{\text{П}} / M_{\text{ПОМ}}^{\text{ВЛ}} \quad (2.25)$$

По традиционной методике помещение рассматривается как один общий объем. Точки «в» и «у» на *I-d*-диаграмме (рис. 2.8) лежат на луче процесса, проведенного от т. «о» ( $\epsilon^{\text{ПОМ}}$ ), который пересекается с изотермами  $t_{\text{в}} = \text{const}$  (т. «в») и  $t_{\text{yx}} = \text{const}$  (т. «у»). То есть для обеспечения в обслуживаемой зоне параметров, соответствующих т. «в», необходимо подавать в помещение воздух с параметрами, соответствующими т. «о». Однако на практике приточный воздух с параметрами «о» по традиционной методике не обеспечивает параметры т. «в».

Предлагаемая методика построения процессов на *I-d* диаграмме позволяет при известной СОВ более полно, по сравнению с общепринятой, определить параметры приточного воздуха (т. «о») для обеспечения в обслуживаемой зоне заданных параметров (т. «в») (прямая задача), или при заданных параметрах притока уточнять параметры воздуха в обслуживаемой зоне (обратная задача) [23].

Значения параметров воздуха в нижнем КО помещения и их диапазон зависят от тепловлажностного отношения  $\epsilon$  в КО и относительного расхода  $\beta$ .

В зависимости от вида помещения, его назначения и месторасположения источников вредных выделений предусматривают наиболее оптимальную СОВ, т.е. выбирают место расположения приточных и вытяжных отверстий [24].



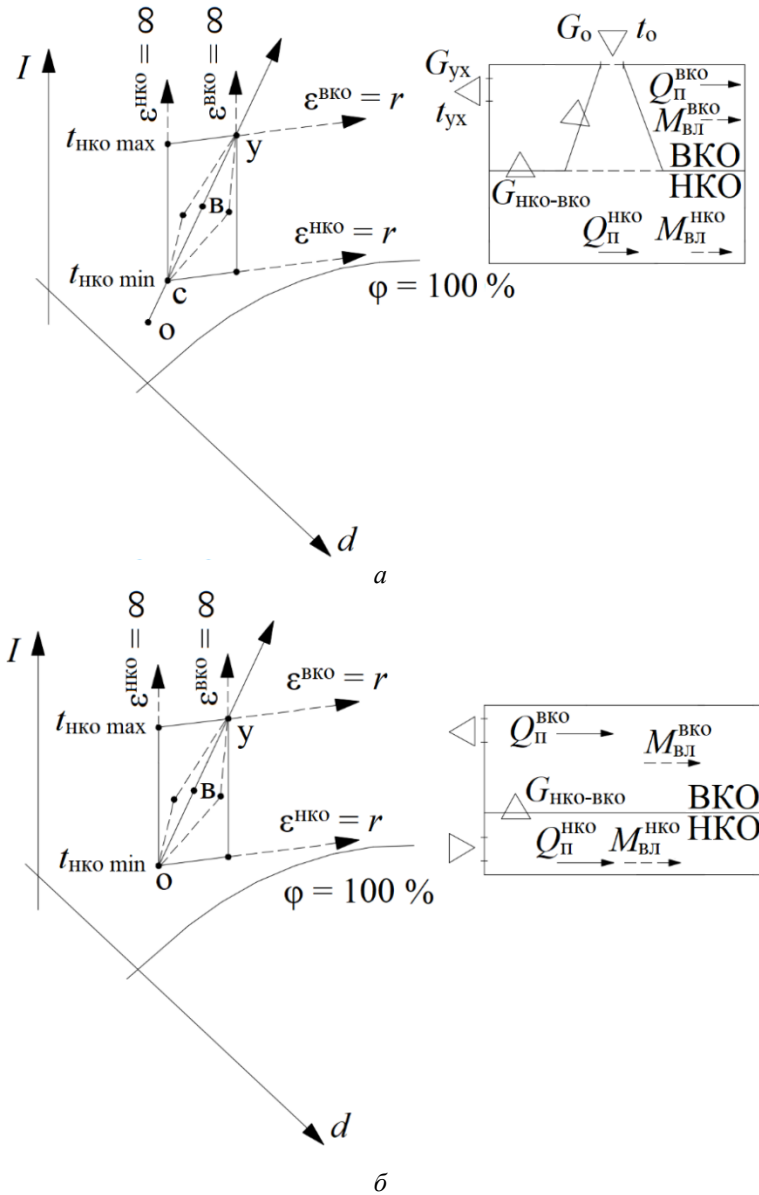


Рис. 2.8. Возможные варианты изменения параметров воздуха на диаграмме при подаче воздуха по схеме:  
*a* — сверху вниз; *б* — снизу вверх

Возможные варианты изменения параметров воздуха на  $I-d$ -диаграмме при подаче воздуха по схеме сверху вниз показаны на рис. 2.8, *а*. Точка  $t_{\text{нко min}}$  совпадает с точкой смеси приточного воздуха (т. «о») с воздухом верхней зоны, подсасываемым к струе, поэтому эта точка лежит на прямой  $ou$ . Крайние случаи: явная теплота выделяется в нижнем КО, а водяные пары — в верхнем, и наоборот. Подобное распределение вредностей по отдельным КО дает возможность построить контур (на рис. 2.8 это четырехугольник со сторонами, совпадающими с  $\epsilon^{\text{нко}} = \infty$ ,  $\epsilon^{\text{вко}} = r$  и  $\epsilon^{\text{нко}} = r$ ,  $\epsilon^{\text{вко}} = \infty$ ).

Все остальные возможные значения  $t_{\text{нко max}}$  лежат внутри или на границах этого контура. Для каждой возможной схемы организации воздухообмена существует свой такой контур. В частном случае параметры воздуха, уходящего из нижнего КО, могут оказаться на линии  $ou$  (при  $\epsilon^{\text{нко}} \cong \epsilon^{\text{вко}}$ ).

На рис. 2.8, *б* представлен вариант построения вентиляционного процесса при подаче притока в нижний КО помещения.

Для определения параметров приточного воздуха при двухзонной математической модели вентилируемого помещения разработан аналитический способ расчета, который представлен в виде блок-схемы алгоритма (рис. 2.9).

Сопоставление результатов расчета по предлагаемому способу с полученными традиционным методом показано на примере для обратной задачи.

В помещение с размерами  $12 \times 6 \times 6$  м и с равномерной по объему теплонапряженностью  $q = 18$  Вт/м<sup>3</sup> системой вентиляции подается приточный воздух с температурой  $t_0 = 16$  °С. Рассматривая одно- и двухзонную математические модели вентилируемых помещений при одинаковой величине количества приточного воздуха —  $G_0$  (однозонная) =  $G_0$  (двухзонная), определим параметры в нижнем КО и оценим несходимость результатов путем их сравнения.

Расчеты с двухзонной моделью выполнялись для следующих значений распределения теплоты и влаги:

- 40 % теплоты и 45 % влаги от общего количества выделялись в нижнем КО;
  - 60 % теплоты и 55 % влаги учитывались в балансе верхнего КО.
- Результаты расчетов приведены в табл. 2.1 и 2.2.

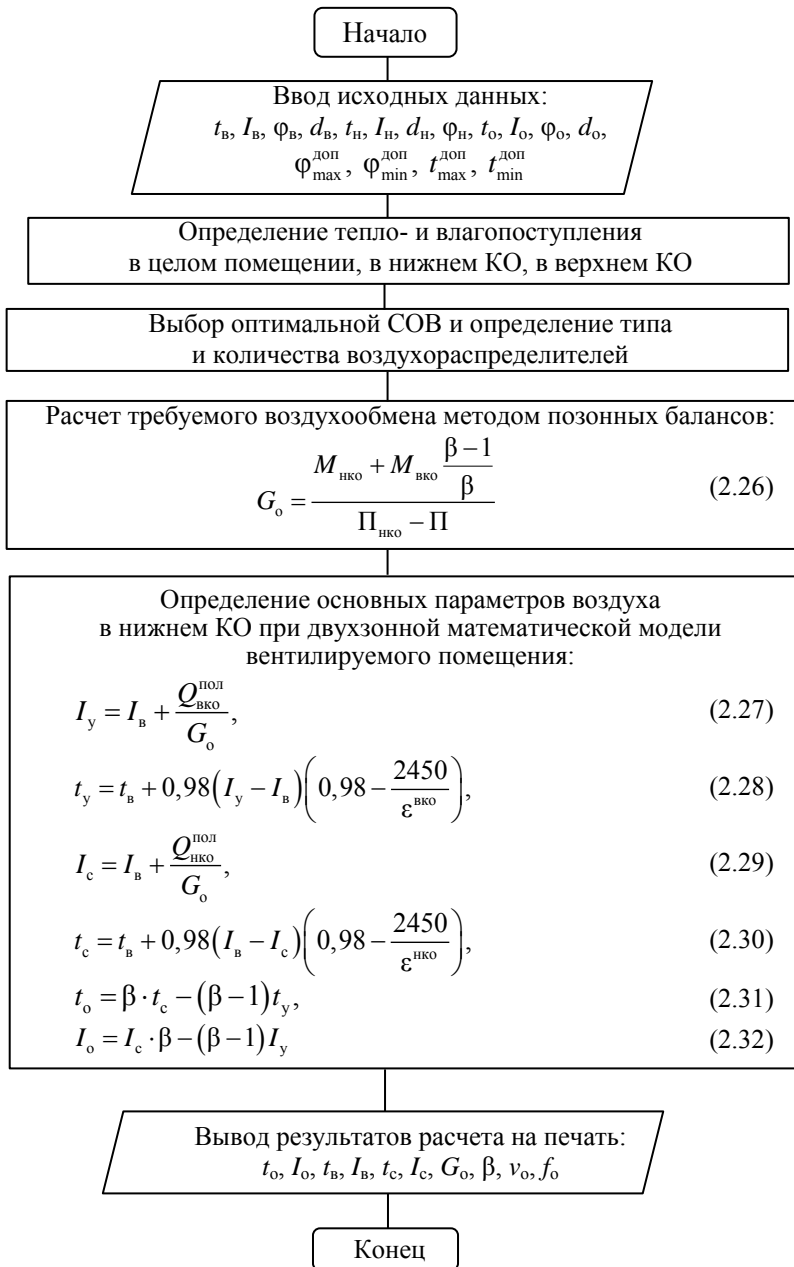


Рис. 2.9. Блок-схема алгоритма определения параметров воздуха в обслуживаемой зоне (аналитический способ решения прямой задачи)

Таблица 2.1

## Сводная таблица для СОВ по схеме сверху вниз (см. рис. 2.8, а)

Модель	Характерные точки	Параметры			
		$t, ^\circ\text{C}$	$I, \text{кДж/кг}$	$\varphi, \%$	$d, \text{г/кг}$
Однозонная	о	12	22,36	43	4,1
	в	20	34,27	40	5,5
	у	25,4	43,49	29	6,5
Двухзонная	о	12	22,36	43	4,1
	с	19,43	38,18	36	5,42
	в	20	36,33	39	6,3
	у	25,4	43,49	29	6,5

Таблица 2.2

## Сводная таблица для СОВ по схеме снизу вверх (рис. 2.8, б)

Модель	Характерные точки	Параметры			
		$t, ^\circ\text{C}$	$I, \text{кДж/кг}$	$\varphi, \%$	$d, \text{г/кг}$
Двухзонная	о	18	33,75	37	5,2
	в	20	34,44	25	5,6
	у	25,4	43,49	29	6,5
Однозонная	о	18	33,75	37	5,2
	в	20	36,33	39	6,3
	у	25,4	43,49	29	6,5

Параметры воздуха обслуживаемой зоны вентилируемого помещения при двухзонной модели не сходятся с результатами расчетов параметров воздуха в обслуживаемой зоне при однозонной модели вентилируемого помещения.

Уравнения для определения параметров воздуха на входе приточной струи в нижний КО ( $\Pi_{\text{нко min}}$ ) и параметров уходящего воздуха при СОВ, представленных на рис. 2.8, а, выводятся из систем (2.1)–(2.2) и (2.3)–(2.4). Параметры воздуха на входе струи в нижний КО:

$$\Pi_{\text{с min}} = (\Pi_{\text{o}} + \Pi_{\text{yx}}(\beta - 1)) / \beta. \quad (2.33)$$

Параметры уходящего воздуха определяют по формуле

$$\Pi_{\text{yx}} = \Pi_{\text{o}} + \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta}}{G_{\text{o}}}. \quad (2.34)$$

С учетом того, что

$$K_{\text{эф}} = \frac{\Pi_{\text{yx}} - \Pi_0}{\Pi_{\text{HKO}} - \Pi_0}, \quad (2.35)$$

получается

$$\Pi_{\text{yx}} = \Pi_0 + \frac{\Pi_{\text{HKO}} - \Pi_0}{\bar{M}_{\text{HKO}} + \bar{M}_{\text{BKO}} \frac{\beta - 1}{\beta}}; \quad (2.36)$$

$$\Pi_{\text{c min}} = \frac{\Pi_0 + (\beta - 1) \left( \Pi_0 + \frac{\Pi_{\text{HKO}} - \Pi_0}{\bar{M}_{\text{HKO}} + \bar{M}_{\text{BKO}} \frac{\beta - 1}{\beta}} \right)}{\beta}, \quad (2.37)$$

где

$$\bar{M}_{\text{HKO}} = M_{\text{HKO}} / (M_{\text{HKO}} + M_{\text{BKO}}); \quad (2.38)$$

$$\bar{M}_{\text{BKO}} = M_{\text{BKO}} / (M_{\text{HKO}} + M_{\text{BKO}}). \quad (2.39)$$

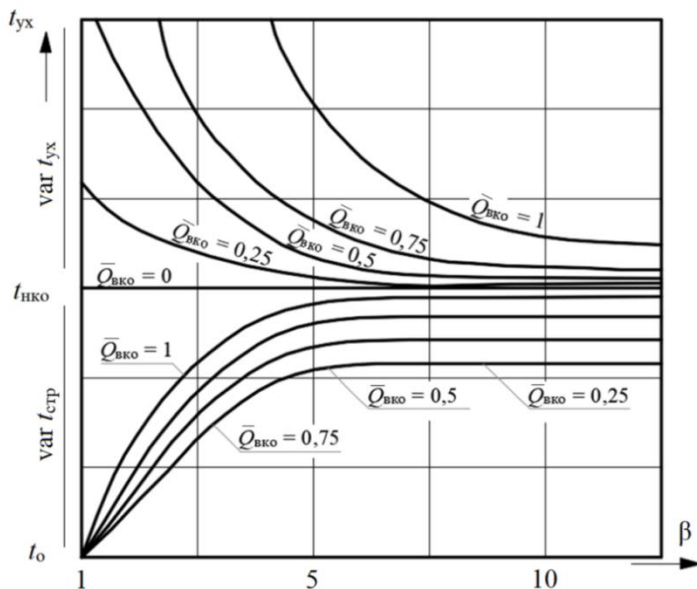


Рис. 2.10. Изменения значений характерных температур ( $t_{\text{yx}}$  и  $t_0$ ) в зависимости от величины относительного расхода воздуха в струе и распределения теплоизбытков по КО

На рис. 2.10 показана зависимость  $t_{c \min}$  и  $t_{yx}$  для разных значений относительного расхода воздуха в струе и различных соотношений распределения теплоизбытков по отдельным КО. Рассматривался частный случай, когда  $t_0 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{\text{нко}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как видно из графика (см. рис. 2.10), начиная с некоторой величины относительного расхода воздуха в струе ( $\beta \approx 10$ ) характерные точки, соответствующие параметрам воздуха  $\Pi_{c \min}$  (т. «о») и  $\Pi_{yx}$  (т. «у»), стремятся к параметрам воздуха в обслуживаемой зоне (т. «в») — т.е. если  $\beta \geq 10$ , тогда «о»  $\cong$  «в»  $\cong$  «у».

## 2.5. Определение размеров и числа приточных струй при подаче воздуха воздухораспределителями, расположенными в верхнем КО

При подаче приточной струи в верхний КО помещения возникает эжектирующий эффект, который вызывает переход теплоты, водяных паров и вредных выделений из верхнего КО в нижний. Таким образом, подачу воздуха при указанной СОВ целесообразно осуществить по схеме (рис. 2.11), при которой величины  $x_{\text{п}}$  и, следовательно,  $\beta$  получаются относительно небольшими.

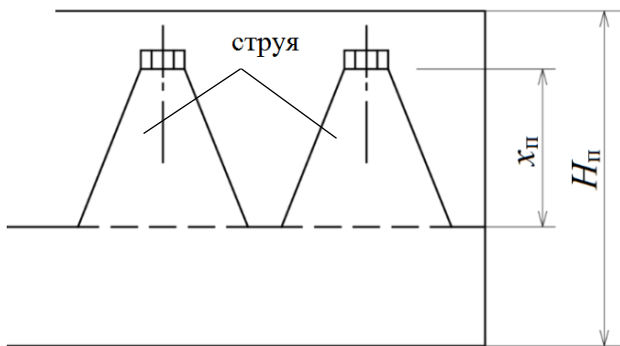


Рис. 2.11. Схема распространения приточной струи:  
 $x_{\text{п}}$  — расстояние от места выхода струи до нижнего КО

В струе, истекающей из воздухораспределителя (см. рис. 2.11), при встрече с полом (нижняя граница нижнего КО) кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию, определяемую статическим давлением. После удара о пол вентилируемого помещения осесимметричная струя растекается в виде веерной, а потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию распространяющейся

струи. Расход воздуха в конце компактной струи равняется расходу воздуха в начале веерной струи [38].

Допустив, что статическое давление в струе постоянно и равно атмосферному, а также пренебрегая силами трения струи о пол, можно принять, что количество движения в струе вниз по течению от начального сечения сохраняется постоянным и равным модулю количества движения струи на выходе из воздухораспределителя:

$$K_0 = K_x = \text{const}, \quad (2.40)$$

где  $K_0$  — количество движения струи на выходе ее из воздухораспределителя;

$K_x$  — количество движения в конце осесимметричной или в начале веерной струи:

$$K_0 = u_0^2 \cdot \rho \cdot f_0; \quad (2.41)$$

$$K_x = 2\pi R \int_0^\infty u_h^2 \rho \, dh \quad (2.42)$$

или

$$K_x = \pi^2 R \cdot \rho \cdot u_h^2 \cdot c \cdot R_{\text{фокус}}, \quad (2.43)$$

где  $u_0$  — скорость движения воздуха в струе, м/с.

Из формулы (2.40) получим

$$u_0^2 \cdot f_0 \cdot \rho = \pi^2 \cdot u_h^2 \left( H \cdot c \cdot h - h^2 \cdot c + \frac{R_0 \cdot c \cdot h}{0,22} \right). \quad (2.44)$$

Определим

$$u_h = \frac{u_0 \cdot R_0}{\pi \sqrt{H \cdot c \cdot h - h^2 \cdot c + \frac{R_0 \cdot c \cdot h}{0,22}}}. \quad (2.45)$$

Расход воздуха в конце осесимметричной струи (разрез 1-1, рис. 2.12) или в начале веерной струи (разрез 2-2, см. рис. 2.12) относительно начального расхода увеличивается в  $\beta$  раз:

$$L_x = \beta \cdot L_0, \quad (2.46)$$

где  $L_0$  — расход струи на выходе из воздухораспределителя:

$$L_0 = u_0 \cdot f_0, \quad (2.47)$$

где  $f_0$  — площадь воздухораспределителя,  $f_0 = \pi \cdot d_0^2 / 4$ .

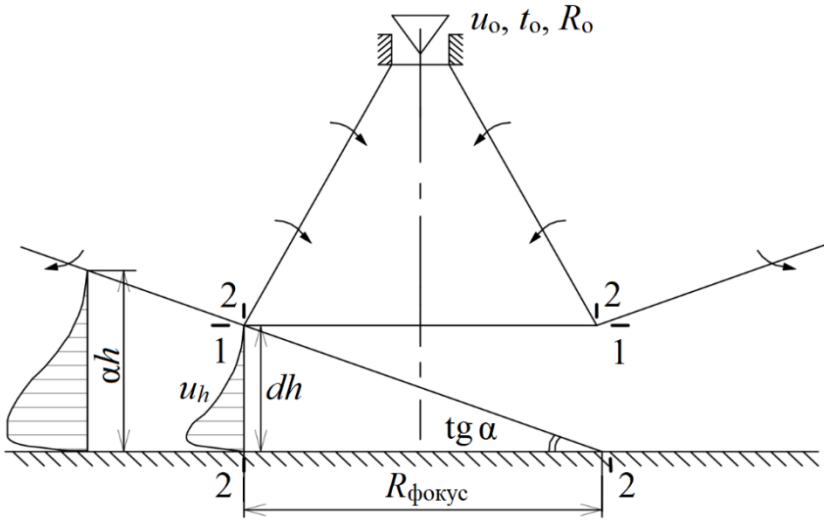


Рис. 2.12. Схема растекания осесимметричной струи на пол в виде веерной струи

Относительный расход воздуха в осесимметричной струе определяется как  $\beta = 2x_n / m\sqrt{f_0}$ .

Расход воздуха в начале веерной струи:

$$L_x = 2\pi R \int_0^{\infty} u_h dh = \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot R \cdot c \cdot h \cdot u_h, \quad (2.48)$$

где

$$R = (H - h) 0,22 + R_0. \quad (2.49)$$

Расход воздуха в окончательной форме можно определить уравнением

$$L_x = \sqrt{2} \cdot \pi^2 [0,22(H - h) + R_0] c \cdot h \cdot u_h. \quad (2.50)$$

Из уравнений (2.46), (2.47) и (2.50) определяем величину  $u_h$  (скорость струи):

$$\beta \cdot u_0 \cdot f_0 = \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot c \cdot h \cdot u_h [0,22(H - h) + R_0]; \quad (2.51)$$

$$u_h = \frac{\sqrt{2} \cdot u_0 \cdot R_0^2 (H - h)}{\pi \cdot c \cdot h [0,22(H - h) + R_0] m \sqrt{f_0}}. \quad (2.52)$$



Совместное решение уравнений (2.45) и (2.52):

$$\frac{u_0 \cdot R_0}{\pi \cdot \sqrt{c \cdot h [H - h + R_0 / 0,22]}} = \frac{\sqrt{2} \cdot u_0 \cdot R_0^2 (H - h)}{\pi \cdot c \cdot h [0,22(H - h) + R_0] m \sqrt{f_0}} \quad (2.53)$$

позволяет определить высоту струи  $h$  в момент разворота, т.е. перехода от осесимметричной к веерной:

$$h = \frac{0,22 \cdot \pi \cdot c \cdot H - \pi \cdot c \cdot R_0 + \frac{3,08 \cdot H}{m \cdot R_0} + \sqrt{D}}{0,44 \cdot \pi \cdot c - \frac{6,16}{\pi \cdot m \cdot R_0}}, \quad (2.54)$$

где

$$D = \left(0,22 \cdot \pi \cdot c \cdot H - \pi \cdot c \cdot R_0\right)^2 + 2,71 \cdot \pi \cdot c \cdot R_0 \frac{(H - h)^2}{m^2 \cdot f_0}. \quad (2.55)$$

Полученная зависимость (2.54) позволяет установить взаимосвязь между размерами помещения, характеристиками воздухораспределителя и высотой его расположения, а также определить рациональную высоту расположения воздухораспределителей для подачи воздуха вертикальными струями из верхнего КО в нижний с целью получения необходимых параметров в обслуживаемой зоне.

На рис. 2.13 показано изменение высоты  $h$  разворота струи в зависимости от диаметра воздухораспределителя и высоты его расположения в вентилируемом помещении.

Одним из основных показателей рациональности выбранной СОВ является кратность воздухообмена  $K_p$ , которая зависит от количества обслуживаемых вентилируемое помещение воздухораспределителей. В помещениях, где доминируют избытки явной теплоты, в теплый период года предпочтительны СОВ, которые обеспечивают минимальное поступление теплоты в нижний КО, т.е. приток воздуха осуществляется с минимально возможным числом воздухораспределителей (рис. 2.14). В холодный период года, когда в некоторых случаях в нижнем КО наблюдается отрицательный баланс, целесообразное количество воздухораспределителей определяется по расчету.

В помещении, где доминируют избытки других вредных выделений, воздухораспределители следует устанавливать в минимально возможном количестве, независимо от периода года.

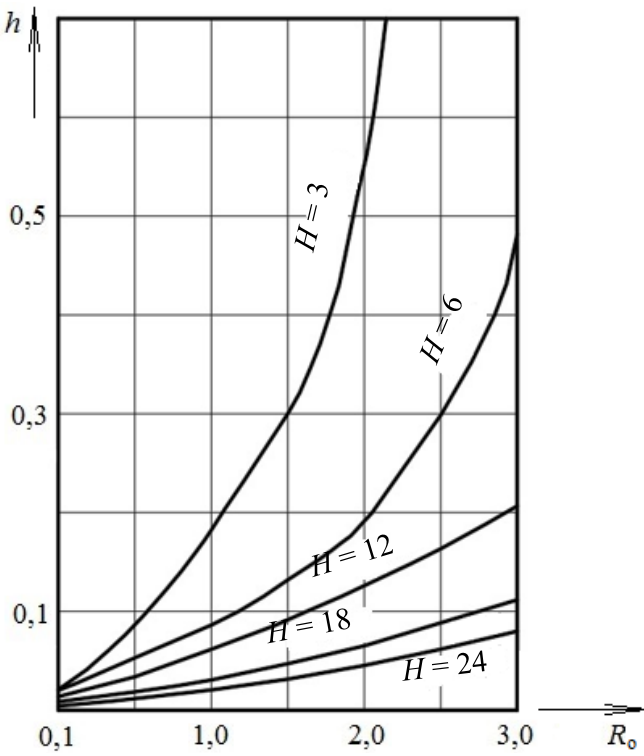


Рис. 2.13. Высота растекания струи в зависимости от диаметра и высоты расположения воздухоораспределителя

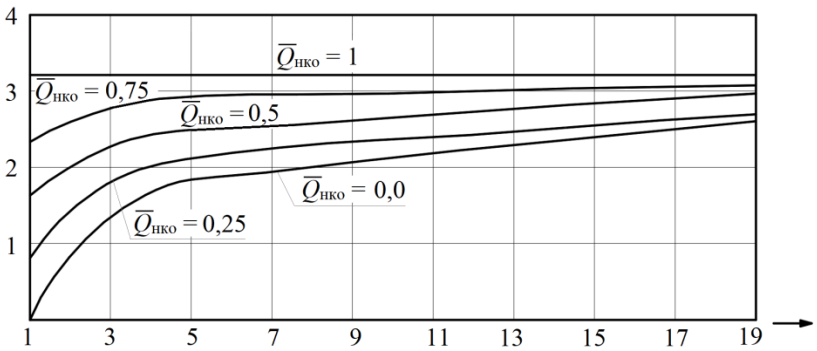


Рис. 2.14. Зависимость кратности воздухообмена от количества воздухоораспределителей:  $K_p = f(N, \bar{Q}_{\text{HKO}})$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Цель и условия проведения экспериментальных исследований. Описание объектов исследования

Целью исследований являются:

- оценка распределения теплоты или других вредных выделений по отдельным КО;
- определение требуемого воздухообмена по предлагаемой в работе методике;
- сравнение результатов воздухообмена, полученных с применением двухзонной математической модели вентилируемого помещения, с полученными экспериментальными результатами.

Исследования проводились в производственном цехе, все объекты расположены на территории г. Москвы. Натурные замеры проводились в летних условиях 2021 г. (теплый период). Экспериментальные исследования проводились после наладки и регулировки систем вентиляции, состояние воздушной среды помещений соответствовало требованиям санитарных норм. Системы приточно-вытяжной вентиляции исследуемых объектов были в рабочем состоянии. Метеорологические условия в период проведения исследований приведены в табл. 3.1. Система воздухораспределения в помещениях разработана специализированной проектной организацией, имеющей разрешительную документацию для выполнения подобных работ.

*Натурные* наблюдения проводились в кабинете физиотерапевтического отделения, в малом и большом рентген-кабинетах и в кабинете подготовки парафина, где основными вредными выделениями являются теплота и пар. Все обследуемые помещения имеют высоту  $H = 4,2$  м. Физиотерапевтический кабинет имеет прямоугольную форму (10,0×6,0). Воздух в помещение поступает через окна и двери. Удаление воздуха осуществляется через вытяжные решетки, расположенные на высоте  $H_{в.р} = 3,7$  м от уровня пола (рис. 3.1).

Рентген-кабинеты (малый и большой) имеют прямоугольную форму (8,0×6,0; 6,0×6,0) (рис. 3.2). Приточный воздух поступает через систему общеобменной вентиляции, а также подается сплит-системой кондиционирования воздуха с частичным притоком наружного воздуха и вследствие перетекания воздуха через двери. Удаление воздуха осуществляется общеобменной вытяжкой.

Таблица 3.1

## Метеорологические условия в период проведения эксперимента

Наименование помещения	Температура наружного воздуха $t_{\text{н}}$ , °С	Относительная влажность $\Phi_{\text{н}}$ , %	Скорость ветра $v$ , м/с	Дата проведения	Наименование объекта
Монтажный участок № 503	26,00	29	1,0	12.08.21	Корпус № 1. Производство № 2
Химическая лаборатория	27,00	38	1,0	13.08.21	
Участок термообработки и изготовления киперного листа	26,00	38	1,0	15.08.21	
Участок осадления ЦМП	27,00	36	1,0	14.08.21	
Физиотерапевтический кабинет	22,5	59	1,0	15.07.21	Детская клиническая больница
Рентген-кабинет № 1 (малый)	24	55	1,0	16.07.21	
Рентген-кабинет № 3 (большой)	25	40	1,0	17.07.21	
Кабинет изготовления парафина	26	42	1,0	18.07.21	

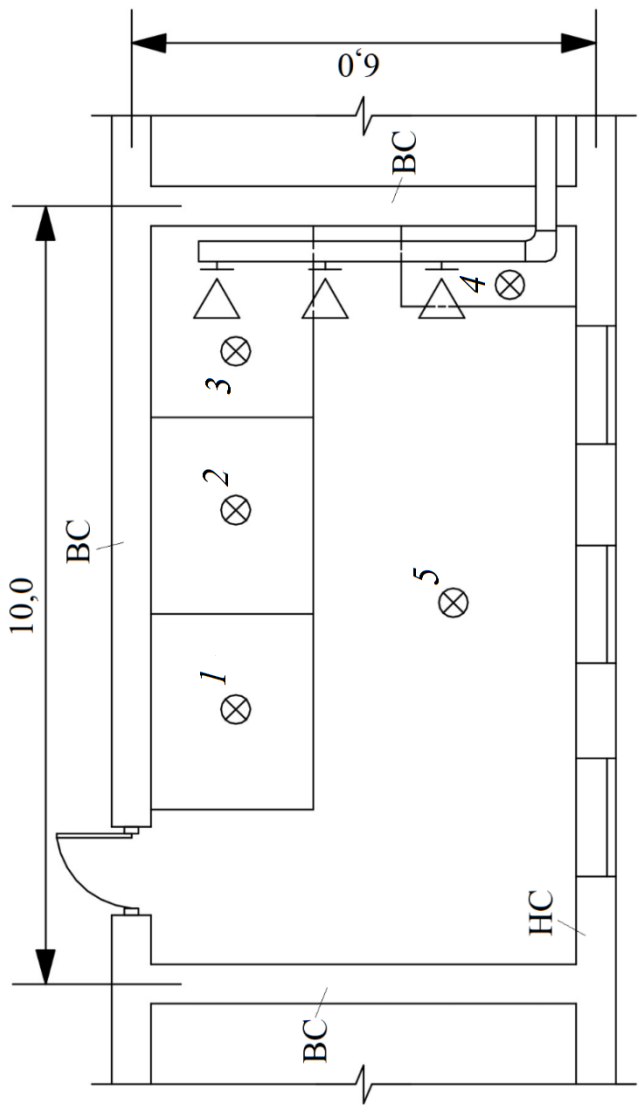


Рис. 3.1. План физиотерапевтического кабинета с нанесением постов замеров:  
 1-5 — номера и местонахождение точек замеров; BC — внутренняя стена; НС — наружная стена

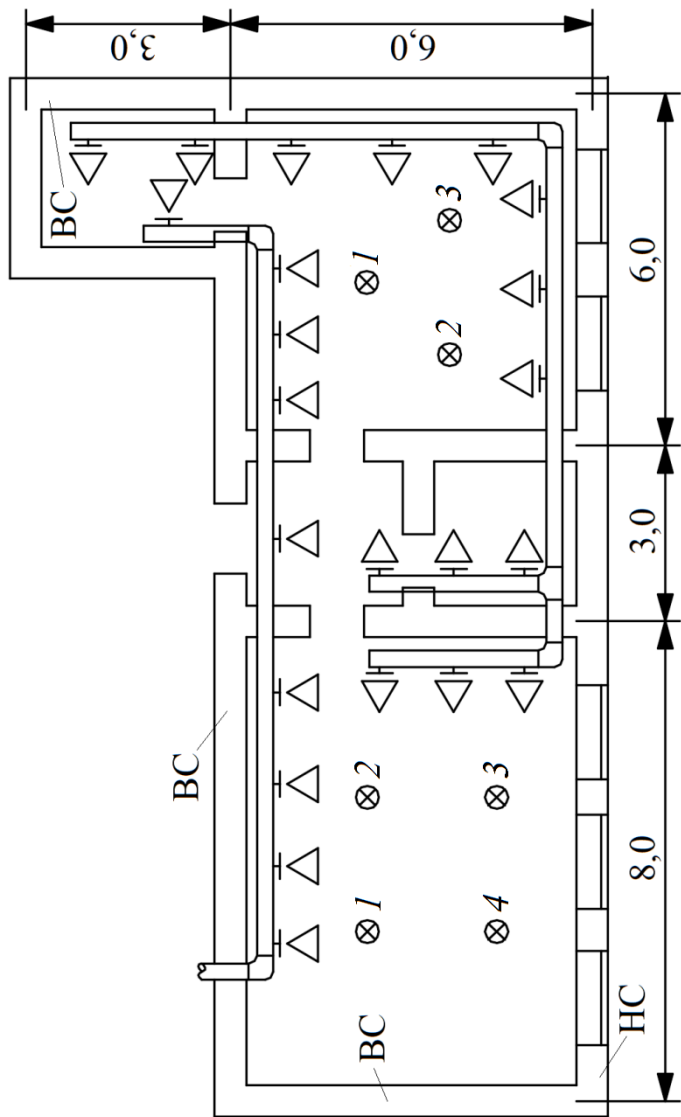


Рис. 3.2. План малого и большого рентген-кабинетов с нанесением точек замеров 1-4

В комнату подготовки парафина воздух поступает через окна (неорганизованный, естественный приток) и удаляется вытяжными решетками, расположенными в верхнем КО помещения (организованная вытяжка) (рис. 3.3).

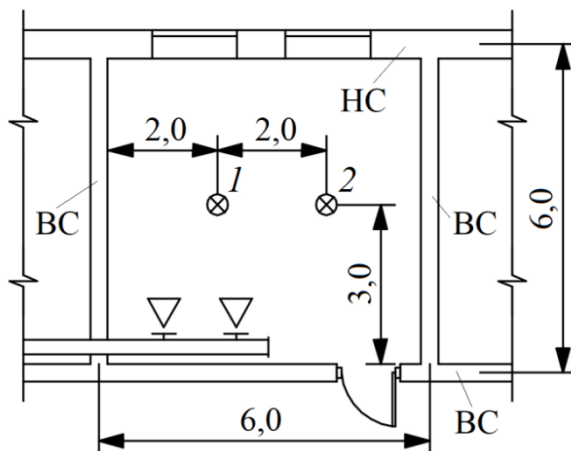


Рис. 3.3. План кабинета изготовления парафина с нанесением точек замеров 1–2

Система воздухораспределения производства № 2 в корпусе № 1 разработана специализированной проектной организацией, у которой имеется соответствующая лицензия. *Экспериментальные* исследования проводились на монтажном участке № 503, в химической лаборатории, на участке термообработки и изготовления киперного листа и на участке осаждения.

Монтажный участок № 503 обслуживается системой кондиционирования воздуха, для этого установлены сплит-системы. Воздух поступает также посредством перетекания через дверные проемы. Удаление воздуха осуществляется через вытяжные решетки, расположенные в верхнем КО помещения. Местный отсос от оборудования осуществляется из верхнего КО (рис. 3.4).

Химическая лаборатория имеет прямоугольную форму (6,0×6,0 м) с высотой  $H = 4,2$  м. Приток воздуха осуществляется приточной системой кондиционирования, а также через дверь вследствие перетекания воздуха в верхний и нижний КО. Воздух удаляется вытяжными решетками из верхнего КО помещения (рис. 3.5).

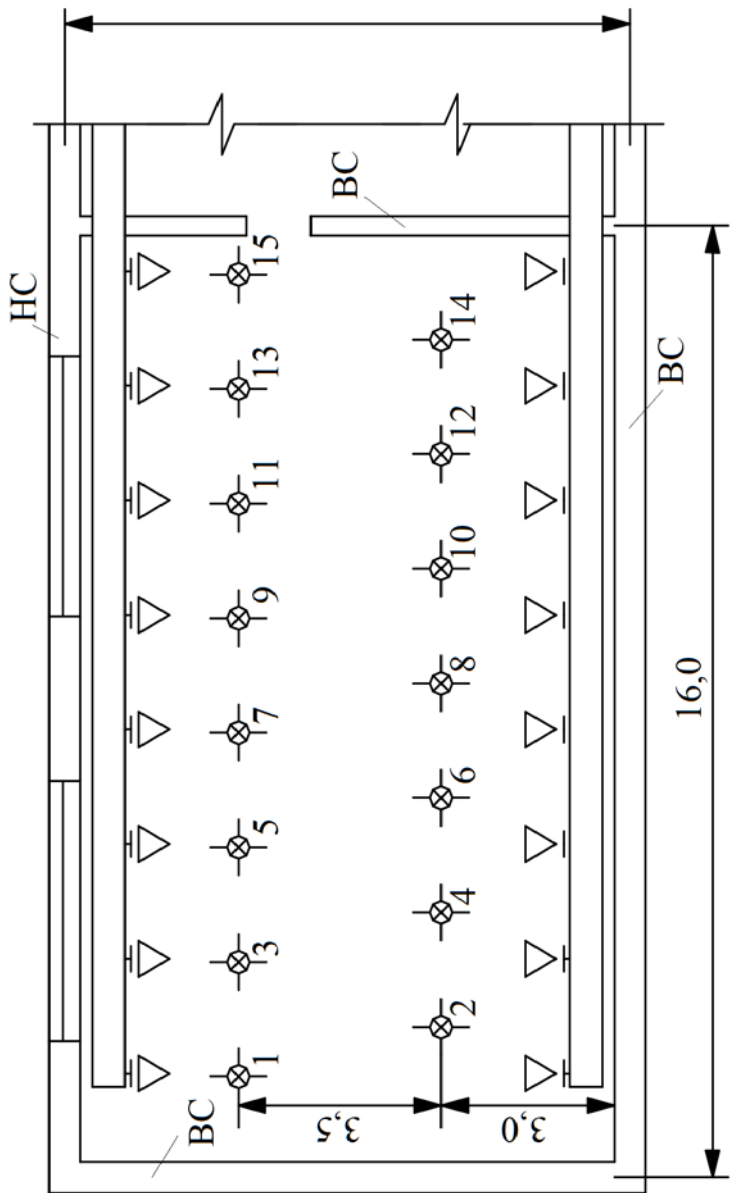


Рис. 3.4. План монтажного участка № 503 с нанесением точек замеров 1–15



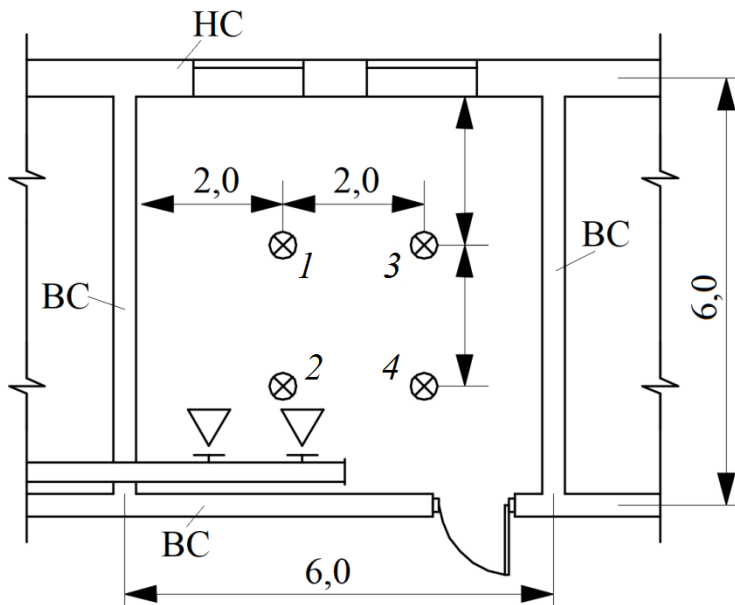


Рис. 3.5. План химической лаборатории с нанесением точек замера 1–4

На участке осаждения приток воздуха осуществляется воздухо-распределителями в верхний КО помещения и через двери (перетекание). Воздух удаляется из нижнего КО (местный отсос) и верхнего КО (общеобменная вытяжка) (рис. 3.6).

На участке термообработки и изготовления киперного листа приток свежего воздуха осуществляется системой кондиционирования воздуха, также наблюдается приток через дверные проемы. Воздух удаляется общеобменной вытяжкой из верхнего КО помещения (рис. 3.7).

В различных помещениях в зависимости от их назначения и схемы организации воздухообмена количество точек замера менялось.

Работы по реконструкции вентиляции корпуса № 1 были завершены в 2020 г. Работы по наладке проводились в 2021 г.

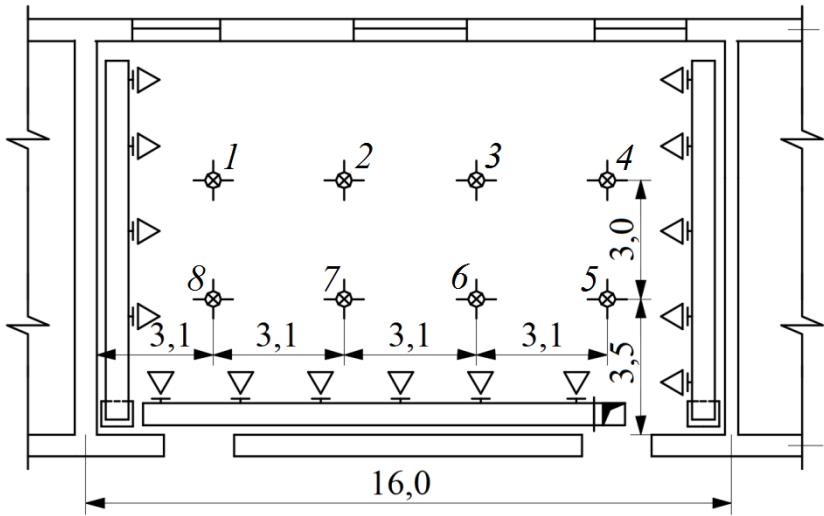


Рис. 3.6. План участка осаднения (3-й этаж) с нанесением точек замера 1–8

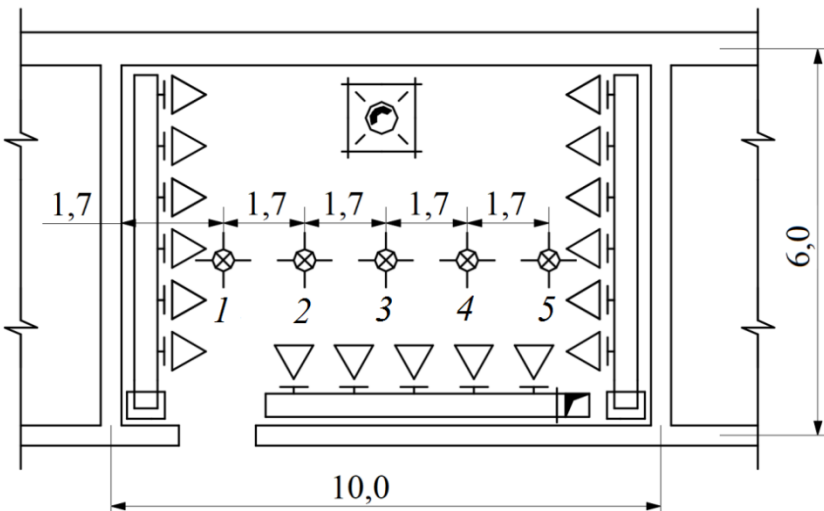


Рис. 3.7. Участок осаднения (4-й этаж).  
Схема расположения измерительных точек 1–5

## 3.2. Методика проведения эксперимента

Программа проведения натуральных наблюдений была составлена на основании ознакомления с проектно-технической документацией, технологическими процессами и способами организации воздухообмена в вентилируемых помещениях.

Эксперимент проводился в следующей последовательности.

В первую очередь были выполнены:

- аэродинамические испытания вентустановок с целью проверки их фактической подачи;
- определение фактического воздухообмена в помещениях;
- отбор и анализ проб воздуха для выявления температуры и содержания вредных примесей в рабочей зоне (нижний КО) помещения.

Второй этап включал:

- составление тепловоздушных или газовых балансов по объему вентилируемого помещения в целом и по отдельным его КО;
- определение необходимого воздухообмена в помещении с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения, предложенной в работе.

На третьем этапе проводилось сопоставление аналитических и экспериментальных результатов.

В процессе выполнения натурального эксперимента скоростные и температурные поля измерялись в нижнем КО помещения с помощью термометров, измерение расходов воздуха, соответствующих испытательному режиму, — с помощью трубки Пито и микроанометра. Динамическое давление, необходимое для определения скорости и расхода воздуха, определялось на выходе струи из воздухо-распределителей в помещениях.

По измеренным величинам температур на аспирационном психрометре Ассмана типа М-34 с помощью психрометрической таблицы определялась величина относительной влажности  $\phi$ , по таблицам находились значения парциальных давлений водяных паров в точках замеров. Полученные данные позволили вычислить остальные параметры воздуха — влагосодержание  $d$ , кг/кг, и энтальпию  $I$ , кДж/кг.

Для вычисления расхода уходящего воздуха определялась скорость движения всасывающего факела в воздухооборных отверстиях. Одновременно в тех же точках регистрировали температуру воздуха.

Все замеры скорости и температуры воздуха проводились термоанометром, прошедшим поверку на специальной установке. Тарировка прибора производилась по общепринятой методике, изложенной в «Руководстве по поверке метеорологических приборов».

### 3.3. Результаты исследований и их анализ

В прил. 2 приведено распределение температур в плане рабочей зоны (нижний КО). В исследуемых вентилируемых помещениях резкое изменение температуры по плану не наблюдается [39]. Во всех помещениях температура воздуха по вертикали растет в соответствии с увеличением высоты помещения. Этот рост имеет линейный характер. Приточный воздух повышает свою температуру от исходной величины до значения, соответствующего температуре в рабочей зоне. Последняя, проходя через верхнюю часть помещения, подсасывает к струе загрязненный теплоизбытками воздух, нагревается, что снижает эффективность использования приточной вентиляции. Замеры параметров воздуха, выполненные практически по всей площади исследуемых помещений, показали очень хорошую равномерность их распределения.

Таким образом, проведенные натурные наблюдения показали достаточно близкую сходимость воздушно-теплого баланса (прил. 1), а также позволили выявить характер распределения параметров воздуха в объеме помещения (см. прил. 2).

Правомерность аналитических исследований, приведенных в предыдущих главах, подтверждена результатами сопоставления расчета воздухообмена в различных помещениях.

Исходные данные для анализа и обработки результатов натурных наблюдений приведены в прил. 1 и 2.

Анализ результатов работ по наладке систем общеобменной вентиляции показал, что неучет нестационарности в вентиляционных процессах при расчете воздухообмена в помещении приводит к значительным отклонениям от истинных величин.

Расчет по определению требуемого воздухообмена выполнен в следующей последовательности:

- определяют среднее значение температуры в рабочей зоне (нижний КО):

$$t_{\text{нко}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}{n}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

- определяют теплоизбытки в помещении;
- с использованием существующих методик определяют теплоизбытки по отдельным КО;

- производят расчет воздухообмена по двухзонной математической модели вентилируемого помещения (на основании части данных натурального эксперимента);
- производят сопоставление результатов аналитических исследований с результатами натурального эксперимента (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Сопоставление результатов аналитических исследований  
с результатами натурального эксперимента**

Производство, цех	Наименование помещения	Расход приточного воздуха, кг/ч		Невязка, %
		Замер по экс- пери- менту	Расчетная величина по двухзонной модели	
Корпус № 1. Производство № 2	Монтажный участок № 503	4972	5248,1	5,26
	Химическая лаборатория	660	637,75	3,37
	Участок осаждения ЦМП (3-й этаж)	4510	3532	21,68
	Участок осаждения (2-й этаж)	6710	5746,4	14,36
Детская клиническая больница	Физиотерапевтический кабинет	935	889,55	4,85
	Рентген-кабинет (малый)	715	750	4,66
	Рентген-кабинет (большой)	1265	1361,9	7,6
	Кабинет изготовления парафина	856	751,8	10,06

Сравнивая полученные аналитическим расчетом величины требуемого воздухообмена с данными натуральных наблюдений, можно констатировать их достаточно близкое соответствие.

## 4. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ

### 4.1. Методические основы расчета воздухообмена общеобменной вентиляции

Основные положения методики для расчета воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения [25–29], где доминируют избытки явной теплоты, при подаче воздуха в воздухораспределительные устройства, расположенные вне рабочей зоны (в верхнем КО), следующие:

1. Требуемый воздухообмен  $G_o$  зависит от  $\beta$ ,  $Q_{\text{нко}}$ ,  $Q_{\text{вко}}$  и определяется по заданному значению температуры воздуха в обслуживаемой зоне (нижний КО):

$$G_o = (Q_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}} (\beta - 1) / \beta) / (c_v (t_{\text{нко}} - t_o)). \quad (4.1)$$

Чтобы воспользоваться предлагаемым аналитическим способом расчета требуемого воздухообмена, необходимо иметь подробную информацию о тепломассообменных процессах в рассматриваемом помещении и определить избытки потоков теплоты по отдельным КО помещения. Для этого требуется анализ потоков теплоты (конвективного, лучистого и скрытого), поступающих и уходящих из каждого КО помещения. Основы методики такого анализа разработаны в [7; 11], а применительно к аэрации промышленных зданий — в [30–31].

2. Скорость воздуха на истечении определяется с учетом допустимой скорости на входе струи в рабочую зону помещения  $v_x \leq v_{\text{доп}}$  [26–27] для компактных и веерных струй:

$$v_o = \rho_o \cdot v_x^2 \cdot x_n^2 / (m^2 \cdot G_o \cdot K \cdot m^2) \quad (4.2)$$

или для плоской струи:

$$v_o = \rho_o \cdot v_x^2 \cdot l \cdot x_n / (m^2 \cdot G_o \cdot K \cdot m^2). \quad (4.3)$$

3. Перепады температуры воздуха в рабочей зоне (нижний КО)  $v_{\text{в.вх}}$  и значение минимальной температуры воздуха в струе  $v_x$  проверяется из условия  $t_x - t_{\text{вх}} \leq \Delta t_2$ . При этом в зоне разворота струи в НКО принимается, что  $t_{\text{в.вх}} \approx t_{\text{стр}}$  (средней температуре струи). Для компактных и веерных струй

$$t_x = t_{\text{вко}} - (t_{\text{вко}} - t_o) n \sqrt{F_o} / x_{\text{п}}; \quad (4.4)$$

для плоской струи:

$$t_x = t_{\text{вко}} - (t_{\text{вко}} - t_o) n \sqrt{b_o} / x_{\text{п}}; \quad (4.5)$$

$$t_{\text{в.вх}} = t_{\text{стр}} = (t_o + (\beta - 1) t_{\text{вко}}) / \beta. \quad (4.6)$$

Температура воздуха, уходящего из помещения  $t_{\text{yx}} = t_{\text{вко}}$ , определяется из уравнения теплового баланса помещения:

$$t_{\text{вко}} = t_o + \frac{Q_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}}}{c_{\text{в}} \cdot G_o}. \quad (4.7)$$

4. Для струй, настилающихся на потолок, проверяется безотрывность течения по рекомендациям [18].

Расчет воздухообмена проводится методом последовательного приближения, так как  $\beta = f(F_o, b_o)$ .

Составленная программа расчета на ЭВМ весьма компактная, позволяет выбрать вариант с минимальным воздухообменом при соблюдении требуемых условий на входе струи в обслуживаемую зону (прил. 4).

Для аналитического расчета требуемого воздухообмена в работе приводится блок-схема алгоритма для вычисления на ПЭВМ (рис. 4.1), последняя позволяет совместить расчет воздухообмена с расчетом струйной подачи воздуха.

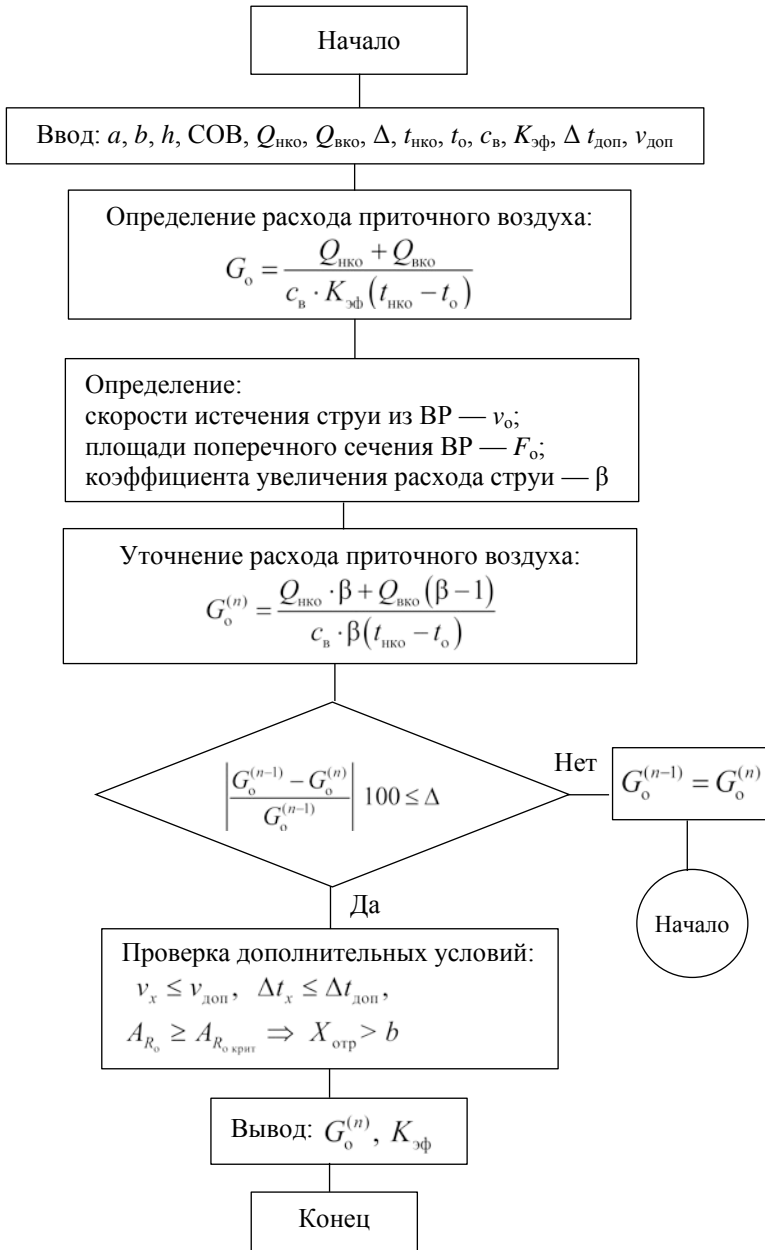


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритма для вычисления на ПЭВМ



## 4.2. Критерии оценки схем организации воздухообмена

Эффективность систем с общеобменной вентиляцией обычно оценивают степенью неравномерности распределения параметров воздуха по высоте с помощью коэффициента воздухообмена [32]:

$$K_{\text{эф}} = \frac{\Pi_{\text{yx}} - \Pi_0}{\Pi_{\text{нко}} - \Pi_0}. \quad (4.8)$$

Чем выше значение  $K_{\text{эф}}$ , тем меньшим расходом воздуха общеобменной вентиляции обеспечиваются требуемые параметры в нижнем КО.

Теория струйного теплообмена в вентилируемом помещении [11; 33] дает возможность аналитически определить коэффициент воздухообмена.

Рассмотрим наиболее распространенную схему распределения приточного воздуха в нижнем КО из насадков, расположенных в верхнем КО (часто применяемую при организации воздухообмена в промышленных зданиях). Вредные выделения верхнего КО вместе с воздухом, подсосываемым к струе, поступают в нижний КО помещения. При составлении уравнения балансов по одному из вредных выделений для нижнего КО этот фактор необходимо учесть. Очевидно, что чем длиннее траектория струи в верхнем КО, тем больше  $\beta$ .

Требуемый воздухообмен при двухзонной модели вентилируемого помещения определяется как

$$G_0 = \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta}}{\Pi_{\text{нко}} - \Pi_0}, \quad (4.9)$$

где сомножитель у  $M_{\text{вко}}$  показывает долю избытков вредных выделений в верхнем КО, поступающую в нижний КО помещения.

Уравнение (4.9) в общепринятом виде:

$$G_0 = \frac{M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}}}{K_{\text{эф}} (\Pi_{\text{нко}} - \Pi_0)}. \quad (4.10)$$

Коэффициент воздухообмена можно выразить из сопоставления выражений (4.9) и (4.10):

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{\bar{M}_{\text{нко}} + \bar{M}_{\text{вко}} (\beta - 1) / \beta}, \quad (4.11)$$

где

$$\bar{M}_{\text{нко}} = M_{\text{нко}} / (M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}}); \quad (4.12)$$

$$\bar{M}_{\text{вко}} = M_{\text{вко}} / (M_{\text{нко}} + M_{\text{вко}}). \quad (4.13)$$

Когда в помещении два притока ( $n = 2$ ) и две вытяжки ( $m = 2$ )

$$K_{\text{эф}} = \frac{1 + \beta_{\text{п}} - \beta_{\text{мо}}}{\bar{M}_{\text{нко}} + \bar{M}_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta + \beta_{\text{п}} - \beta_{\text{мо}}}}. \quad (4.14)$$

Для наиболее сложного случая, когда в помещении несколько притоков и вытяжек

$$K_{\text{эф}} = \frac{1 + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}{\bar{M}_{\text{нко}} + \bar{M}_{\text{вко}} \frac{\beta - 1}{\beta + \sum_{i=1}^n \beta_i - \sum_{j=1}^m \beta_j}}. \quad (4.15)$$

При доминировании в помещении избытков явной теплоты уравнение коэффициента эффективности воздухообмена для наиболее простого случая примет следующий вид [25; 26]:

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{\bar{Q}_{\text{нко}} + \bar{Q}_{\text{вко}} (\beta - 1) / \beta}, \quad (4.16)$$

где

$$\bar{Q}_{\text{нко}} = Q_{\text{нко}} / (Q_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}}); \quad (4.17)$$

$$\bar{Q}_{\text{вко}} = Q_{\text{вко}} / (Q_{\text{нко}} + Q_{\text{вко}}). \quad (4.18)$$

Диапазон изменения коэффициента воздухообмена в помещениях, где основная вредность — это избыток теплоты или потоки других вредных выделений (согласно формуле (4.16)  $K_{\text{эф}} = f(\bar{Q}_{\text{нко}}, \bar{Q}_{\text{вко}}, \beta)$ ), представлен на графике рис. 4.2. Здесь коэффициент воздухообмена по мере возрастания относительного расхода воздуха в струе ( $\beta$ ) снижается и при больших его значениях стремится к единице ( $K_{\text{эф}} = 1$ ), что означает интенсивное перемешивание воздуха в помещении. Распределение теплоты по отдельным КО также влияет на величину коэффициента воздухообмена. Так, при полном тепловыделении в нижней КО  $K_{\text{эф}} = 1$ , т.е. примет минимальное значение, а при  $\bar{Q}_{\text{нко}} = 0$   $K_{\text{эф}} = \infty$ .

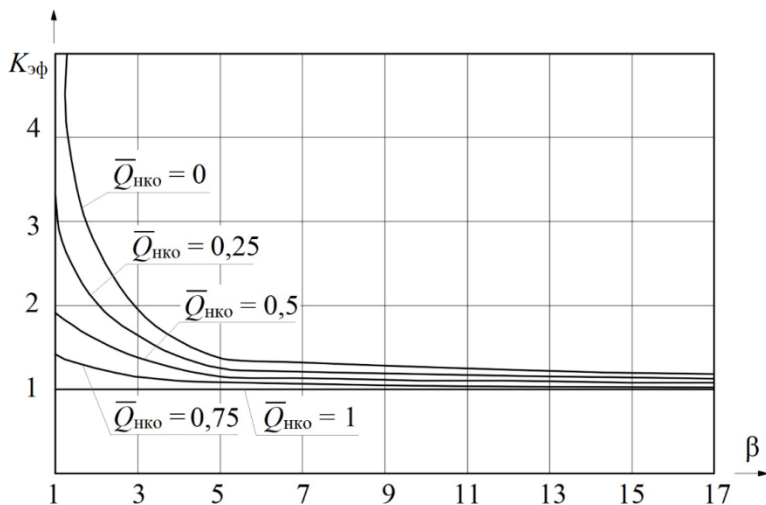


Рис. 4.2. Диапазон изменения коэффициента воздухообмена:

$$K_{эф} = f(\bar{Q}_{нко}, \beta)$$

С учетом лучистого теплообмена между верхним и нижним КО [30] формула для определения коэффициента воздухообмена в наиболее простых случаях будет определяться как

$$K_{эф} = \frac{1}{\bar{Q}_{нко} + \bar{Q}_{вко} \frac{\beta - 1}{\beta} + \frac{\bar{Q}_{л \text{ вко-нко}}}{\beta}}; \quad (4.19)$$

$$\bar{Q}_{л \text{ нко-вко}} = \frac{Q_{л \text{ вко-нко}}}{Q_{нко} + Q_{вко}}. \quad (4.20)$$

В результате учета лучистого теплопоступления с верхнего КО в нижний график зависимостей  $K_{эф} = f(\beta, \bar{Q}_{нко}, \bar{Q}_{вко}, \bar{Q}_{л \text{ вко-нко}})$  принимает более реальный вид (рис. 4.3). Из этого графика следует, что при полном тепловыделении в верхний КО коэффициент воздухообмена всегда больше единицы, однако уже при  $\beta \approx 10$  получится эффект полного перемешивания ( $K_{эф} = 1$ ). Таким образом, при  $\beta \approx 10$ , независимо от распределения избытков явной теплоты,  $K_{эф} \approx 1$ , следовательно, величиной лучистого теплообмена между КО можно пренебречь.

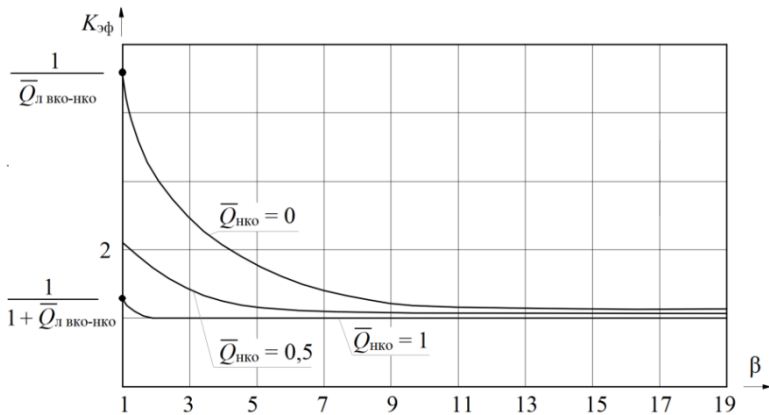


Рис. 4.3. Диапазон изменения коэффициента воздухообмена с учетом лучистого теплообмена между КО:  $K_{эф} = f(\bar{Q}_{нко}, \bar{Q}_{л\text{ вко-нко}}, \beta)$

Для оценки эффективности работы системы общеобменной вентиляции наряду с коэффициентом воздухообмена другим показателем может являться кратность воздухообмена  $K_p$  (1/ч), которая в сущности по физическому смыслу сходна с последним.

На графике рис. 4.4 показано, как меняется кратность воздухообмена в помещениях с избытками явной теплоты в зависимости от величины относительного расхода воздуха  $\beta$  в приточной струе и соотношения распределения относительной величины явной теплоты по отдельным КО. При полном тепловыделении в нижний КО вентилируемого помещения кратность воздухообмена — постоянная величина, независимо от  $\beta$ , и максимальная для данного помещения. По мере снижения относительных избытков, выделенных в нижнем КО, кратность воздухообмена снижается, однако в зависимости от относительного расхода воздуха в струе эта величина возрастает. При больших значениях  $\beta$  кратность воздухообмена независимо от распределения теплоты стремится к его максимальной величине.

Система общеобменной вентиляции должна быть спроектирована так, чтобы обеспечивать минимально возможную величину относительного расхода воздуха в приточной струе с возможностью обеспечения оптимального распределения теплоты между КО.

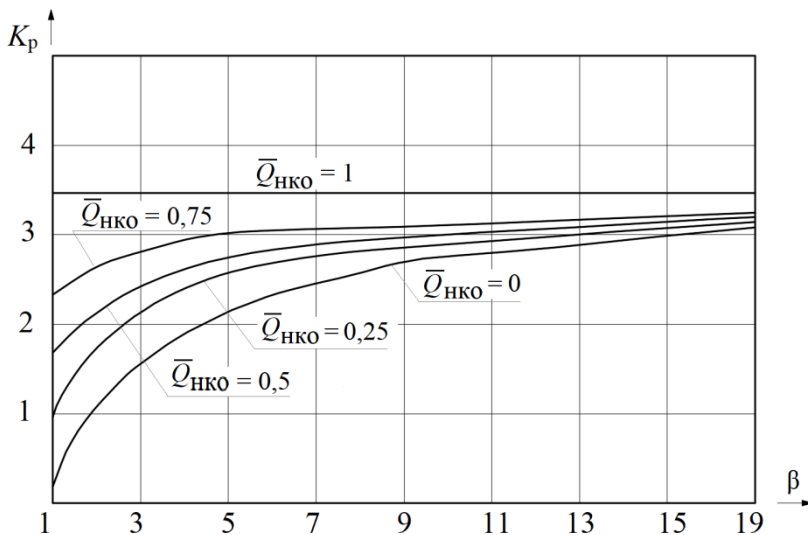


Рис. 4.4. Зависимости кратности воздухообмена от величины относительного расхода воздуха в струе:  $K_p = f(\bar{Q}_{\text{НКО}}, \beta)$

### 4.3. Эффективность расчета требуемого воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения

Использование предложенной методики в процессе проектирования систем общеобменной вентиляции в помещениях общественных зданий позволяет снизить расход приточного воздуха, обеспечив при этом необходимые параметры воздуха в обслуживаемой зоне. В результате одновременно снижаются расходы теплоты на вентиляцию помещений в холодный и переходной периоды года и расход электроэнергии, затрачиваемой на работу электродвигателей приточных вентиляционных установок [34].

В качестве примера с целью выявления технико-экономических показателей, получаемых при расчете общеобменной вентиляции с применением предложенной в работе методики по сравнению с методом рекомендованной в современном СП, был взят учебный класс: в классе осуществляется общеобменная вентиляция. Воздух подается тремя воздухораспределителями типа РР 200×200. Технико-экономический расчет проведен в ценах 2021 г.

Экономический эффект, р./год, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_\Phi = \Delta Q \cdot C_T + W \cdot \mathcal{C}_\mathcal{E}, \quad (4.21)$$

где  $\Delta Q$  — количество сэкономленной теплоты:

$$\Delta Q = c_v \cdot \Delta G_o \cdot n_{\text{отп}} (t_v - t_{\text{cp}}) 10^{-6}, \quad (4.22)$$

где  $\Delta G_o$  — уменьшение расхода приточного воздуха:

$$\Delta G_o = G_o^{\text{од}} - G_o^{\text{двух}}, \quad (4.23)$$

здесь  $G_o^{\text{од}}$  и  $G_o^{\text{двух}}$  — воздухообмен, рассчитанный соответственно по одно- и двухзонной модели;  $n_{\text{отп}}$  — продолжительность отопительного периода [35];  $t_v$  — нормируемая температура воздуха в рабочей (обслуживаемой) зоне вентилируемого помещения;  $t_{\text{cp}}$  — средняя температура наружного воздуха в течение отопительного периода [35];

$C_T$  — стоимость теплоты, р./Гкал (принимается по рекомендованным данным — 2412,01 р./Гкал);

$W$  — годовой расход электроэнергии:

$$W = 0,01 \cdot N_n \cdot T, \quad (4.24)$$

здесь  $N_n$  — номинальная мощность электродвигателя, обеспечивающего работу приточной вентиляции;  $T$  — число часов работы электродвигателя за год;

$\mathcal{C}_\mathcal{E}$  — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии,  $\mathcal{C}_\mathcal{E} = 6,443$  р./кВт·ч.

На основе вышеизложенного проведен расчет экономического эффекта, полученного при использовании двухзонной математической модели вентилируемого помещения, на стадии проектирования вентиляции учебного класса:  $\mathcal{E}_\Phi = 18\,200$  р./год.

Технико-экономический расчет показал, что применение аналитического метода расчета воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения (один учебный класс) позволяет получить бóльший экономический эффект по сравнению с методом, предложенным в современном СП (однозонная модель).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При расчете требуемого воздухообмена по методике, рекомендованной в современном СП (однозонная модель), не учитывают схему организации воздухообмена, а также сложные тепломассообменные процессы в вентилируемом помещении.

Анализ процесса распространения струй в вентилируемых помещениях показал, что основные формулы для их расчета базируются на усредненных величинах и коэффициентах. Уточнение характеристик, описывающих струйное течение, позволяет скорректировать основные величины, используемые при расчете требуемого воздухообмена с применением двухзонной математической модели вентилируемого помещения, тем самым уточнив объем требуемого воздухообмена.

Анализ тепломассообменных процессов с равномерно распределенной теплотой при наличии перетекания или без него показал, что существует возможность предопределения места, количества и температуры перетекающего воздуха, которую можно использовать при составлении математической модели тепловоздушных процессов в двухзонном вентилируемом помещении.

Выведенная аналитическим способом формула для определения коэффициента эффективности воздухообмена учитывает тепловоздушные процессы в вентилируемом помещении и одинаково точна для помещений с различными источниками вредных выделений, независимо от их расположения по плану помещения и от схемы организации воздухообмена.

Разработанные методические основы принципов построения процессов на  $I-d$ -диаграмме влажного воздуха в вентилируемом помещении с двумя КО позволяют: 1) определять параметры приточного воздуха для обеспечения в обслуживаемой зоне заданных параметров (прямая задача); 2) при заданных параметрах притока уточнять параметры воздуха в обслуживаемой зоне (обратная задача).

Результаты расчетов воздухообмена, полученного по методике с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения, и воздухообмена, определенного в ходе натурных экспериментов, подтвердили правомерность принятой математической модели и показали возможность использования предложенной методики в инженерных расчетах.

Методические основы расчета воздухообмена общеобменной вентиляции, разработанные с применением двухзонной математической модели вентилируемого помещения, позволяют провести его точный расчет.

Анализ возможных  $K_{эф}$ ,  $K_p$  для выбора наиболее рационального варианта схемы организации воздухообмена в помещении при подаче приточного воздуха в верхний КО показал, что коэффициент эффективности воздухообмена снижается, а кратность воздухообмена растет при увеличении расстояния от выхода струи в помещение до ее входа в рабочую зону (увеличение  $x$  и  $\beta$ ). Этот процесс тем заметнее, чем большая доля избытков вредных веществ поступает в верхний КО помещения.

Технико-экономический расчет показал, что применение аналитического метода расчета требуемого воздухообмена с использованием двухзонной математической модели вентилируемого помещения (один учебный класс) позволяет получить экономический эффект по сравнению с методом, предложенным в современном СП (однозонная модель).



## Библиографический список

1. Аше Б.М. Отопление и вентиляция / Б.М. Аше. — 2-е изд., перераб. — Т. 1–2. — Ленинград — Москва : Госстройиздат, 1939. — 194 с.
2. Батулин В.В. Основы промышленной вентиляции / В.В. Батулин. — 4-е сокр. изд. — Москва : Профиздат, 1990. — 450 с.
3. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях / М.И. Гримитлин. — Москва : Стройиздат, 1982. — 164 с.
4. Успенская Л.Б. Дискретно-вероятностная оптимизация систем воздухораспределения при общеобменной вентиляции и технологическом кондиционировании производственных помещений : автореф. дис. ... доктора технических наук : 05.23.03 / Успенская Лия Борисовна. — Санкт-Петербург : СПбИСИ, 1992. — 63 с.
5. Позин Г.М. Основы расчета тепловоздушного режима производственных помещений с механической вентиляцией : автореф. дис. ... доктора технических наук : 05.23.03 / Позин Гарий Моисеевич. — Санкт-Петербург, 1991. — 54 с.
6. Сборщиков С.Б. [и др.]. Основы проектирования, строительства, эксплуатации зданий и сооружений / С.Б. Сборщиков, С.В. Саргсян. — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2015.
7. Титов В.П. Повышение эффективности общеобменной вентиляции // Сб. докл. конф. «Новое в теории и практике воздухораспределения в промышленных и общественных зданиях». — Ленинград : ЛДНТП, 1988. — С. 38–42.
8. Авдолимов Е.М. Инженерные системы зданий и сооружений. Теплогазоснабжение и вентиляция / Е.М. Авдолимов, В.А. Жила, Л.И. Жуйкова [и др.] ; под ред. П.А. Хаванова : учебник. — Москва : Издательский центр «Академия», 2014. — 320 с.
9. Комплексная оценка эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса. — Москва : Информэлектро, 1989. — 118 с.
10. Мелик-Аракелян А.Т. О переносе тепла из верхней зоны помещения в рабочую в условиях устойчивой стратификации / А.Т. Мелик-Аракелян, А.В. Петров // Сб. «Тепловой режим систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплогазоснабжения». — Москва, 1980. — С. 43–48.
11. Сорокин Н.С. Вентиляция, отопление и кондиционирование воздуха на текстильных предприятиях / Н.С. Сорокин. — Москва : Легкая индустрия, 1974. — 328 с.
12. Богословский В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богословский. — Москва : Стройиздат, 1979. — 248 с.

13. Шилькрот Е.О. К расчету естественной вентиляции горячих цехов / Е.О. Шилькрот, И.А. Шепелев // Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха в промышленных зданиях : Сб. тр. ЦНИИ-Промзданий. — Вып. 26. — Москва, 1972. — С. 4–16.

14. Позин Г.М. Принципы аналитического определения коэффициента эффективности воздухообмена / Г.М. Позин. — В кн.: Исследование различных способов воздухообмена в производственных помещениях. — Москва, 1975. — С. 43–53.

15. Nevins R.G., Teyerherm A.M. Effect of floor surface temperature on Comfort // ASHRAE Trans. — 1967. — V. 3. — N 2. — P. 111–118.

16. Богуславский Л.Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха : справочное пособие / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак. — Москва : Стройиздат, 1990. — 624 с.

17. Мелик-Аракелян А.Т. Исследование организации воздухообмена в кондиционируемых помещениях на примере машинных залов вычислительных центров : автореф. дис. ... кандидата технических наук : 05.23.03 / Мелик-Аракелян Аркадий Телемакович ; Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. — Москва, 1978.

18. Богословский В.Н. Строительная теплофизика: Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В.Н. Богословский. — Москва : Высшая школа, 1982. — 415 с.

19. Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич. — Москва : Стройиздат, 1990. — 300 с.

20. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства : в 2 ч. / под ред. И.Г. Старовойтова. — 2-е изд., перераб. и доп. Ч. 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха. — Москва : Стройиздат, 1990. — 502 с.

21. Титов В.П. Учет влияния лучистого теплообмена на требуемый воздухообмен в помещениях с теплоизбытками // Сб. «Повышение энергетической эффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха» / В.П. Титов, С.В. Саргсян. — Волгоград, 1990.

22. Титов В.П. Расчет воздухообмена при струйной подаче воздуха по схеме сверху - вверх / В.П. Титов // Сб. ст. «Энергосбережение в системах вентиляции и кондиционирования воздуха». — Москва : Наука, 1990. — С. 68–73.

23. Титов В.П. Исследование теплового режима плоской неизотермической струи, настилающейся на нагретую горизонтальную поверхность пола / В.П. Титов, В.Г. Лельков. — В кн.: Теплоснабжение и вентиляция. — Москва : МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1977. — № 144. — С. 149–156.

24. Титов В.П. Курсовое и дипломное проектирование вентиляции гражданских и промышленных зданий / В.П. Титов, Э.В. Сазонов, Ю.С. Краснов [и др.]. — Москва : Стройиздат, 1985. — 208 с.

25. Титов В.П. Воздушный режим здания : дис. ... доктора технических наук (в форме науч. докл.) : 05.23.03 / Титов Владимир Павлович. — Москва : МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1987. — 46 с.
26. Поляк Г.Н. Журнал технической физики. — 1935. — Вып. 3; 1940. — № 1: Сборник: Конвективный и лучистый теплообмен. — Изд-во АН СССР, 1960.
27. Малявина Е.Г. Строительная теплофизика : учебное пособие. — Москва : МГСУ, 2011. — 73 с.
28. Шилькрот Е.О. Аэрация одноэтажных промышленных зданий со значительными тепловыделениями : автореф. дис. ... кандидата технических наук : 05.23.03 / Шилькрот Евгений Овсеевич. — Москва : МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1977.
29. Титов В.П. Построение процессов изменения состояния воздуха на *I-d*-диаграмме при двухзонной модели вентилируемого помещения / В.П. Титов, С.В. Саргсян ; Московский инженерно-строительный институт. — Москва, 1991. — Деп. в ВНИИТПИ 18.02.91 № 10910.
30. Титов В.П. Универсальная двухзонная модель помещения для расчета требуемого воздухообмена / В.П. Титов, С.В. Саргсян // Сб. «Охрана труда в промышленности». — Пенза, 1991.
31. Березина Н.И. Оценка распределения температуры воздуха в помещении с воздушным отоплением / Н.И. Березина, Г.М. Позин, Е.О. Шилькрот / В кн.: Гидродинамика в отопительных-вентиляционных устройствах : межвузовский сборник. — Казань, 1982. — С. 47–49.
32. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. — Москва : Стройиздат, 1978. — 144 с.
33. Шорин С.Н. Теплопередача излучением при лучистом отоплении / С.Н. Шорин // Сб. «Современные вопросы отопления и вентиляции». — Москва : Госстройиздат, 1949. — С. 17–22.
34. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств / В.М. Эльтерман. — Москва : Химия, 1980. — 288 с.
35. Ливчак И.Ф. Когда возникает «тепловая подушка» и «температурное перекрытие» / И.Ф. Ливчак // Водоснабжение и санитарная техника. — 1965. — № 7. — С. 31–34.
36. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. — Москва : ГУП ЦПП, 2018.
37. Титов В.П. К вопросу о повышении эффективности общеобменной вентиляции / В.П. Титов // Сб. докл. конф. «Повышение эффективности промышленной вентиляции». — Москва : ЭДНТП, 1989. — С. 42–45.
38. Fanger P.O. Анализ теплового комфорта и приложения в инженерии окружающей среды / McGraw-Hill. — Нью-Йорк, 1970.

39. Саргсян С.В. Распределение приточного воздуха в системах вентиляции и кондиционирования / С.В. Саргсян, А.Г. Рымаров. — Москва : МГСУ, 2012.

40. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (переиздание с Поправкой : межгосударственный стандарт : дата введения 2013-01-01 / Росстандарт. — Изд. официальное. — Москва : Стандартинформ, 2019.

41. Саргсян С.В. Учет влияния лучистого теплообмена на величину требуемого воздухообмена // Вестник МГСУ, Спецвыпуск 7/2011. — Москва : МГСУ. — С. 336–341.

42. Саргсян С.В. Критерии для выбора рациональной схемы организации воздухообмена // Вестник МГСУ, Спецвыпуск 7/2011. — Москва : МГСУ. — С. 341–346.

43. Саргсян С.В. Учет влияния расхода воздуха при определении параметров теплоизоляционного слоя на воздуховодах систем вентиляции и кондиционирования воздуха / С.В. Саргсян, А.О. Абаев, Н.В. Сеничкин // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая. — 2013. Вып. 4(29). — URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SargsyanAbaevSenichkin-2013\\_4\(29\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SargsyanAbaevSenichkin-2013_4(29).pdf)

44. Саргсян С.В. Особенности проектирования теплоизоляции изотермических резервуаров / С.В. Саргсян, В.И. Прокопьев // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — Вып. 8. — С. 35–38.

45. Саргсян С.В. Расчет воздухообмена лаборатории испытаний строительных изделий и конструкций на огнестойкость методом позонных балансов / С.В. Саргсян, А.Д. Спирин // Вестник МГСУ. — 2014. — № 8. — С. 127–135.

46. Саргсян С.В. Влияние коэффициента облученности на величину требуемого воздухообмена в теплонапряженных помещениях / С.В. Саргсян, К.М. Агаханова // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — Вып. 8. — С. 39–41.

47. Саргсян С.В. Исследование способов организации воздухообмена и систем воздушораспределения на физических моделях в лабораторных условиях / С.В. Саргсян // Научное обозрение. Раздел: Строительство и архитектура, инженерное дело. — 2015. — № 16. — С. 68–71.

48. Саргсян С.В. Методика лабораторных испытаний способов организации воздухообмена на физических моделях / С.В. Саргсян // Научное обозрение. Раздел : Строительство и архитектура, инженерное дело. — 2015. — № 16. — С. 76–79.

49. Саргсян С.В. Температурная стратификация воздуха по высоте помещения при перетекании между смежными помещениями / С.В. Саргсян, Е.Л. Спирина, О.А. Капля // Научное обозрение. Раздел : Строительство и архитектура. — 2016. — № 13. — С. 41–45.

50. Саргсян С.В. Влияние величин, составляющих теплопотери на расход удаляемых продуктов горения из помещения // Научное обозрение. Раздел : Строительство и архитектура. — 2016. — № 11. — С. 84–88.
51. Саргсян С.В. Учет конструктивных особенностей наружных ограждений при расчете теплопотерь в высотных зданиях // Научное обозрение. Раздел : Строительство и архитектура. — 2016. — № 11. — С. 36–39.
52. Саргсян С.В. Влияние динамического давления внешней среды на процесс формирования результирующей температуры помещения // Научное обозрение. Раздел : Строительство и архитектура. — 2017. — № 11.
53. Саргсян С.В. Кольцевая схема утилизации теплоты при одновременной работе систем теплоснабжения и холодоснабжения // Научное обозрение. Раздел : Строительство и архитектура. — 2017. № 10.
54. Саргсян С.В. Совершенствование инженерных методов расчета вентиляции крытой ледовой арены / С.В. Саргсян, В.Н. Воропаев, В.А. Борисова // С. О. К. — 2019. — № 3. — С. 74–79.
55. Sargsyan S.V., Borisova V.A. Mathematical model of spatial heat exchange of rooms with linearly sources of heat Interhational multi-conference on industrial engineering and modern technologies, 2-4 October 2018. — Vladivostok, Russia (2018).
56. Sargsyan S.V., Borisova V.A. Improvement of engineering methods for calculating ventilation and air conditioning of museum storage facilities Interhational multi-conference on industrial engineering and modern technologies, October 2018. — Vladivostok, Russia (2020).
57. Sargsyan S.V., Borisova V.A. Improvement of engineering methods for calculating ventilation and air conditioning of museum storage facilities Interhational multi-conference on industrial engineering and modern technologies, October 2018. — Vladivostok, Russia (2020).
58. Sargsyan S.V., Tsap A. Air temperature stratification when flowing between rooms Interhational multi-conference FORM 2021, April 2021. — Moscow, Russia (2021).
59. Саргсян С.В. Проектирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха высотных зданий и сооружений : методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Инженерные системы высотных и большепролетных зданий и сооружений» по направлению подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений». — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2021.

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $A$  — коэффициент турбулентного обмена,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $a, l$  — длина,  $\text{м}$ ;  
 $b$  — температурный коэффициент;  
 $c$  — удельная теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $c_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ ;  
 $C$  — коэффициент вредных примесей в воздухе,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  
 $d$  — влагосодержание,  $\text{г}/\text{кг}$ ;  
 $F$  — площадь,  $\text{м}^2$ ;  
 $G$  — массовый расход воздуха,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  
 $H, h$  — высота,  $\text{м}$ ;  
 $I$  — энтальпия,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  
 $K$  — поток количества движения,  $\text{Н} \cdot \text{м}/\text{с}^2$ ;  
 $K_p$  — кратность воздухообмена,  $1/\text{ч}$ ;  
 $K_{\text{эф}}$  — коэффициент эффективности воздухообмена;  
 $L$  — объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  
 $M$  — потоки массы (влаги или другой вредности),  $\text{кг}/\text{с}$ ;  
 $m$  — число вытяжек;  
 $n$  — число притоков;  
 $\Pi$  — обобщенный параметр воздуха;  
 $Q$  — потоки теплоты,  $\text{Вт}$ ;  
 $r$  — удельная теплота парообразования,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  
 $T, t$  — температура,  $^\circ\text{К}$ ;  $^\circ\text{C}$ ;  
 $V$  — объем,  $\text{м}^3$ ;  
 $v$  — скорость воздуха,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $\beta$  — относительный расход воздуха в струе;  
 $\varepsilon_{\text{пр}}$  — относительный коэффициент излучения поверхности;  
 $\varphi$  — относительная влажность воздуха, %;  
 $\varphi_{i-j}$  — коэффициент облученности;  
 $x$  — расстояние от истечения,  $\text{м}$ ;  
КО — контрольный объем;  
ВКО — верхний контрольный объем;  
НКО — нижний контрольный объем;  
ОВ — общеобменная вентиляция;  
КП — контрольная поверхность;  
КВ — кондиционирование воздуха;  
СОВ — схема организации воздухообмена;  
ВРЗ — воздушный режим здания;  
 $v$  — внутренний воздух;

п.н — приточный насадок;  
н — наружный воздух;  
л — лучистый;  
п — воздух помещения;  
р.з — рабочая зона;  
стр — струя;  
ух — уходящий воздух;  
х — расстояние  $x$  от истечения струи;  
о — срез приточного насадка;  
пол — полное;  
я — явное;  
вл — влаговыделение;  
вр — вредности;  
min — минимальное значение;  
max — максимальное значение.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

### Метеорологическое состояние воздушной среды в характерных точках замера

Точка замера по плану	Место замера	Среднезамеренные параметры			По СП	
		Температура, °С	Относительная влажность, %	Подвижность, м/с	Подвижность, м/с	Относительная влажность, %
1	2	3	4	5	6	7

#### Физиотерапевтическое отделение

Дата: 15 июля 2021 г.; наружный воздух:  $t = 22,5$  °С;  $\phi = 59$  %

1	Физиотерапевтический отдел	25	43	0,25	0,3	40÷60
2	Рабочее место	24	51	0,20	0,3	40÷60
3	Рабочее место	24	51	0,20	0,3	40÷60
4	Рабочее место	23	59	0,20	0,3	40÷60
5	Рабочее место	24	51	0,20	0,3	40÷60



Точка замера по плану	Место замера	Среднезамеренные параметры				По СП	
		Температура, °С	Относительная влажность, %	Подвижность, м/с	Подвижность, м/с	Относительная влажность, %	Относительная влажность, %
1	2	3	4	5	6	7	
<i>Рентген-кабинет (большой)</i>							
Дата: 16 июля 2021 г.; наружный воздух: $t = 25\text{ °C}$ ; $\varphi = 40\%$							
1	Рабочее место	23,5	48	0,3	0,3	40÷60	
2	Рабочее место	23,0	48	0,25	0,3	40÷60	
3	Рабочее место	23,0	48	0,25	0,3	40÷60	
4	Рабочее место	23,5	48	0,3	0,3	40÷60	
<i>Рентген-кабинет (малый)</i>							
Дата: 17 июля 2021 г.; наружный воздух: $t = 24\text{ °C}$ ; $\varphi = 55\%$							
1	Рабочее место	22,5	52	0,25	0,3	40÷60	
2	Рабочее место	22,0	50	0,25	0,3	40÷60	
3	Рабочее место	22,0	50	0,3	0,3	40÷60	
<i>Кабинет изготовления парафина</i>							
Дата: 18 июля 2021 г.; наружный воздух: $t = 26\text{ °C}$ ; $\varphi = 42\%$							
1	Рабочее место	22,6	40	0,25	0,3	40÷60	
2	—	22,8	40	0,25	0,3	40÷60	

Точка замера по плану	Место замера	Среднезамеренные параметры			По СП	
		Температура, °С	Относительная влажность, %	Подвижность, м/с	Подвижность, м/с	Относительная влажность, %
1	2	3	4	5	6	7
<i>Монтажный участок № 503</i>						
Дата: 12 августа 2021 г.; наружный воздух: $t = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 39\%$						
1	Рабочее место	23,0	45	0,2	0,3	40÷60
2	Рабочее место	23,0	45	0,3	0,3	40÷60
3	Рабочее место	23,5	44	0,2	0,3	40÷60
4	Рабочее место	23,0	45	0,2	0,3	40÷60
5	Рабочее место	23,5	44	0,25	0,3	40÷60
6	Рабочее место	23,0	45	0,25	0,3	40÷60
7	Рабочее место	24,0	44	0,25	0,3	40÷60
8	Рабочее место	24,0	44	0,25	0,3	40÷60
9	Рабочее место	23,0	45	0,3	0,3	40÷60
10	Рабочее место	23,0	45	0,3	0,3	40÷60
11	Рабочее место	23,0	45	0,3	0,3	40÷60
12	Рабочее место	23,5	44	0,2	0,3	40÷60
13	Рабочее место	23,0	45	0,3	0,3	40÷60
14	Рабочее место	24,0	44	0,3	0,3	40÷60
15	Рабочее место	24,0	44	0,3	0,3	40÷60
<i>Химическая лаборатория</i>						
Дата: 13 августа 1991 г.; наружный воздух: $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $\phi = 38\%$						
1	Рабочее место	24	45	0,3	0,3	40÷60
2	Рабочее место	24	45	0,3	0,3	40÷60
3	Рабочее место	24	45	0,3	0,3	40÷60
4	Рабочее место	24	45	0,3	0,3	40÷60

Точка замера по плану	Место замера	Среднезамеренные параметры				По СП	
		Температура, °С	Относительная влажность, %	Подвижность, м/с	Подвижность, м/с	Относительная влажность, %	
1	2	3	4	5	6	7	
<i>Участок осаждения (4-й этаж)</i>							
Дата: 15 августа 1991 г.; наружный воздух: $t = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $\varphi = 36\%$							
1	Рабочее место	24,0	46	0,2	0,3	40÷60	
2	Рабочее место	24,0	46	0,3	0,3	40÷60	
3	Рабочее место	23,0	47	0,3	0,3	40÷60	
4	Рабочее место	23,0	47	0,3	0,3	40÷60	
5	Рабочее место	24,0	46	0,3	0,3	40÷60	
<i>Участок осаждения (3-й этаж)</i>							
Дата: 14 августа 1991 г.; наружный воздух: $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $\varphi = 36\%$							
1	Рабочее место	24,0	46	0,3	0,3	40÷60	
2	Рабочее место	24,0	46	0,3	0,3	40÷60	
3	Рабочее место	24,0	46	0,3	0,3	40÷60	
4	Рабочее место	23,5	46	0,3	0,3	40÷60	
5	Рабочее место	23,5	46	0,3	0,3	40÷60	
6	Рабочее место	23,5	46	0,2	0,3	40÷60	
7	Рабочее место	24,0	46	0,2	0,3	40÷60	
8	Рабочее место	24,0	46	0,25	0,3	40÷60	

**Баланс по явной теплоте в исследуемых помещениях**

№ п/п	Наименование отверстий, проемов и вентиляционных установок	Параметры воздуха					Приток			Отвод		
		$t$ , °С	$\phi$ , %	$v$ , м/с	$I$ , кДж/кг	$d$ , г/кг	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	влаги, кг/ч	
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

*Теплотехническое отделение*

Дата замеров: 15 июля 2021 г.;  $t = 22,5$  °С;  $\phi = 59$  %;  $v = 1$  м/с

Уходит из помещения (вытяжка)

	Система В-5	850	25	49	1,1	41,9	12,0	—	—	935	10,874	11,220
1	Итого ушло из помещения	850	25	49	1,1	41,9	12,0	—	—	935	10,874	11,220

Поступает в помещение (приток)

1	Через окна, двери	850	22,5	59	1,1	46,1	12,2	935	10,874	11,220	—	—
	Итого ушло из помещения	850	22,5	59	1,1	46,1	12,2	935	10,874	11,220	—	—

*Рентген-кабинет (большой)*

Дата замеров: 16 июля 2021 г.; наружный воздух:  $t = 25$  °С;  $\phi = 40$  %;  $v = 1$  м/с

Удается из помещения (вытяжка)

	Система В-1	1600	24,5	66	1,1	48,185	12,2	—	—	1760	23,5392	21,472
1	Итого ушло из помещения	1600	24,5	66	1,1	48,185	12,2	—	—	1760	23,5392	21,472

Поступает в помещение (приток)

1	Система П-1	1150	22,5	59	1,1	46,09	12,2	1265	1,61831	14,03	—	—
2	Кондиционер	450	17,0	47	1,07	33,52	6,4	481,5	4,4799	3,082	—	—

№ п/п	Наименование отверстий, проемов и вентиляционных установок	Количество воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Параметры воздуха				Приток			Отвод			
			t, °С	φ, %	v, м/с	I, кДж/кг	d, г/кг	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	влаги, кг/ч	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

*Рентген-кабинет (малый)*

Дата замеров: 17 июля 2021 г.; наружный воздух: t = 24 °С; φ = 55 %; v = 1 м/с

Уходит из помещения (вытяжка)

	Система В-1	1170	25,2	56	1,1	41,9	11,5	—	—	—	1290	15,0027	14,8
1	Итого ушло из помещения	1170	25,2	56	1,1	41,9	11,5	—	—	—	1290	15,0027	14,8

Поступает в помещение

1	Кондиционер	450	17	47	1,07	33,59	6,4	481,5	4,4798	3,0816	—	—	—
2	Система П-1	650	21	59	1,1	46,93	12,4	715	9,3133	8,866	—	—	—
3	Через дверь (2×2 м <sup>2</sup> )	70	24	46	1,1	48,18	9,4	77	1,0298	0,7238	—	—	—

*Кабинет изготовления парафина*

Дата: 18 июля 2021 г.; наружный воздух: t = 26 °С; φ = 42 %; v = 1 м/с

Удается из помещения (вытяжка)

	Система В-1	760	23	63	1,1	51,537	13,1	—	—	—	840	12,01379	11,0
1	Итого ушло из помещения	760	23	63	1,1	51,537	13,1	—	—	—	840	12,01379	11,0

Поступает в помещение (приток)

1	Через окна	760	22,5	59	1,1	46,09	12,2	840	10,7461	10,25	—	—	—
---	------------	-----	------	----	-----	-------	------	-----	---------	-------	---	---	---

№ п/п	Наименование отверстий, проемов и вентиляционных установок	Параметры воздуха					Приток			Отвод			
		Количество воздуха, м <sup>3</sup> /ч		t, °С	φ, %	ν, м/с	I, кДж/кг	d, г/кг	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	Количество		
		3	4								воздуха, кг/ч	тепла, кВт	влаги, кг/ч
1	2			3	4	5	6	7	8	9			

*Монтажный участок № 503*

Дата: 12 августа 2021 г.; наружный воздух: t = 26 °С; φ = 39 %; ν = 1 м/с

Удается из помещения (вытяжка)

1	Система В-2	5250	23,62	42	1,1	46,09	9,5	—	—	—	5,775	53,49	55000
2	Система В-12	4300	26,0	42	1,1	50,28	9,5	—	—	—	4,730	5,500	45000

Поступает в помещение (приток)

1	Через дверь (1,8 м <sup>2</sup> )	2200	23,5	42	1,1	46,09	9,5	2420	33,727	22,800	—	—	—
2	Кондиционер	1800	17	47	1,07	33,52	8,0	1980	18,3754	12,700	—	—	—
3	Система К-1	4520	22	43	1,1	41,9	7,8	4970	57,8011	39,000	—	—	—
4	Через окна	1030	26	39	1,1	50,28	9,5	1130	8,2019	10,735	—	—	—

*Химическая лаборатория*

Дата: 13 августа 2021 г.; наружный воздух: t = 27 °С; φ = 38 %; ν = 1 м/с

Уходит из помещения (вытяжка)

1	Система В-10	1080	24,3	45	1,1	47,76	9,3	—	—	—	1190	8,072	10,067
---	--------------	------	------	----	-----	-------	-----	---	---	---	------	-------	--------

Поступает в помещение (приток)

1	Система К-1	600	21	49	1,1	42,74	8,4	660	7,7921	5,500	—	—	—
2	Через дверь (1,8 м <sup>2</sup> , ν = 0,030 м/с)	400	23	45	1,1	41,9	8,0	440	5,1172	3,550	—	—	—
3	Через окна (1,5×1,5 м)	80	27	38	1,1	50,28	8,2	88	0,6633	0,722	—	—	—

№ п/п	Наименование отверстий, проемов и вентиляционных установок	Количество воздуха				Параметры воздуха				Приток				Отвод	
		Количество воздуха, м <sup>3</sup> /ч	t, °С	φ, %	v, м/с	I, кДж/кг	d, г/кг	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	влаги, кг/ч	воздуха, кг/ч	тепла, кВт	влаги, кг/ч	Количество	Отвод
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	
<i>Участок осаджения ЦМП (4-й этаж)</i>															
Дата: 15 августа 2021 г.; наружный воздух: t = 26 °С; φ = 36 %; v = 1 м/с															
Уходит из помещения (вытяжка)															
1	Система В-5	13400	23,7	46	1,1	48,18	9,4	—	—	—	14 740	109 868,7	138 550		
Поступает в помещение (приток)															
1	Система К-1	6100	21	49	1,1	42,74	8,4	6710	81,41	56,000	—	—	—		
2	Через дверь (2,0 м <sup>2</sup> )	7200	24	46	1,1	48,18	9,4	7920	104,67	75,000	—	—	—		
3	Инфильтрация через окна (1,5×1,5 м)	100	26	36	1,1	50,28	8,2	110	0,798	0,9	—	—	—		
<i>Участок осаджения ЦМП (3-й этаж)</i>															
Дата: 14 августа 2021 г.; наружный воздух: t = 27 °С; φ = 36 %; v = 1 м/с															
Уходит из помещения (вытяжка)															
1	Система В-4Б	6300	25,1	46	1,1	56,15	11,4	—	—	—	6930	48,559	79,000		
Поступает в помещение (приток)															
1	Система К-1	4100	21	48	1,1	41,9	8,3	4510	26,4398	37,500	—	—	—		
2	Через дверь	2200	23	42	1,1	43,58	8,0	2420	15,5384	19,400	—	—	—		

**Программа расчета коэффициента облученности  
из верхнего КО в нижний КО**

```

OPEN(6,FILE='LP:',STATUS='OLD')
DO 2 I=1,24
TYPE *,'BBOA'
ACCEPT*,A,B,H,HRZ
AOT=A/H
BOT=B/H
F1=H-HRZ
FN=B*H
F1=A*B
F7=A*H1
F8=F7
F9=B*H1
FN1=HRZ*B
FN2=H1*B
F4=A*HRZ
F9=H1*B
F6=HRZ*B

CALL SAM (B,H,A,FIN1)
CALL SAM (H1,B,A,FIN27)
CALL SAM (HRZ,B,A,FIN14)
CALL SAM (H,B,A,FIN47)

CALL VAN (B,H,A,FIN96)
CALL VAN (B,HRZ,A,FIN16)
CALL VAN (B,H1,A,FIN29)

FIN7=FIN74-(1/(2*FN))*(FIN74*FN-FIN27*FN2-3*FIN14*FN1)
FIN8=FIN7
FIN9=FIN96-(1/(2*FN))*(FIN96*FN-FIN29*FN2-3*FIN16*FN1)
FINVZ=FIN1+FIN7+FIN8+FIN9
FVZ=F1+F7+F8+F9
FIVZN=FINVZ*(FN/FVZ)
FI=1-FIVZN
WRITE(6,100),ACT,BOT,FI
100 FORMAT(5X,'AOT=',F12.3,5X,'BOT=',F12.3,5X,'FI=',F15.6)
20 CONTINUE
• STOP
END

```



```

                                П/П _ _ _ V 1
SUBROUTINE SAM (X,Y,Z,FI1)
E=Y/X
G=Z/X
S1=1/(3.14*E)
S2=(1/4)*(ALOG((1+E**2+G**2)**(1+E**2+G**2)*
* (1+E**2)**(1-E**2)*(1+G**2)*(1-G**2)*
* (E**2)**(E**2)*(G**2)**(G**2)))
S3=(1/4)*(ALOG((E**2+G**2)**(E**2+G**2)))
S4=E*ATAN(1/E)
S5=G*ATAN(1/G)
S6=(SQRT(E**2+G**2))*ATAN(1/SQRT(E**2+G**2))
FI1=S1*(S2-S3+S4+S5-S6)
RETURN
END

                                П/П - - - N 2
SUBROUTINE VAN(X,Y,Z,FI2)
E=Y/X
G=Z/X
R1=1/3.14
R2=(1/(E*G))*ALOG(1+E**2+G**2+(B**2)*(G**2))/(1+E**2+G**
2)
R3=(2/E)*ATANG
R4=(2/G)*(SQRT(1+G**2))*ATAN(E/SQRT(1+G**2))
R5=(2/G)*ATANE
R6=(2/E)*SQRT(1+E**2)*ATAN(G/SQRT(1+E**2))
FI2=R1*(R2-R3+R4-R5+R6)

RETURN
END

```

**Программа расчета воздухообмена по двухзонной  
математической модели вентилируемого помещения**

```

MEMBER('PSL')
MAKE CALC PROCEDURE
SSS DECIMAL(2,0)
CODE
SSS=Q W-STEP
LOOP NUMBER ST TIMES
SSS=SSS+STEP
IF H_ROOM = 4 THEN K_P = 0.78.
IF H_ROOM = 5 THEN K_P = 0.7 .
IF H_ROOM = 6 THEN K_P = 0.65.
P=W_ROOM/(K_P*L_ROOM - H_ROOM + 4)
IF P=0 THEN P=1.
Q=L_ROOM*W_ROOM*H_ROOM*SSS
QLS = Q*Q_LS
QUS = Q*Q_US
Q1 = (QLS+QUS)/(1005*(T_WS - T0))
M2 = 1.15*AIR:COEF_M
N2 = 1.15*AIR:COEF_N
X_P = L_ROOM+H_ROOM - H_WS
RU = 353/(273+T0)
LBL1 G_1 = G1/P
F0 = AIR:LENGTH*AIR:WIDTH/1000000.0
T_OUT = T_WS+Q/(1005*G1)
V0 = (V_ALLOW^2)*RO*(X_P^2)/(M2^2*G_1)
AR01 = 11.1*(T_OUT - T0)*SQRT(F0)/((V0^2)*(T0+273))
ARX1 = (N2/(M2^2))*AR01*(X_P/(1.13*SQRT(F0))^2)
K_N = (1+2.5*ARX1)^(1/3)
BETA = 2*X_P*K_N/(M2*SQRT(F0))
G_NEXT = (QLS_QUS*(BETA - 1)/BETA)/(1005*(T_WS - T0))
! STOP('AAAA')
IF ABS(((G1 - G_NEXT)/G1)*100)<=2 THEN
T_US = T0+(QLS+QUS)/(1005*G_NEXT)
TETA0 = T_US - T0
TETAX = TETA0*N2*(SQRT(F0)/X_P)*(1/K_N)
TX = T_US - TETAX
T_STREAM = (T0+T_US*(BETA - 1))/BETA
T_WS = T_STREAM
DELTA_TX=T_WS-TX

```

```

! STOP('BBBB')
  IF DELTA_TX<=DELTA_T THEN
AR01 = 11.1*(T_US - T0)*SQRT(F0)/((V0^2)*(T_WS+273))
X_OFF = 0.62*M2*SQRT(F0/(N2*AR01))
! STOP('CCCC')
IF X_OFF>L_ROOM THEN
res:TW_CURR = SSS
RES:AIR_NAME = CURR_AIR
RES:G = G_NEXT
ADD(RESULTS)
! STOP('DDDD')
CYCLE
ELSE
res:TW_CURR = SSS
RES:AIR_NAME = CURR_AIR
RES:G = 0
ADD(RESULTS)
! STOP('DDDD')
CYCLE
▪
ELSE
res:TW_CURR = SSS
RES:AIR_NAME = CURR_AIR
RES:G = 0
ADD(RESULTS)
! STOP('FFFF')
CYCLE
▪
ELSE
G1 = G_NEXT
! STOP('GGGG')
GOTO LBL1
▪
PSL PROGRAM

```

*Для заметок*

*Для заметок*

*Научное издание*

**Саргсян Самвел Володяевич**

**РАСЧЕТ ВОЗДУХООБМЕНА МЕТОДОМ ДВУХЗОННОГО  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ**

Редактор *Т.Н. Донина*

Корректор *В.К. Чупрова*

Компьютерная правка и верстка *О.В. Суховой*

Дизайн первого титульного экрана *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 14.06.2022. И-385. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 5,12. Тираж 100 экз. Заказ 394.

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет»  
129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ – МГСУ.

Тел. (495) 287-49-14, вн. 14-23, (499) 183-91-90, (499) 183-97-95.

E-mail: [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru), [rio@mgsu.ru](mailto:rio@mgsu.ru)

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.

Тел.: (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)