

РАЗЛИЧНЫЕ ВАРИАНТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ БОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗДУШНО-ОТОПИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Рассматриваются существующие методики расчёта систем отопления с применением воздушно-отопительных агрегатов, предлагается новый метод расчёта систем обеспечения микроклимата помещений большой высоты на основе численных методов с использованием программного комплекса «Locairheat». Приводятся различные способы обеспечения микроклимата помещений с использованием воздушно-отопительных агрегатов, даются результаты расчётов данных способов с использованием программного комплекса. Приводится перечень возможностей программы «Locairheat».

Ключевые слова: воздушно-отопительный агрегат, дестратификатор, приточная воздушная струя, вычислительный эксперимент, программный комплекс.

В помещениях большой площади и большой высоты (общественных зданий — залы супермаркетов, спортзалы, автомастерские, холлы, вестибюли общественных зданий, др.; промышленных зданий) при отсутствии централизованной системы вентиляции одним из наиболее распространенных вариантов обеспечения микроклимата являются системы с использованием воздушно-отопительных агрегатов (ВОА) (Гримитлин, 2004). В рамках данного исследования рассматриваются рециркуляционные ВОА.

По количеству приточных струй выделяют два типа воздушно-отопительных агрегатов: одноструйные и двухструйные (Щекин, 1986), (Щекин, 1987). В двухструйном ВОА одна струя — неизотермическая («перегретая» — для зимнего периода; имеющая температуру ниже температуры помещения — для теплого периода), вторая — изотермическая (для ограничения всплывания и нисхождения неизотермической приточной струи соответственно).

Согласно ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» выделяют следующие параметры микроклимата помещений: температура воздуха, скорость движения воздуха, относительная влажность воздуха, результирующая температура помещения, локальная асимметрия результирующей температуры.

При этом наиболее сильно влияют на ощущения комфортности находящихся в помещении людей значения скорости движения воздуха и отклонения температуры воздуха от допустимых значений.

Для систем воздушного отопления с использованием ВОА, как правило, рассматриваются только два способа подачи воздуха в помещение — сверху вниз наклонными струями под углом 35° к горизонту (наклонная подача) и горизонтальными струями выше рабочей зоны при формировании обратного потока в обслуживаемой (рабочей) зоне (сосредоточенная подача).

При выполнении расчёта названных систем отопления изначально принимают наклонную подачу приточной струи в помещение. Она является более благоприятной с точки зрения энергосбережения, поскольку при горизонтальной подаче воздуха существует большая вероятность настипания приточной «перегретой» струи на потолок помещения. Это приведет к увеличению температурного перепада между температурой внутренней поверхности наружного ограждения и температурой наружного воздуха. А это, в свою очередь, вызовет увеличение теплопотерь через покрытие. Если при наклонном способе подачи воздуха параметры микроклимата в обслуживаемой (рабочей) зоне не обеспечиваются, принимают сосредоточенный способ подачи приточной струи и выполняют её расчёт.

Существующие методики по подбору воздушно-отопительных агрегатов позволяют рассчитывать варианты отопления ВОА только с двумя названными способами подачи приточной струи — наклонной и сосредоточенной — с углом подачи струи к горизонту 0° и 35° соответственно. При этом могут возникать случаи, когда необходимо рассчитать систему с другими углами наклона подачи приточной струи к горизонту. Кроме того существуют несколько иных способов обеспечения микроклимата помещений большой высоты, применение которых при определенных условиях (значения теплопотерь/теплопоступлений, высоты помещения, использование системы как для отопления в холодный период года, так и для охлаждения в тёплый период года и др.) будут более целесообразным — совместное использование одноструйных ВОА и дестратификаторов (дестратификатор — устройство, предназначенное для перемешивания воздушных масс в пространстве помещения); использование двухструйных ВОА. Для данных способов устройства систем обеспечения микроклимата помещений большой высоты также отсутствуют подходящие методы расчёта и подбора оборудования.

Такие коммерческие компьютерные программы, как Flotherm, IcePak, STAR CCM+, Coolit и др. (Беляев, 2004), являются мощными инструментами для решения задач вычислительной гидродинамики. Но данные программы являются достаточно технически сложными для освоения широкого круга пользователей (инженеров-проектировщиков, инженеров-монтажников), кроме того, зачастую стоимость данных программных пакетов очень высока.

Для проведения исследований подачи приточной струи воздуха в пространство помещения при любых значениях угла к горизонту, эффективности, актуальности использования альтернативных способов подачи воздуха в пространство помещения, в том числе для определения параметров систем обеспечения микроклимата при работе в режимах нагрев/охлаждение, решения других задач была разработана программа «Locairheat» с использованием численного метода. Программный комплекс реализован в средах MathCAD, Fortran.

В основу программного комплекса положена модель свободной осесимметричной несжимаемой струи, истекающей в покоящийся воздух отапливаемого помещения.

Математическая модель включает следующие уравнения.

1. Уравнение Навье–Стокса для несжимаемой жидкости (Лойцянский, 1978)

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{G} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \mathbf{V}, \quad (1)$$

где \mathbf{V} — вектор скорости с проекциями u, v, w на оси декартовой системы координат x, y, z соответственно; \mathbf{G} — вектор гравитационных сил; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ — оператор Набла, где i, j, k — орты декартовой системы координат; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа; t — время.

2. Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости (Лойцянский, 1978)

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

3. Уравнение энергии для несжимаемой жидкости (Шлихтинг, 1974)

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T + \mu \left[\begin{array}{l} 2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) + \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \\ + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \end{array} \right], \quad (3)$$

где T — температура; ρ — плотность; C_p — изобарная теплоёмкость воздуха; λ — коэффициент теплопроводности; μ — коэффициент динамической вязкости.

4. Уравнение Пуассона для давления, выведенное из уравнений движения и неразрывности (Роуч, 1980)

$$\nabla^2 p = S_p, \quad (4)$$

где S_p — источниковый член.

Для учёта гравитационных сил в члене вектора гравитационных сил, уравнение (1), учитывается зависимость плотности от температуры по уравнению состояния для идеального газа

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (5)$$

где p — давление; R — газовая постоянная воздуха.

Тогда

$$\frac{1}{\rho}(\rho_0 - \rho)g = \frac{\frac{p}{RT_0} - \frac{p}{RT}}{\frac{p}{RT}}g = \frac{T - T_0}{T_0}g, \quad (6)$$

где T_0 — начальная температура воздуха в помещении; T — температура воздуха приточной струи; g — ускорение свободного падения.

Для описания турбулентных режимов движения воздуха используется уравнение Рейнольдса (Лойцянский, 1978) (Шлихтинг, 1974), которое внешне совпадает с уравнением Навье–Стокса (1), но записано для осредненных скоростей потока ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$) и к кинематической вязкости добавляется турбулентная вязкость. В качестве модели турбулентности используется алгебраическая модель турбулентности Прандтля (Шлихтинг, 1974).

$$v_t = \chi b(\bar{u}_{\max} - \bar{u}_{\min}), \quad (7)$$

где v_t — турбулентная вязкость; χ — эмпирический коэффициент, определяемый из эксперимента; b — ширина струи; $\bar{u}_{\max}, \bar{u}_{\min}$ — максимальная и минимальная осредненные скорости струи в рассматриваемом сечении.

Для нахождения коэффициента турбулентной теплопроводности λ_t в осредненном уравнении энергии значение турбулентного числа Прандтля Pr_t принимается равным ламинарному значению 0,7 (Линь, 1963). Тогда

$$\lambda_t = \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}, \quad (8)$$

где μ_t — динамическая турбулентная вязкость.

Численное решение системы дифференциальных уравнений в частных производных (3 уравнения движения — переменные u, v, w — и 1 уравнение энергии — переменная T) осуществляется по явной двухшаговой схеме Брауновской (Роуч, 1980).

Дифференциальные уравнения приводятся к виду

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = S, \quad (9)$$

где U — вектор искомых переменных (u, v, w, T); F, Q, H — векторы, состоящие из комбинаций искомых переменных; S — источниковый член, включающий вязкие члены, а также члены, определяющие теплопроводность и гравитационные силы.

Уравнения движения записываются в консервативной форме (Роуч, 1980). Решение ищется в виде:

– первый шаг

$$U^{n+1} = U^n - \left[\frac{\delta F^n}{\delta x} + \frac{\delta Q^n}{\delta y} + \frac{\delta H^n}{\delta z} - S^n \right] \Delta t, \quad (10)$$

– второй шаг

$$U^{n+1} = U^n - \left[\frac{\delta F^{n+1}}{\delta x} + \frac{\delta Q^{n+1}}{\delta y} + \frac{\delta H^{n+1}}{\delta z} - S^n \right] \Delta t, \quad (11)$$

где n — шаг по времени; пространственные производные представляются центральными разностями, а $F^{n+1} = F(U^{n+1})$ и т. д.

Конечно-разностное уравнение для давления решается итерационным методом Рундсона (Роуч, 1980) на каждом временном слое

$$p_{i,j,k}^{n+1} = p_{i,j,k}^n + \frac{1}{6} \left(p_{i+1,j,k}^n + p_{i-1,j,k}^n + p_{i,j+1,k}^n + p_{i,j-1,k}^n + p_{i,j,k+1}^n + p_{i,j,k-1}^n - 6 \cdot p_{i,j,k}^n - \right. \\ \left. - \Delta^2 \cdot S_{pi,j,k} \right), \quad (12)$$

где $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ — шаг по пространственной сетке; здесь n — номер итерации.

На стенках в качестве граничных условий для скоростей используется условие прилипания (значения скоростей принимаются нулевыми), задаются значения температуры и давления.

В местах притока воздуха задаются значения скоростей струи и температур, для давления задается граничное условие градиентного типа.

В качестве начальных условий во всем объёме помещения задаются нулевые условия по скоростям и начальные значения температуры и давления.

Расчет ведётся методом установления. Процесс считается установившимся, если безразмерный параметр τ достигнет значения (Шлихтинг, 1974).

$$\tau = \frac{4 \cdot \mu_t \cdot \Delta t \cdot Nt}{\rho \cdot [\Delta y \cdot (J-1)]^2} \geq 1, \quad (13)$$

где Δt — шаг по времени; Nt — количество шагов по времени; Δy — шаг по оси y ; J — количество шагов по оси y .

Шаг по времени выбирается из условия устойчивости (Роуч, 1980)

$$\Delta t \leq \frac{\Delta}{|u| + |v| + |w|}. \quad (14)$$

Решение ищется на прямоугольной сетке x, y, z .

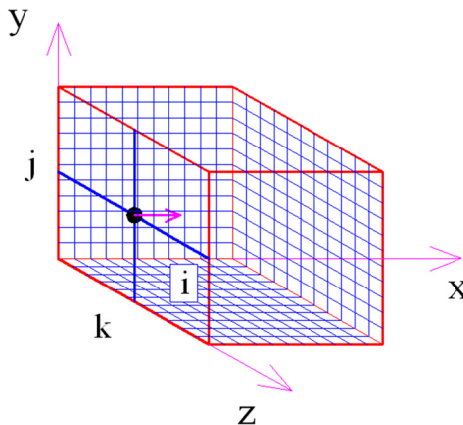


Рис. 1. Расчётная область в декартовой системе координат x, y, z ; i, j, k — узлы расчётной сетки по осям x, y, z соответственно

В рамках данного исследования был проведён вычислительный эксперимент по моделированию работы ВОА в различных режимах.

Начальные условия:

- производственное помещение габаритами $10 \times 12 \times 6$ м ($L \times V \times H$);
- $A_0 = 0,5 \text{ м}^2$ — площадь воздухораспределительного устройства воздушно-отопительного агрегата;
- $t_{\text{н}} = +16^\circ\text{C}$ — температура помещения (для зимнего периода);
- $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta = 0,5$ м — шаг по пространственной сетке.

Вычислительный эксперимент проводился для 5 режимов работы систем обеспечения микроклимата помещения:

1. Система отопления помещения с потерями тепла $Q = 35,6$ кВт ($q_v = 49,5 \text{ Вт/м}^3$) одноструйным воздушно-отопительным агрегатом со следующими параметрами неизотермической приточной струи: площадью воздухо-распределения $A_0 = 0,5 \text{ м}^2$, температурой $t_r = +45^\circ\text{C}$, начальной скоростью $v_0 = 2$ м/с и углом наклона ниже горизонта 35° (рисунок 2).
2. Система отопления помещения с потерями тепла $Q = 35,6$ кВт ($q_v = 49,5 \text{ Вт/м}^3$) одноструйным воздушно-отопительным агрегатом со следующими параметрами неизотермической приточной струи: площадью воздухо-распределения $A_0 = 0,5 \text{ м}^2$, температурой $t_r = +45^\circ\text{C}$, начальной скоростью $v_0 = 2$ м/с и углом наклона к горизонту 0° (рисунок 3).
3. Система отопления помещения с потерями тепла $Q = 35,6$ кВт ($q_v = 49,5 \text{ Вт/м}^3$) одноструйным воздушно-отопительным агрегатом со следующими параметрами неизотермической приточной струи: площадью воздухо-распределения $A_0 = 0,5 \text{ м}^2$, температурой $t_r = +45^\circ\text{C}$, начальной скоростью $v_0 = 2$ м/с и углом наклона к горизонту 0° , – совместно с дестратификатором с вертикальной сосредоточенной подачей перемешивающей струи начальной скоростью $v_0 = 2$ м/с (рисунок 4).
4. Система отопления помещения с потерями тепла $Q = 35,6$ кВт ($q_v = 49,5 \text{ Вт/м}^3$) двухструйным воздушно-отопительным агрегатом с начальной скоростью нижней неизотермической приточной струи $v_1 = 4$ м/с и площадью воздухораспределения $A_1 = 0,25 \text{ м}^2$ и верхней изотермической струи $v_2 = 4$ м/с и площадью воздухораспределения $A_2 = 0,25 \text{ м}^2$, с температурой нижней неизотермической приточной струи $t_r = +45^\circ\text{C}$. Угол наклона к горизонту приточных струй составляет 0° (рисунок 5).
5. Система охлаждения помещения с тепlopоступлениями $Q = 19,2$ кВт ($q_v = 26,7 \text{ Вт/м}^3$) двухструйным воздушно-отопительным агрегатом с начальной скоростью верхней неизотермической приточной струи $v_1 = 4$ м/с и площадью воздухораспределения $A_1 = 0,25 \text{ м}^2$ и нижней изотермической струи $v_2 = 4$ м/с и площадью воздухораспределения $A_2 = 0,25 \text{ м}^2$, с температурой

верхней неизотермической приточной струи $t_r = +8^\circ\text{C}$. Угол наклона к горизонту приточных струй составляет 0° (рисунок 6).

Результаты расчётов представлены в виде скоростных и температурных полей для 5-ти режимов работы на рисунке 2–6 соответственно.

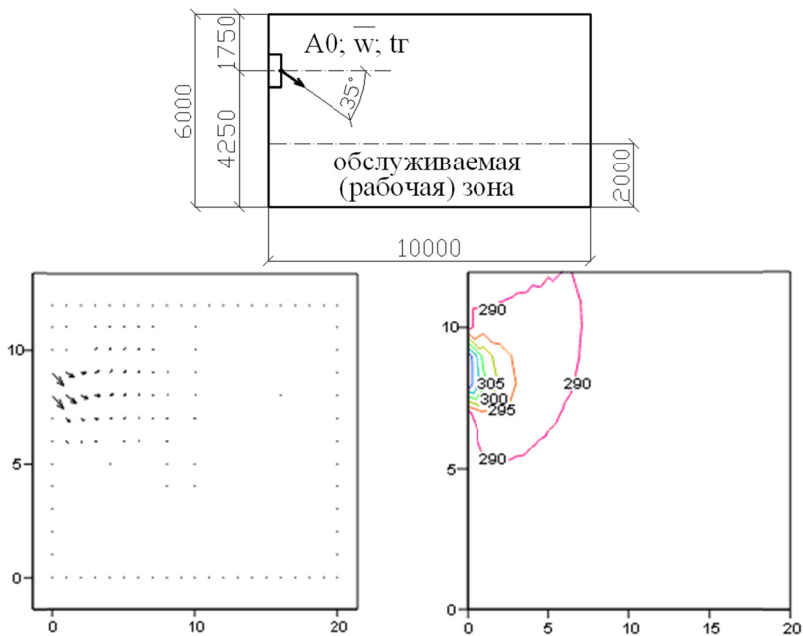


Рис. 2. Одноструйный ВОА. Наклонная подача

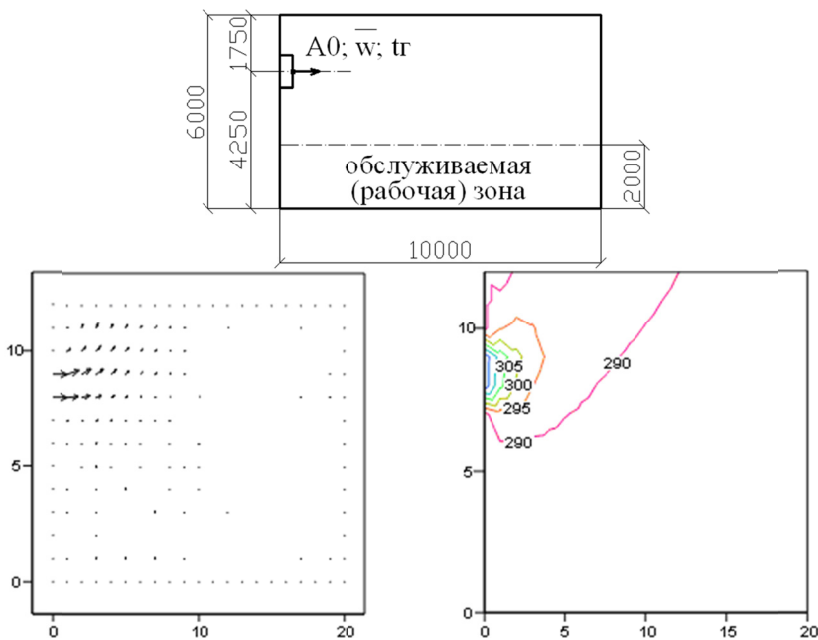


Рис. 3. Одноструйный ВОА. Сосредоточенная подача

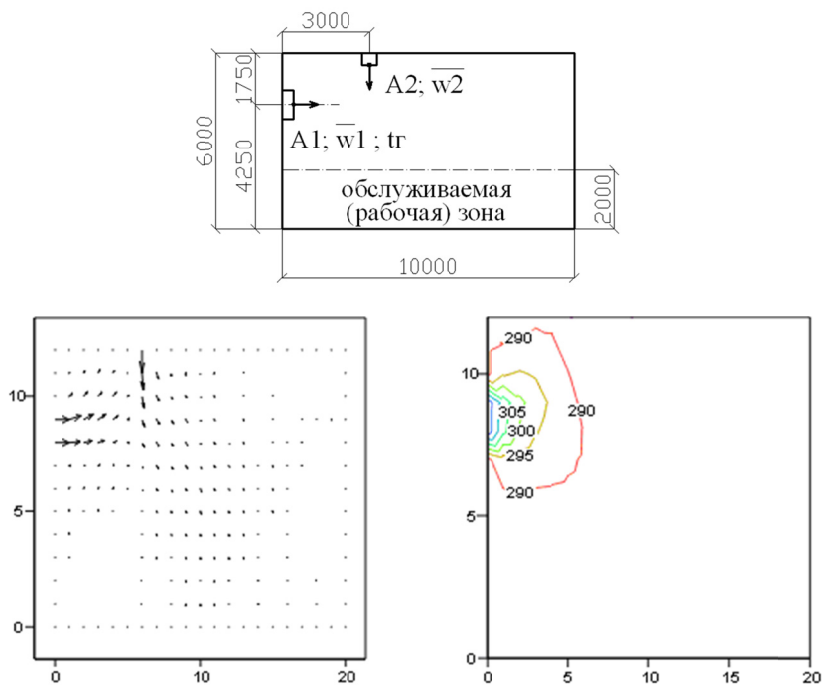


Рис. 4. Одноструйный ВОА + Дестратификатор

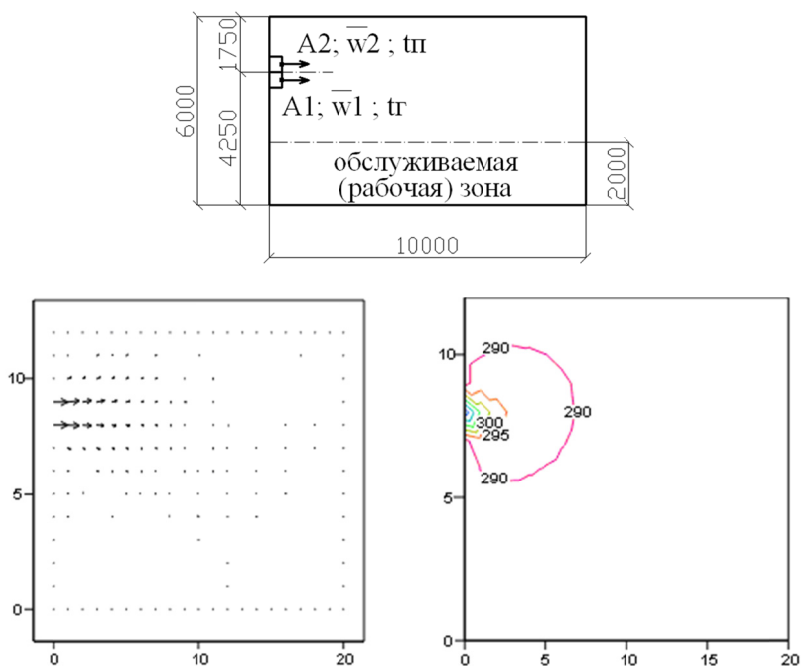


Рис. 5. Двухструйный ВОА (зима)

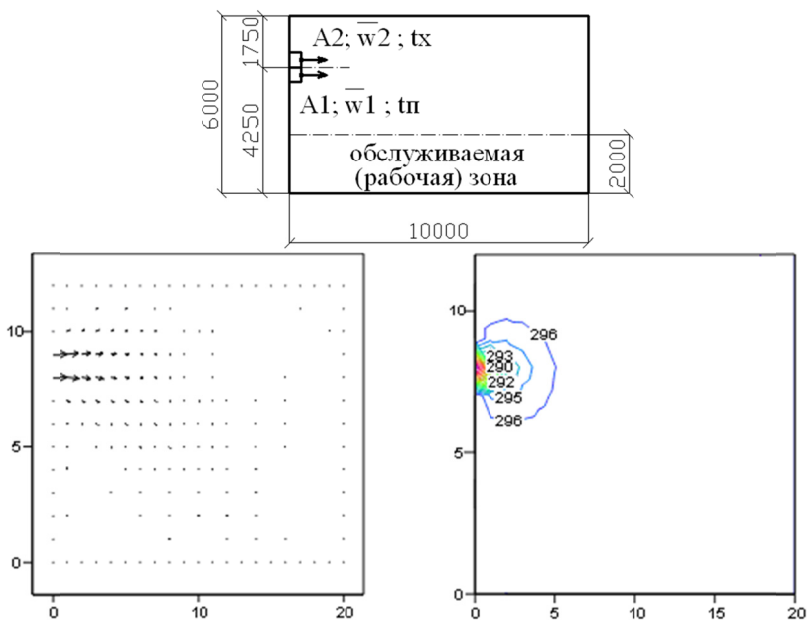


Рис. 6. Двухструйный ВОА (лето)

На рисунке 2 при наклонной подаче струи можно заметить, что настильные струи происходят локально на небольшом участке покрытия. На рисунке 3 при подаче приточной струи под углом 0° к горизонту уже имеет место настиление на значительной площади покрытия.

Графики скоростных и температурных полей на рисунке 4 и 5 показывают, что совместное использование одноструйных ВОА и дестратификаторов, а также применение двухструйных ВОА создают более благоприятные микроклиматические условия (при определенных параметрах — значении теплопотерь, скорости, температуры воздуха в приточной струе, габаритах помещения и др.): настиление приточной струи на покрытие помещения уже отсутствует, увеличивается дальность струи, происходит более интенсивное перемешивание перегретых воздушных масс с воздухом помещения.

На рисунке 6 отображены результаты расчётов при режиме охлаждения помещения в тёплый период года.

Выводы

1. Существующие методики расчёта систем обеспечения микроклимата помещений большой высоты с использованием воздушно-отопительных агрегатов (Рекомендации, 1981) не охватывают всего многообразия современных способов обеспечения микроклимата (всего диапазона углов подачи приточной струи, совместного использования одноструйных ВОА и дестратификаторов, применения двухструйных ВОА).
2. Программный комплекс «Locairheat» позволяет:
 - определять распределение полей скоростей, температур, давления в пространстве помещения, значения этих величин;
 - выявлять зоны настиления приточной перегретой воздушной струи, застойные зоны в помещении;

– путём анализа полученных данных определять наиболее благоприятный способ обеспечения микроклимата, наилучшее монтажное местоположение оборудования, определять оптимальные параметры воздушных струй при выбранных способах подачи.

Литература

1. Беляев К. В., Двинский А. С., Никулин Д. А., Стрелец М. Х. (2004) Программный комплекс для численного моделирования гидродинамики и тепло-массопереноса в системах кондиционирования помещений и охлаждения электронной аппаратуры // Научно-технические ведомости. № 2. С. 47–55. Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета.
2. Воздухораспределители компании «Арктос». Указания по расчёту и практическому применению. Издание четвертое. 2006.
3. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещении. СПб. : Издательство «АВОК Северо-запад», 2004.
4. Линь Ц. Ц. Турбулентные течения и теплопередача. М. : Издательство Иностранной литературы, 1963.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. 5-е изд. М. : Наука, 1978.
6. Рекомендации по выбору отопительно-рециркуляционных агрегатов АЗ-840. Государственный проектный институт Сантехпроект Главпромстройпроекта Госстроя СССР (ГПИ Сантехпроект). М., 1981.
7. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М. : Мир, 1980.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974.
9. Щекин И. Р., Ромашко А. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий. Сборник научных трудов. Рига. Экспериментально-промышленная установка воздушного отопления с агрегатами типа АОД2-4-01У3. 1986.
10. Щекин И. Р., Степанов А. В., Нарিশный Н. В., Житомирский В. Е. Вентиляция и кондиционирование воздуха промышленных и сельскохозяйственных зданий. Сборник научных трудов. Рига. Оптимизация двухструйного воздушно-отопительного агрегата. 1987.
11. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
12. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

D. S. Voronkov

VARIOUS OPTIONS OF PROVIDING THE MICROCLIMATE OF ROOMS OF BIG HEIGHT WITH APPLICATION AIR-HEATING UNITS

Existing design procedures of systems of heating with use of air-heating units are considered, the new method of calculation of systems of providing a microclimate of rooms of big height on the basis of numerical methods with use of the program complex "Locairheat" is offered. Various ways of providing a microclimate of rooms with use of air-heating units are given, results of calculations of these ways with use of a program complex are yielded. The list of possibilities of the program «Locairheat» is provided.

Keywords: air-heating unit, destratifikator, stitched air stream, computing experiment, program complex.

Воронков Даниил Сергеевич — инженер «Автомобильные дороги» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, voronkovdaniil@yandex.ru.

УДК 332.8

К. Ю. Прокофьев

АНАЛИЗ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПОДДЕРЖКИ СУБЪЕКТОВ РЫНКА УСЛУГ ПО УПРАВЛЕНИЮ МНОГОКВАРТИРНЫМИ ДОМАМИ Г. ПСКОВА

В статье проведён детальный анализ инфраструктуры поддержки субъектов рынка услуг по управлению многоквартирными домами г. Пскова.

Ключевые слова: управление, многоквартирный дом, инфраструктура поддержки, конкуренция.

Рынок услуг по управлению многоквартирными домами имеет важное значение для экономики страны. Так, по итогам 2009 года объём жилищных услуг, предоставленных населению, достиг уровня в 0,25 трлн руб. (0,64 % ВВП РФ), а объём коммунальных услуг — 0,87 трлн руб. (2,25 % ВВП РФ). В городских населенных пунктах, в которых управление многоквартирными домами является потенциально конкурентной сферой деятельности, по состоянию на 01.01.2010 г. осуществлялось управление 1,34 млн домов с общим объёмом жилищного фонда в 3,03 млрд кв. м.

По мнению экспертов (Сиваев, 2002), наиболее привлекательными для развития конкурентных отношений в сфере управления жилищным фондом являются муниципальные образования с общим объёмом квартирного фонда не менее 35 тыс. квартир. Как правило, это города с населением более 120 тыс. человек. В настоящее время в большей части таких городов (свыше 60 %) (Прокофьев, 2011, С. 83–85) изучаемый рынок является неразвитым либо недостаточно развитым. Вместе с тем, к концу 2009 года доля многоквартирных домов с такой формой управления, как ТСЖ, составила всего 16 % от общего количества домов, а удовлетворенность населения страны качеством ЖКУ в целом остается на достаточно низком уровне (21 % от числа опрошенных респондентов).

Одним из способов, наиболее подходящих для формирования конкурентного рынка услуг по управлению МКД на муниципальном уровне, является формирование инфраструктуры поддержки.

Как было отмечено в (Прокофьев, 2011, С. 58–62) под инфраструктурой поддержки субъектов рынка услуг по управлению многоквартирными домами, включающих профессиональные управляющие организации, ТСЖ, ЖСК, иные потребительские кооперативы, советы многоквартирных домов, следует рассматривать систему коммерческих и некоммерческих организаций, которые со-