

УДК 621.4+921.928.3

РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ 4ВЦ-15 С ПОМОЩЬЮ CFD-ПАКЕТА "FLUENT"

Е. И. Гурина

Томский государственный университет, 634050 Томск
E-mail: dragon@temz.tomsk.ru

С использованием пакета программ "Fluent" проведено математическое моделирование физических процессов, происходящих в проточной части вентиляторной установки 4ВЦ-15. Получены распределения газодинамических параметров, характеризующих основные закономерности исследуемого процесса (скорости потока воздуха, массового расхода, давления воздушного потока), выявлены застойные зоны конструкции и зоны повышенной турбулизации. По результатам моделирования определена эффективность использования данной установки, предложен вариант оптимизации конструкции с целью увеличения совокупного объемного расхода воздуха, поступающего в шахту при работе четырех вентиляторов.

Ключевые слова: математическое моделирование, вентиляторная установка, центробежный вентилятор, аэродинамические характеристики, расход воздуха.

Введение. В настоящее время в Кузбассе одним из основных средств, используемых для подачи воздуха в шахту, являются многоагрегатные вентиляторные установки на базе центробежных вентиляторов.

В данной работе с помощью программы инженерного анализа "Fluent" проводится моделирование совместной работы центробежных вентиляторов в установке 4ВЦ-15, предназначенной для вентилирования угольной шахты. На рис. 1 представлена схема вентиляторной установки. Данная конструкция расположена на двух этажах, соединяющихся посредством всасывающих и нагнетающих патрубков, примыкающих к центробежным вентиляторам 1–4. С каждым из вентиляторов соединены два канала (патрубка). Работа установки может осуществляться как в прямом режиме, так и в режиме реверса в зависимости от положения реверсивной ляды. При прямом режиме (нагнетание воздуха в шахту) забираемый из калориферной поток воздуха, проходя по первому этажу установки, попадает во всасывающие патрубки ВЦ-15. Далее воздух, проходя через центробежные вентиляторы, движется по нагнетающим патрубкам на второй этаж и затем поступает в шахту.

Целью работы является определение эффективности совместной работы вентиляторов при данной геометрии установки. Проблема состоит в том, что при добавлении каждой последующей пары вентиляторов в установку не происходит линейного (или близкого к нему) увеличения совокупного расхода воздуха. В рассматриваемом случае проведение физического эксперимента существенно затруднено, поэтому проводится математическое моделирование. Необходимо определить вклад каждой пары вентиляторов в совокупный расход воздуха, а именно вычислить объемный расход воздуха для каждого вентилятора при прямом режиме работы. Также необходимо выявить застойные зоны конструкции, определить распределение полей скорости и давления воздуха по мере продвижения потока

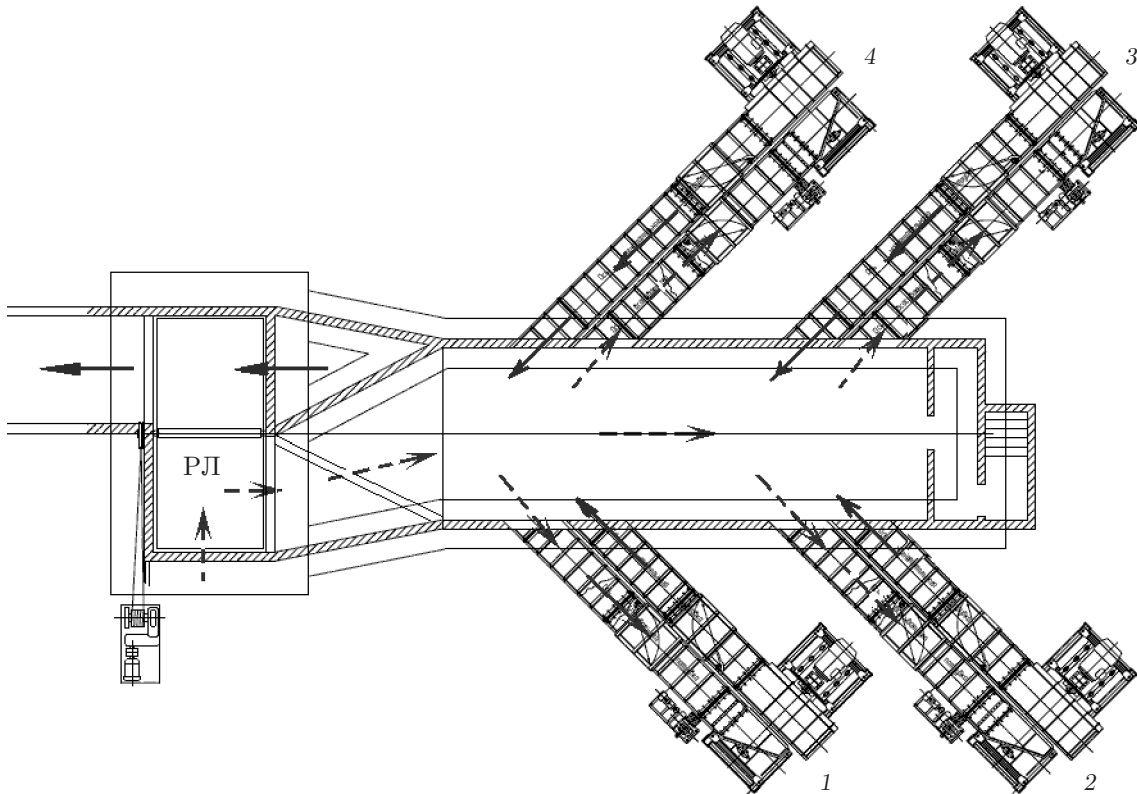


Рис. 1. Схема установки 4ВЦ-15:

стрелки — направление движения воздушной струи (штриховые — от калиферной к всасывающим патрубкам ВЦ-15; сплошные — от нагнетающих патрубков в шахту); РЛ — реверсивная лядя; 1–4 — вентиляторы

от калиферной в канал, подводящий к шахте. Расчет расходных характеристик самих центробежных вентиляторов не проводится. Определенные в экспериментах (при работе вентиляторов в сети) статическое давление P_s (в сечениях всасывающих патрубков) и совместный объемный расход воздуха во всех вентиляторах Q_v являются граничными условиями задачи.

Постановка задачи. При математическом моделировании работы устройства его реальной модели ставится в соответствие допустимо упрощенная геометрия. На рис. 2 представлена трехмерная модель установки 4ВЦ-15. Рассмотрим геометрию первого этажа установки. Движение воздушного потока осуществляется из калиферной к всасывающим патрубкам вентиляторов. На рис. 3, а показан фрагмент трехмерной модели первого этажа установки. Как отмечено выше, расчетная модель не включает вентиляторы. Входные условия ставятся в сечении S_{in} , непосредственно прилегающем к калиферной, условия на выходе из модели — в сечении всасывающего патрубка, расположенном на некотором расстоянии от вентилятора 1 (сечение S_{out1}). Таким образом, модель имеет одно входное сечение и четыре выходных сечения (по одному для каждого вентилятора).

При моделировании работы агрегата необходимо описать физические процессы, протекающие при этом, решить полученную математическую задачу численным методом и провести анализ результатов.

Математическая модель. Математическая модель, описывающая течение потока воздуха в проточной части установки, представлена в виде системы дифференциальных уравнений [1, 2], включающей:

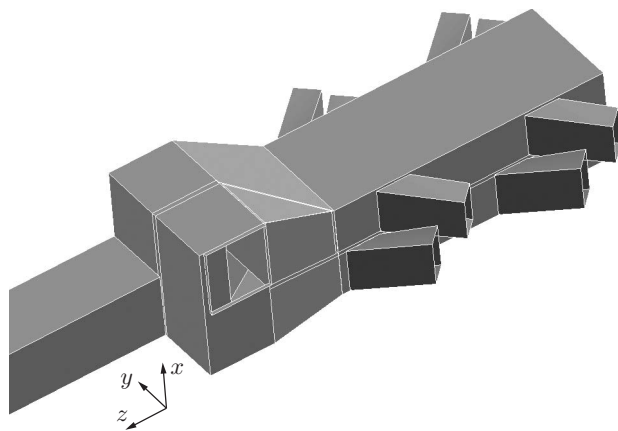


Рис. 2. Трехмерная модель вентиляторной установки 4ВЦ-15

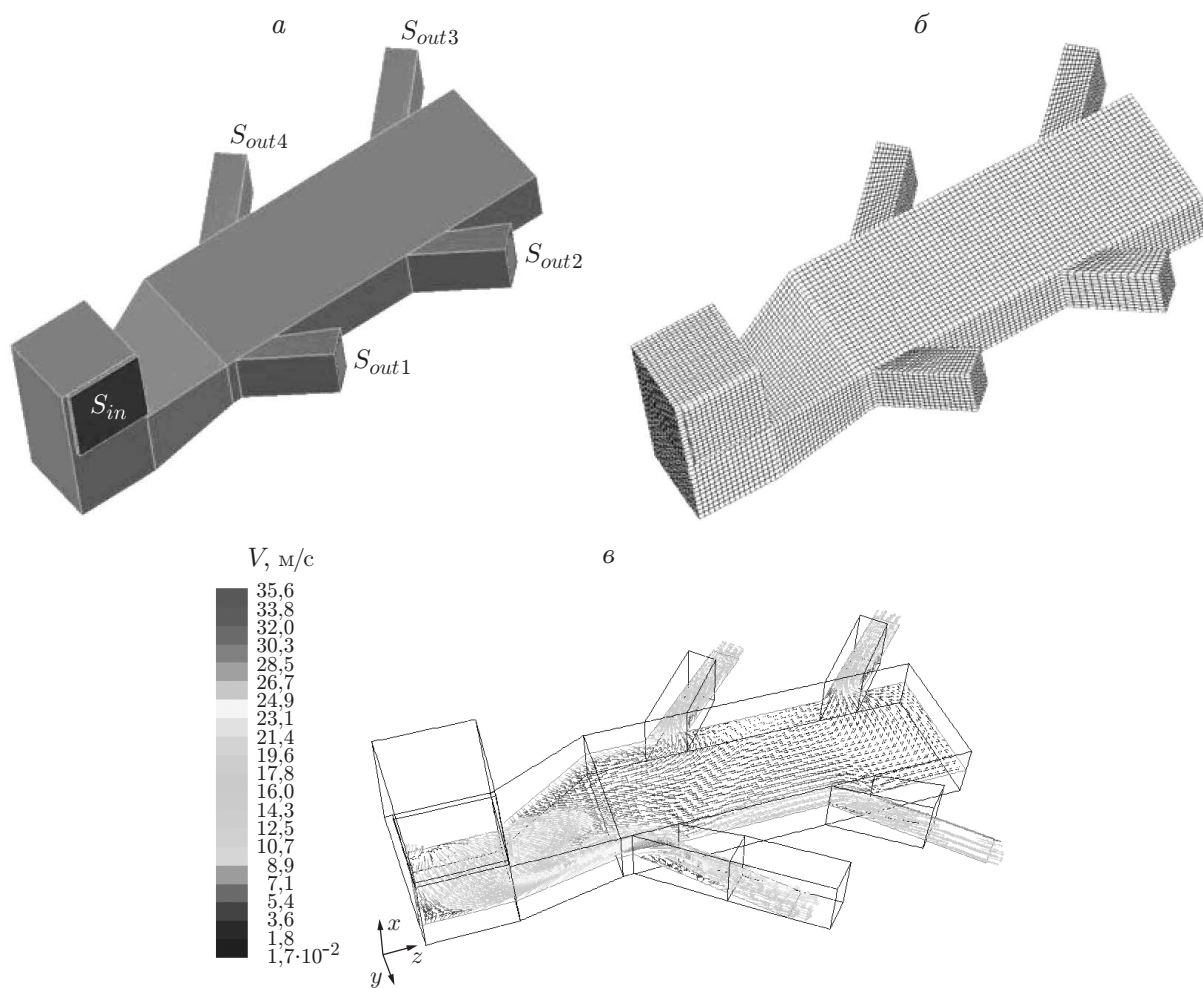


Рис. 3. Трехмерная модель первого этапа вентиляторной установки 4ВЦ-15:
a — общий вид, *б* — фрагмент расчетной сетки, *в* — проекция поля скорости на горизонтальную плоскость; S_{in} — входное сечение, S_{out1} – S_{out4} — выходные сечения

— уравнения движения Навье — Стокса, которые в случае несжимаемых течений ($\rho = \text{const}$) имеют вид

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

(x, y, z — координаты; u, v, w — проекции вектора скорости на оси прямоугольной системы координат; ρ — плотность; P — давление; t — время; $\mu_{eff} = \mu_0 + \mu_t$ — коэффициент эффективной вязкости, равный сумме молекулярного μ_0 и турбулентного μ_t коэффициентов);

— уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0;$$

— уравнения (k - ε)-модели турбулентности [3–6]

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial ku}{\partial x} + \frac{\partial kv}{\partial y} + \frac{\partial kw}{\partial z} \right) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \\ \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon v}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon w}{\partial z} \right) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned}$$

Турбулентная вязкость μ_t является функцией k и ε и определяется выражением Колмогорова — Прандтля

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon,$$

где C_μ — эмпирическая константа. Константы модели имеют следующие значения [4]: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, турбулентные числа Прандтля $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Параметр G_k , характеризующий изменение турбулентной кинетической энергии, определяется по формуле

$$G_k = \tau_{ux} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{uy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{uz} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{vx} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{vy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{vz} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{wx} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{wy} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{wz} \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Составляющие тензора вязких напряжений τ_{ij} находятся по соотношениям

$$\begin{aligned} \tau_{ux} &= 2\mu_0 \frac{\partial u}{\partial x}, & \tau_{vy} &= 2\mu_0 \frac{\partial v}{\partial y}, & \tau_{wz} &= 2\mu_0 \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \tau_{uy} &= \tau_{vx} = \mu_0 \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), & \tau_{vz} &= \tau_{wy} = \mu_0 \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), & \tau_{uz} &= \tau_{wx} = \mu_0 \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

Конечно-разностная сетка. Для описания поля течения проточная часть (область определения переменных u, v, w, P) разбивается на конечный набор контрольных объемов (расчетных ячеек), заполняющих ту часть вентиляторной установки, где движется воздух. Для каждой ячейки разрешаются основные уравнения движения, неразрывности и уравнения ($k-\varepsilon$)-модели турбулентности.

Сначала расчетная область разбивалась на крупные элементы (проводилась ее декомпозиция), на которых впоследствии строилась сетка. На рис. 3,б показан фрагмент расчетной сетки (размер ячеек увеличен, сгущение узлов отсутствует).

Начальные и граничные условия для первого этажа установки. Для решения уравнений Навье — Стокса, являющихся нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных, необходимо задать начальные и граничные условия. Поскольку решается нестационарная задача, начальные условия накладываются на поток в начальный момент времени t_0 , задавая поле векторов скоростей и давлений: $P = P(x, y, z, t_0)$, $V = V(x, y, z, t_0)$.

В случае стационарного течения задаются начальные значения поля давления $P_s = P_s(x, y, z) = 101\,325$ Па и компоненты вектора скорости $u = v = w = 0$.

Расчет проводится при заданных граничных условиях для статического давления в сечениях каждого всасывающего трубопровода, ведущего к ВЦ-15, и при заданном общем расходе воздуха при работе четырех вентиляторов. На входе в модель задается значение скорости потока $V_{in} = 13,34$ м/с, соответствующее объемному расходу воздуха $Q_v = 132,35$ м³/с, проходящего за единицу времени через сечение площадью $S_{in} = 9,92$ м². В сечениях $S_{out1}-S_{out4}$ заданы значения статического давления $P_1 = 100\,834$ Па, $P_2 = 101\,030$ Па, $P_3 = 101\,128$ Па, $P_4 = 101\,128$ Па соответственно. В качестве рабочего тела модели используется несжимаемый воздух с плотностью $\rho = 1,23$ кг/м³.

Таким образом, для проточной части установки решаются уравнения Навье — Стокса (в случае несжимаемого установившегося течения) для скорости и давления, а также уравнение стандартной ($k-\varepsilon$)-модели турбулентности.

Анализ результатов расчета для первого этажа установки. При заданных начальных условиях и заданной геометрии с помощью численных методов вычисляется изменение параметров воздуха, движущегося из входного сечения к всасывающим патрубкам. Полученные результаты расчета представлены в виде различных распределенных характеристик — полей скоростей (в векторном виде) и статического давления в сечениях модели. На рис. 3,в показано движение потока воздуха по первому этажу установки. При одновременной работе вентиляторов необходимо учитывать, каким образом соединены их входы и выходы. В рассматриваемом случае перед вентиляторами установлены патрубки (под углом $\theta = 45^\circ$), в которых наблюдается интенсивное вихреобразование, оказывающее влияние на устойчивость работы вентиляторов (так как на практике не всегда удается выдержать необходимое расстояние от вентилятора до зоны возмущения потока).

С наибольшей скоростью $V_1 = 15,4$ м/с поток проходит по всасывающему патрубку, соединенному с вентилятором 1. Зная скорость потока и сечение трубопровода, можно вычислить объемный расход воздуха, соответствующий скорости V_1 : $Q_{v1} = 36,93$ м³/с. С меньшей скоростью $V_4 = 14,89$ м/с поток движется к вентилятору 4. Соответствующий объемный расход воздуха составляет $Q_{v4} = 35,72$ м³/с. По патрубку, соединенному с вентилятором 3, поток воздуха проходит с еще меньшей скоростью $V_3 = 12,51$ м/с ($Q_{v3} = 30$ м³/с). С наименьшей скоростью $V_2 = 12,39$ м/с поток движется по трубопроводу, соединенному с вентилятором 2. При этом расход составляет $Q_{v2} = 29,7$ м³/с.

Таким образом, расход воздуха, проходящего через вторую пару вентиляторов (вентиляторы 2, 3), на 17,8 % меньше расхода воздуха, проходящего через первую пару вентиляторов (вентиляторы 1, 4).

Как известно, для анализа течения в установке (или в сети) необходимо рассчитать параметры течения вдоль всей установки, поскольку параметры воздуха (скорость, давление) непосредственно зависят от конфигурации вентиляционной сети, в которой работают вентиляторы. Исследуем поведение потока воздуха, движущегося от вентиляторов по нагнетающим патрубкам и далее по каналу в шахту.

Начальные и граничные условия для второго этажа установки. Поток воздуха, выходя из вентиляторов ВЦ-15, движется по нагнетающим патрубкам в шахту. На рис. 4,а представлен фрагмент трехмерной модели установки 4ВЦ-15 (геометрия второго этажа). Входные условия ставятся в сечении нагнетательного патрубка, расположенном за вентилятором на некотором расстоянии от него. Таким образом, модель имеет четыре входных сечения (по одному от каждого вентилятора) и одно выходное, расположенное на некотором расстоянии от входа в шахту.

Расчет проводится при заданных граничных условиях для скорости в сечении каждого нагнетающего трубопровода и при заданном общем расходе воздуха, который подается в шахту при работе четырех вентиляторов. Учитывается также статическое давление, создаваемое установкой в месте ее присоединения к разветвленной сети шахты. Так как при работе вентилятора одновременно как на всасывание, так и на нагнетание значения скорости потока как на входе в вентилятор, так и на выходе из него очень близки, будем считать, что значение скорости потока, движущегося от каждого вентилятора, получено на первом этапе решения задачи. На выходе из модели задается значение массового расхода воздуха $Q_m = 162,8$ кг/с, проходящего за единицу времени через сечение площадью $S_{out} = 10,74$ м². В сечениях $S_{in1}-S_{in4}$ заданы значения скорости потока $V_1 = 15,4$ м/с, $V_2 = 12,4$ м/с, $V_3 = 12,5$ м/с, $V_4 = 14,9$ м/с соответственно.

Анализ результатов расчета для второго этажа установки. Проведем анализ результатов расчета при движении потока воздуха от вентиляторов в шахту (второй этаж). На рис. 4,б показано движение потока воздуха от сечений нагнетательных патрубков. Четко видны зоны образования вихрей, а также застойная зона за последней парой трубопроводов, идущих от вентиляторов 2, 3. В результате вихреобразования основной невозмущенный поток занимает лишь небольшую часть проточной зоны установки, большая ее часть является нерабочей. На рис. 4,в показано распределение статического давления в секущей плоскости вдоль всей установки. Видно, что за счет работы второй пары вентиляторов вверх по потоку возникает область повышенного статического давления. Действие этой пары вентиляторов аналогично действию заслонки. Следует отметить, что при таком расположении нагнетательных трубопроводов (напротив друг друга) струи воздуха сталкиваются, в результате чего часть кинетической энергии общего потока от каждой пары вентиляторов теряется. Потеря кинетической энергии приводит к потере совокупного скоростного напора. Если вентиляторы установлены параллельно и не обеспечивают необходимый расход воздуха, одной из главных причин этого является отсутствие достаточного оттока воздуха из короба (второй этаж, куда нагнетается воздух от четырех вентиляторов). Для струй, создаваемых вентиляторами 2, 3, отсутствует необходимый отток воздуха, что обусловлено работой первой пары вентиляторов. Вследствие этого в области за первой парой вентиляторов растет статическое давление. Работа вентиляторов 2, 3 приводит к увеличению статического давления вверх по потоку, в результате чего они выходят на режим работы с более низким расходом. Таким образом, при добавлении каждой последующей пары вентиляторов расход воздуха, который они будут создавать, будет уменьшаться. Вклад в расход каждой последующей пары будет незначительным по сравнению с затраченной энергией.

Следует отметить, что для достижения максимальной эффективности работы установки 4ВЦ-15 необходимо снизить до минимума влияние вентиляторов друг на друга, что

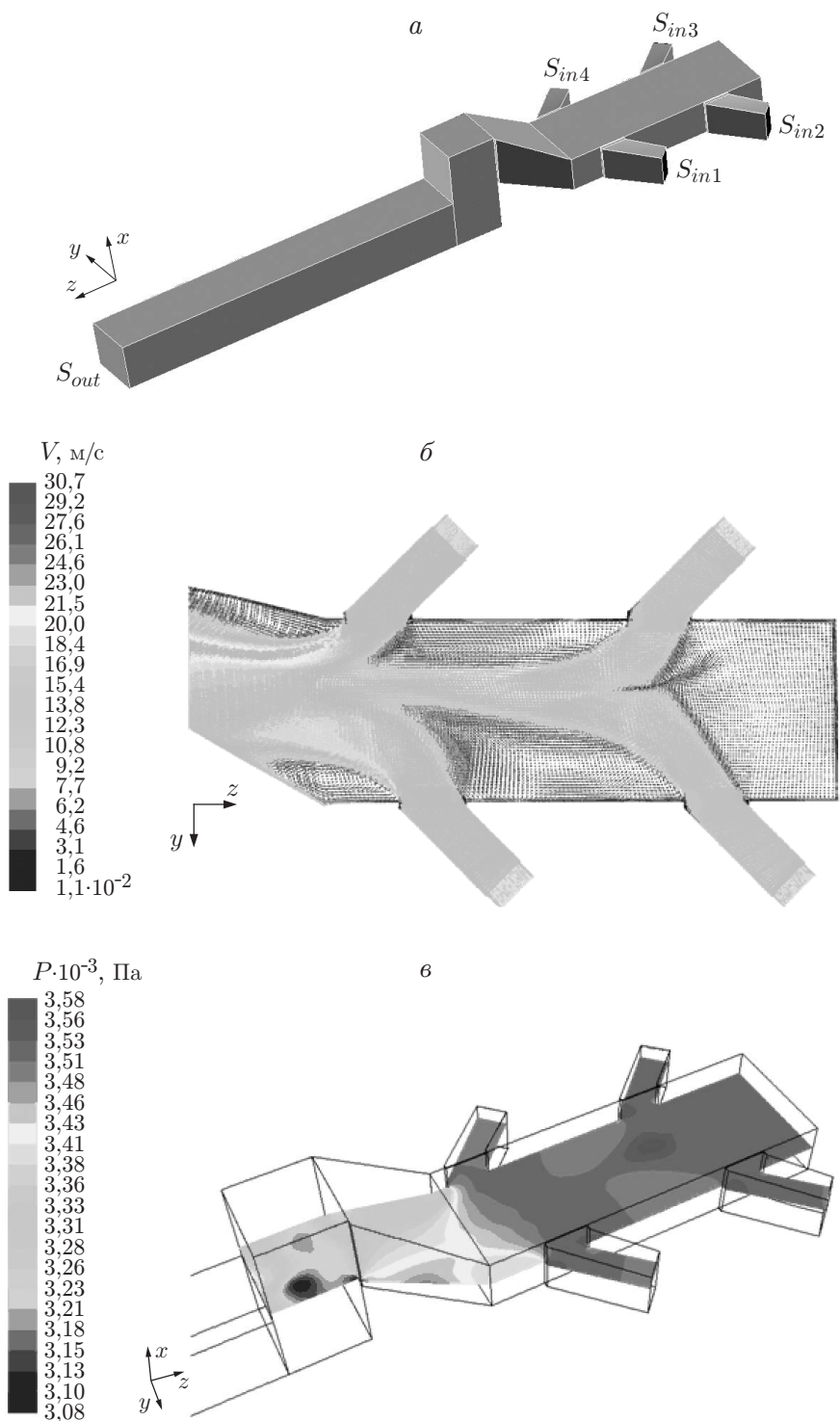


Рис. 4. Трехмерная модель второго этажа вентиляторной установки 4ВЦ-15:
 а — общий вид, б — поле скоростей в горизонтальном сечении, в — распределение давления в горизонтальном сечении; S_{in1} – S_{in4} — входные сечения, S_{out} — выходное сечение

приведет к увеличению как скорости воздушной струи, так и совокупного расхода. Только в этом случае зависимость совокупного расхода воздуха от количества используемых вентиляторов можно считать близкой к линейной.

Для рассматриваемой установки необходимо решить оптимизационную задачу, а именно расчетным путем определить оптимальное расположение вентиляторов для достижения максимально возможного расхода воздуха при работе в данной сети. Так как основной целью работы установки является обеспечение шахты воздухом, величина статического давления, создаваемого каждым вентилятором, не является критической. Однако следует учитывать, что имеется нижний предел значений статического давления, создаваемого установкой в месте ее присоединения к разветвленной сети шахты, $P_{lim} = 104\,267$ Па.

Оптимизация работы установки 4ВЦ-15. Поскольку основной причиной уменьшения общего расхода воздуха (особенно для второй пары вентиляторов) является отсутствие достаточного оттока воздуха на втором этаже установки, необходимо определить оптимальное расположение нагнетающих патрубков с целью минимизации взаимного влияния воздушных потоков, исходящих из них.

На рис. 5 показаны исходная и оптимизированные схемы вентиляционной установки с различным расположением нагнетающих патрубков. Рассмотрим оптимизированные схемы. В соответствии со схемой, представленной на рис. 5,б, вентиляторы присоединены к основным этажам установки с помощью патрубков, расположенных в шахматном порядке. На рис. 5,в показана оптимизированная схема, в соответствии с которой угол наклона патрубков к поверхностям короба уменьшен с 45° до 35° . Угол, равный 35° , был выбран как минимально допустимый в соответствии с техническими требованиями.

Анализ результатов расчета для оптимизированной схемы. На рис. 6 показано распределение скорости воздушного потока, соответствующее схеме, показанной на рис. 5,в. В этом случае совокупный расход воздуха составляет $Q_v = 141,73$ м³/с. Таким образом, за счет использования оптимизированной схемы удалось достичь увеличения расхода воздуха по сравнению с исходным вариантом на 7,2 % (при использовании исходной схемы вентиляционной установки расход воздуха составлял 132,35 м³/с).

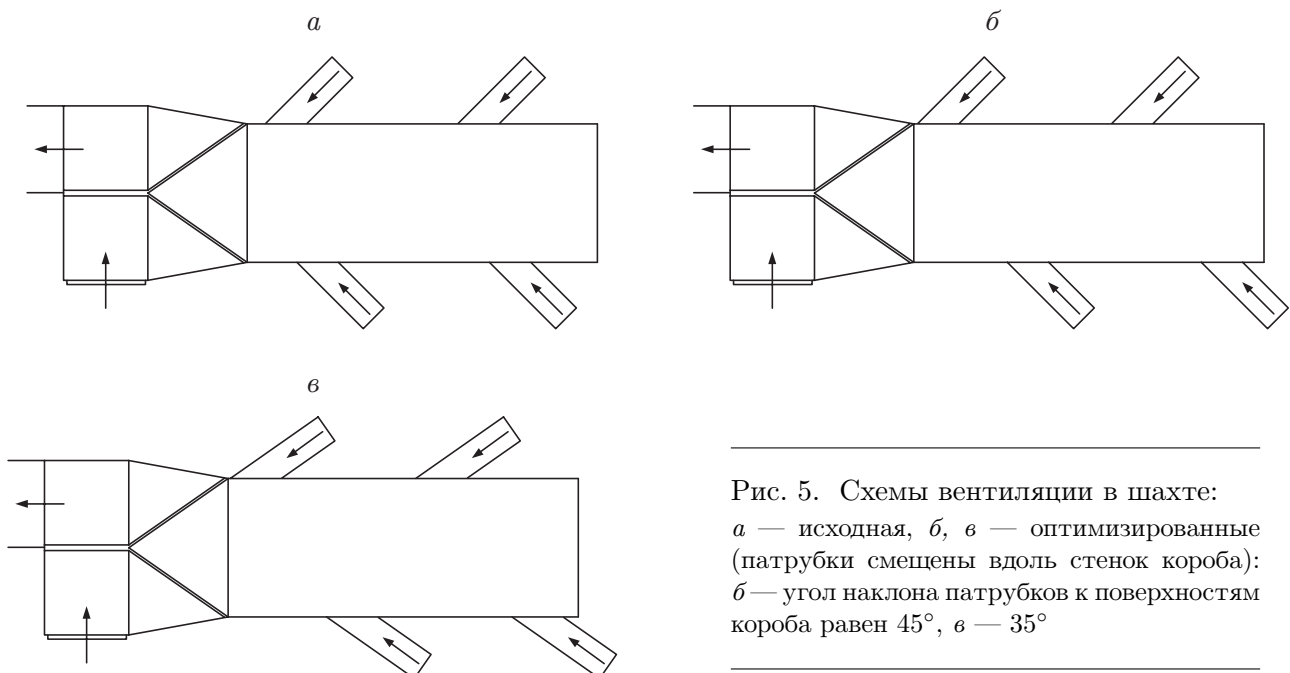


Рис. 5. Схемы вентиляции в шахте:
a — исходная, *б, в* — оптимизированные (патрубки смещены вдоль стенок короба):
б — угол наклона патрубков к поверхностям короба равен 45° , *в* — 35°

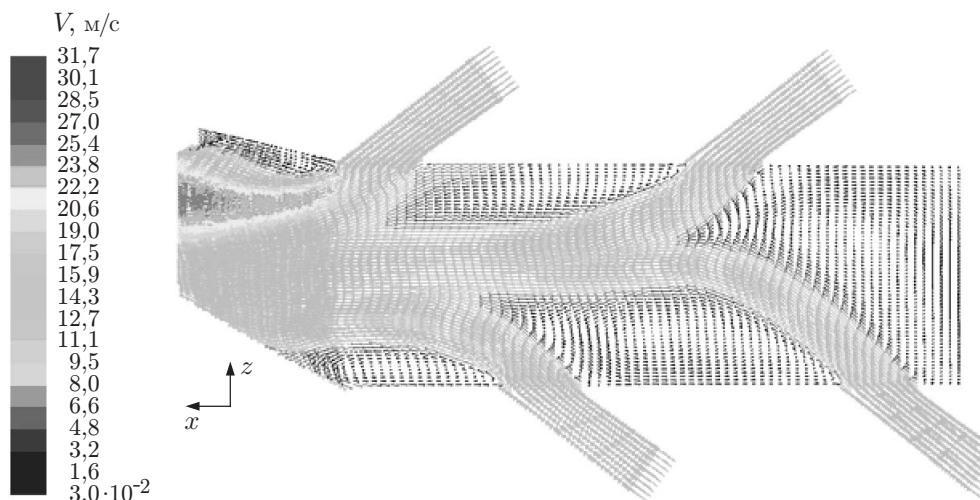


Рис. 6. Поле скоростей в горизонтальном сечении вентиляторной установки

Следует отметить, что при имеющихся технических ограничениях на “наружный” способ оптимизации (т. е. вне основного корпуса) увеличение расхода на $9,53 \text{ м}^3/\text{с}$ считается хорошим результатом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003.
3. Гупта А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. М.: Мир, 1987.
4. Рейнольдс У. К., Себеси Т. Расчет турбулентных течений // Турбулентность / Под ред. П. Бредшоу. М.: Машиностроение, 1980.
5. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гостехтеоретиздат, 1955.
6. Launder В. Е., Spalding D. В. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Engng. 1974. V. 3. P. 269–289.

*Поступила в редакцию 26/III 2009 г.,
в окончательном варианте — 3/XII 2009 г.*