

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. Н. Андрийчук; В. И. Соколов, д.т.н., профессор; Н. Д. Андрийчук, д.т.н., профессор; Т. Е. Шевцова
ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

Работа посвящена улучшению эксплуатационных характеристик вентиляционных систем совершенствованием конструктивных элементов, связывающих воздуховод с нагнетательным патрубком вентилятора. Рассмотрены вентиляторные установки с центробежными (радиальными) вентиляторами, особенностью которых является существенная неравномерность поля скоростей воздушного потока на выходе нагнетательного патрубка, деформация его структуры и возникновение крупномасштабных завихрений. Для улучшения аэродинамических характеристик вентиляторной установки обобщены рекомендации по проектированию за выходным патрубком диффузора, обеспечивающего снижение сопротивления вентиляционной системы. Численным моделированием турбулентного потока в конструктивных элементах на выходе нагнетательного патрубка обоснована целесообразность выполнения выравнивающей пластины в диффузорном расширении в виде составных частей. Выполнены экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вентиляторной установки при использовании в диффузорном расширении составной выравнивающей пластины. По результатам экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по размещению составной пластины в несимметричном диффузоре, при котором достигается максимальное увеличение производительности центробежного вентилятора. В качестве основных геометрических параметров, определяющих улучшение аэродинамических характеристик вентиляторной установки, принималась глубина погружения передней части пластины в нагнетательный патрубок и расстояние задней части пластины от боковой поверхности диффузора. Повышение производительности вентилятора обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик вентиляционной системы.

Ключевые слова: вентиляционная система, центробежный вентилятор, несимметричный диффузор, выравнивающая пластина, аэродинамические характеристики.



*Андрийчук
Владислав Николаевич*



*Соколов
Владимир Ильич*



*Андрийчук
Николай Данилович*



*Шевцова
Татьяна Евгеньевна*

ВВЕДЕНИЕ

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) являются одной из наиболее важных составляющих проектирования и разработки промышленных и административных зданий и жилых помещений [1-3]. Системы ОВК с помощью подачи наружного воздуха поддерживают в них безопасные и комфортные условия по температуре, влажности, скорости движения воздуха и чистоте воздушной среды. Основными задачами управления системами ОВК являются [4-6]: создание и поддержание микроклимата в пределах здания, сооружения или помещения, комфортного для человека или животных и растений, а также материальных предметов (оборудования, веществ, изделий, произведений искусства и т. п.); энергосбережение или экономия энергии, затрачиваемой на создание и поддержание микроклимата; технологическая безопасность системы и снижение затрат на ее эксплуатацию.

Затраты на системы ОВК и, в частности, системы вентиляции составляют значительную часть затрат на эксплуатацию здания и во многом определяются правильным подходом к их проектированию. При анализе совокупных затрат в ряде случаев получается, что покупная стоимость составляет иногда очень небольшую часть, часто около 10 %. Остальные 90 % идут на эксплуатационные затраты [4, 7, 8].

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

Улучшение эксплуатационных характеристик вентиляционных систем, снижение их эксплуатационных затрат требует установки элементов присоединения центробежного вентилятора к вентиляционной системе, конструкции которых обеспечивали бы оптимальные аэродинамические характеристики вентиляторных установок [3, 4, 9]. Центробежные вентиляторы присоединяются к системе воздуховодов через диффузоры, отводы, гибкие вставки, а также участки воздуховодов [10-13].

Расположение таких элементов сразу после нагнетательного патрубка требует дополнительного изучения, поскольку на выходе из него воздушный поток характеризуется неравномерным полем скорости, наклоном потока, значительной турбулентностью и крупномасштабными завихрениями [14-16]. Поэтому для эффективной работы вентиляционной системы необходимо определить оптимальные геометрические параметры самих конструктивных элементов и их размещения, обеспечивающих минимальные потери.

В этой связи актуальной является задача улучшения эксплуатационных характеристик вентиляционных систем путем совершенствования их конструктивных элементов. Совершенствование элементов, связывающих выходной патрубок центробежного вентилятора с нагнетательным воздуховодом, позволит снизить аэродинамическое сопротивление системы, уменьшить потери давления и, как следствие, повысить производительность вентиляторной установки.

Целью работы является улучшение эксплуатационных характеристик вентиляционных систем совершенствованием конструктивных элементов, связывающих воздуховод с нагнетательным патрубком вентилятора.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Достижение сформулированной цели выполнено на основе комплексного подхода в теоретических и экспериментальных исследованиях. В работе использованы методы компьютерного моделирования и методы экспериментальных исследований на лабораторных стендах.

Как отмечено выше, улучшение аэродинамических характеристик вентиляторных установок достигается совершенствованием конструктивных элементов соединения воздуховодов с выходными патрубками вентиляторов, в качестве которых могут быть использованы различного вида диффузоры [4, 15]. Исследования диффузоров с равномерным распределением скоростей на входе показывают, что для предупреждения больших потерь давления в них, угол раскрытия должен быть небольшим $\alpha_d \leq 14$ (рис. 1, а), поскольку дальнейшее увеличение этого угла способствует крупномасштабному турбулентному перемешиванию потока, отрыву пограничного слоя от стенки диффузора и связанным с этим сильным вихреобразованием, вследствие чего коэффициент потерь диффузора существенно возрастает. Вместе с тем, значительное увеличение длины диффузора

(при небольших углах расширения) является неудобным с точки зрения монтажной целесообразности, поэтому вместо относительно длинных диффузоров применяют более короткие, хотя и с увеличенными потерями давления в них. Условия протекания потока в коротких диффузорах (с большими углами раскрытия) могут быть существенно улучшены, а сопротивление уменьшено, если предотвратить отрыв потока или ослабить вихреобразование. Основные способы и мероприятия, способствующие улучшению течения в диффузорах [10-13], представлены на рис. 1-4.

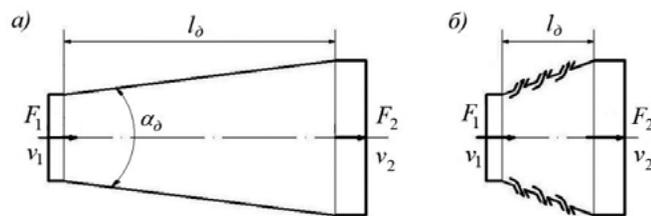


Рис. 1. Повышение эффективности диффузоров:
а) уменьшения угла раскрытия диффузора;
б) отсос пограничного слоя

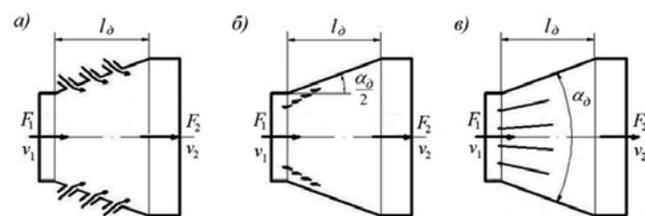


Рис. 2. Повышение эффективности диффузоров:
а) сдув пограничного слоя;
б) установка направляющих лопаток (дефлекторов);
в) установка укороченных разделяющих стенок

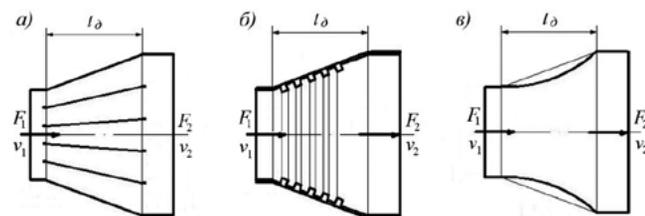


Рис. 3. Повышение эффективности диффузоров:
а) установка удлиненных разделяющих стенок;
б) оребрение внутренних поверхностей стенок диффузора;
в) изогradientный криволинейный диффузор

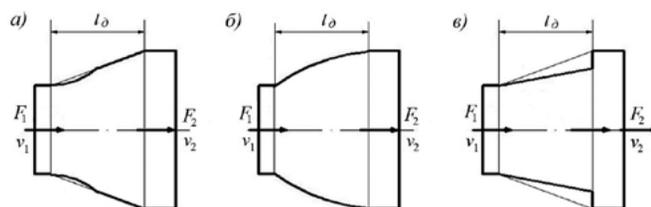


Рис. 4. Повышение эффективности диффузоров:
а) криволинейный диффузор;
б) предотрывный диффузор;
в) ступенчатый диффузор

Как отмечалось нами ранее, особенностью диффузора, размещенного непосредственно после нагнетательного патрубка центробежного вентилятора, является формирование неравномерного и несимметричного поля скоростей в начальном его сечении. Поэтому нагнетательный поток в диффузоре вентиляторной установки отличен от течений в диффузорах с равномерным распределением скорости.

Для дополнительного анализа структуры потока в конструктивных элементах, связывающих выходной патрубок и воздуховод, проведено численное моделирование турбулентного течения в модуле Flow Simulation программного комплекса SOLIDWORKS [17].

При описании турбулентного течения применялась стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности [14, 16], в основу которой положен анализ изменения кинетической энергии k турбулентного потока и скорости ее диссипации ϵ . Для расчета дополнительных турбулентных напряжений использовалась концепция турбулентной вязкости с определением кинематического коэффициента турбулентной вязкости ν_t по «связке» Прандтля-Колмогорова.

На рис. 5-6 показаны двумерные графики с векторами скоростей (длина стрелок показывает величину скорости) и изолиниями, которые показывают линии и области одинаковых диапазонов результирующих скоростей (каждая область закрашена в разный цвет).

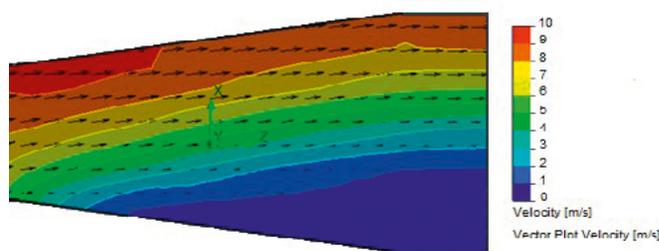


Рис. 5. Распределение скоростей, изолиний и векторов скоростей в диффузоре с неравномерным полем скоростей в начальном сечении

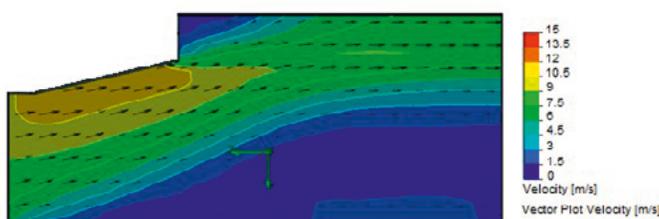


Рис. 6. Распределение скоростей, изолиний и векторов скоростей в несимметричном ступенчатом диффузоре с неравномерным полем скоростей в начальном сечении

Численное моделирование убедительно показывает, что для выравнивания потока целесообразным является установка в диффузоре составной выравнивающей пластины с разными углами ее частей и погружением передней по потоку части в зону выходного патрубка вентилятора. И в большей степени дан-

ную рекомендацию следует применить, когда в силу монтажных требований в качестве конструктивного элемента соединения воздуховода с выходным патрубком вентиляторов используется несимметричный диффузор.

На рис. 7 показана составная выравнивающая пластина в несимметричном диффузоре. Благодаря разным углам наклона α_1 и α_2 соответственно составных частей пластины (рис. 7, а), их направления приближаются к линиям тока воздушного потока, поэтому уменьшается дополнительная деформация потока и вихреобразование на отдельных участках пластины. Это обеспечивает снижение потерь энергии воздушного потока в зоне выхода потока из центробежного вентилятора и в зоне несимметричного диффузора. Снижение потерь энергии позволяет повысить напор и производительность центробежного вентилятора, тем самым, улучшить его аэродинамические характеристики.

Исследование аэродинамических характеристик вентиляторной установки с центробежным вентилятором при наличии составной выравнивающей пластины проведено на экспериментальном стенде, схема которого показана на рис. 8. Здесь обозначены: 1 – центробежный вентилятор (В), 2 – входной патрубок вентилятора, 3 – всасывающий воздуховод (ВВ) с установленным коллектором (К) для измерения расхода воздуха, 4 – выходной патрубок вентилятора, 5 – несимметричный диффузор (НД), 6 – нагнетательный воздуховод (НВ), в котором установлен дроссель-клапан (ДК) для регулирования режимов работы вентилятора, 7 – составная выравнивающая пластина. На экспериментальной установке использован вентилятор ВР 80-75.1 № 2,5 с частотой вращения рабочего колеса $n = 1450$ об/мин.

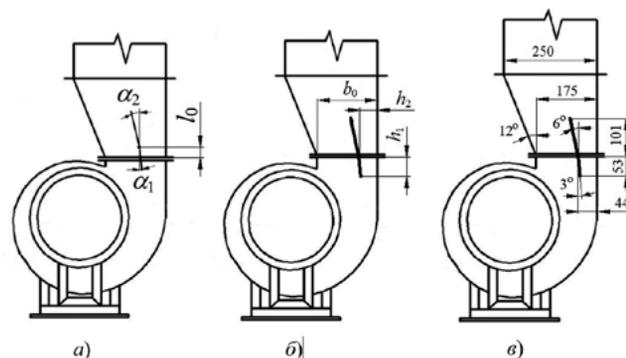


Рис. 7. Составная выравнивающая пластина в несимметричном диффузоре

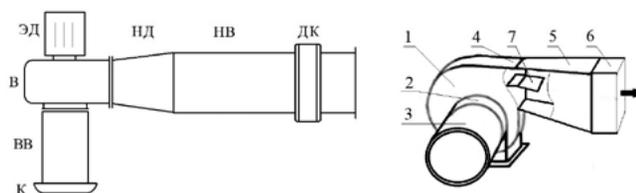


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования убедительно показывают повышение производительности вентиляторной установки с центробежным вентилятором

при наличии составной выравнивающей пластины в несимметричном диффузоре. На рис. 9 показано сравнение аэродинамических характеристик вентиляторной установки без пластины и с пластиной, размеры которой приведены на рис. 7, в.

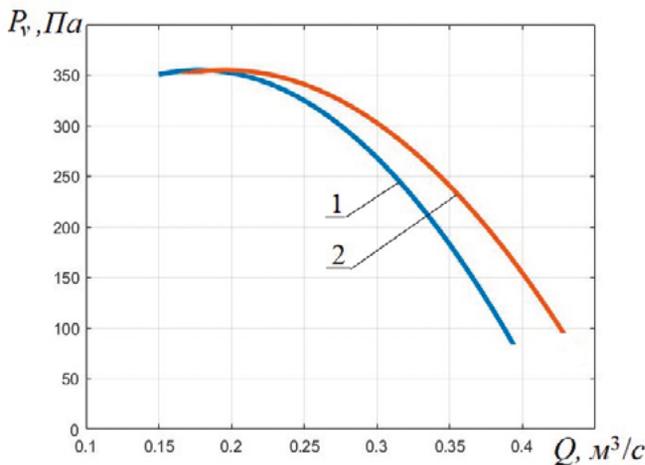


Рис. 9. Аэродинамические характеристики вентиляторной установки

(1 – без пластины, 2 – при наличии составной выравнивающей пластины)

Экспериментальные исследования показали, что расположение точки изгиба составных частей выравнивающей пластины относительно плоскости соединения выходного патрубка вентилятора с несимметричным диффузором в диапазоне расстояний $l_0 = \pm 0,05b_0$ (рис. 7, а, б) оказывало влияние в диапазоне погрешности измерений. Поэтому в дальнейших исследованиях по разработке рекомендаций для установки выравнивающей пластины было принято оптимальным считать выполнение различных углов наклона частей пластины на линии присоединения выходного патрубка к диффузору, т.е. положить $l_0 = 0$ (рис. 7, а). Следует отметить, что вышесказанное имеет место в зоне номинальных режимов работы центробежного вентилятора и при угле раскрытия несимметричного диффузора $\alpha_d \leq 14^\circ$.

При проведении экспериментальных исследований выполнялся анализ влияния на аэродинамические характеристики вентиляторной установки следующих геометрических параметров составной выравнивающей пластины (рис. 7, б):

α_1 – угол наклона участка выравнивающей пластины к нормали поперечного сечения в зоне выходного патрубка вентилятора;

α_2 – угол наклона участка выравнивающей пластины к нормальной оси поперечного выходного патрубка в зоне несимметричного диффузора;

• безразмерная глубина вхождения передней части пластины в выходной патрубок

$$\bar{h}_1 = h_1/b_0, \quad (1)$$

где h_1 – глубина вхождения передней (по отношению к воздушному потоку) части пластины в выходной патрубок центробежного вентилятора; b_0 –

размер стороны выходного патрубка, поперек которого устанавливается пластина;

• безразмерное расстояние от прямой стенки несимметричного диффузора

$$\bar{h}_2 = h_2/b_0, \quad (2)$$

где h_2 – безразмерное расстояние от прямой стенки несимметричного диффузора до точки изгиба составных частей выравнивающей пластины. h_2 – расстояние от стенки;

• безразмерная суммарная длина пластины

$$\bar{b} = b/b_0, \quad (3)$$

где b – суммарная длина наклонных частей составной выравнивающей пластины.

Экспериментальные исследования показали, что оптимальные геометрические параметры размещения выравнивающей пластины в несимметричном диффузоре, при которых наблюдается максимальное повышение производительности центробежного вентилятора, зависят от режима его работы, поскольку режим работы существенно влияет на кинематику и структуру потока в конструктивных элементах вентиляторной установки.

Для зоны номинальных режимов работы вентилятора и безразмерной суммарной длины наклонных частей пластины $\bar{b} = 0,6...1$ оптимальными следует считать следующие диапазоны линейных размеров которые обеспечивают относительное повышение расхода центробежного вентилятора не менее 8 %.

$$\bar{h}_1 = 0,25...0,35; \bar{h}_2 = 0,2...0,3, \quad (4)$$

Повышение производительности в большей степени достигается для более узкого диапазона линейных размеров

$$\bar{h}_1 = 0,25...0,3; \bar{h}_2 = 0,25...0,3, \quad (5)$$

в котором для зоны максимального КПД вентилятора относительное повышение расхода составляет 10...12 %.

Результаты проведенных исследований показали, что зоне максимального улучшения аэродинамических характеристик вентиляторной установки соответствуют следующие углы наклона составных частей выравнивающей пластины

$$\alpha_1 \approx \alpha_d/4; \alpha_2 \approx \alpha_d/2. \quad (6)$$

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе проведены исследования по улучшению эксплуатационных характеристик вентиляционных систем совершенствованием конструктивных элементов, связывающих воздуховод с нагнетательным патрубком вентилятора.

Рассмотрены вентиляторные установки с центробежными (радиальными) вентиляторами, особенностью которых является существенная

неравномерность поля скоростей воздушного потока на выходе нагнетательного патрубка, деформация его структуры и возникновение крупномасштабных завихрений. Для улучшения аэродинамических характеристик вентиляторной установки обобщены рекомендации по проектированию за выходным патрубком диффузора, обеспечивающего снижение сопротивления вентиляционной системы.

Численным моделированием турбулентного потока в конструктивных элементах на выходе нагнетательного патрубка обоснована целесообразность выполнения выравнивающей пластины в диффузорном расширении в виде составных частей. Выполнены экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вентиляторной установки при использовании в диффузорном расширении составной выравнивающей пластины. По результатам экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по размещению составной пластины в несимметричном диффузоре, при котором достигается максимальное увеличение производительности центробежного вентилятора. В качестве основных геометрических параметров, определяющих улучшение аэродинамических характеристик вентиляторной установки принималась глубина погружения передней части пластины в нагнетательный патрубок и расстояние задней части пластины от боковой поверхности патрубка.

Повышение производительности вентилятора обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик вентиляционной системы.

Список литературы

1. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев, Л. Н. Балужева, А. Д. Гальперин [и др.]. – Москва: Евроклимат, 2003. – 416 с.
2. Howell, R. Principles of heating ventilating and air conditioning/ Ronald H. Howell. – Atlanta: ASHRAE, 2017. – 594p.
3. Свистунов, В. М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства / В. М. Свистунов, Н. К. Пушняков. – Санкт-Петербург: Политехника, 2007. – 423 с.
4. Каменев, П. Н. Вентиляция. Учебное пособие / П. Н. Каменев, Е. И. Тертичник. – Москва: АСВ, 2008. – 624 с.
5. Ahmed, A. Q. Energy saving and indoor thermal comfort evaluation using a novel local exhaust ventilation system for office rooms / A.Q. Ahmed, S. Gao, A.K. Kareem // Applied Thermal Engineering. – 2017. – No 110. – P. 821-834.
6. Sokolov, V. Measurement of Impurity Concentration in Turbulent Flows of Ventilation Systems Channels / V. Sokolov, O. Krol // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2096. – 012102.
7. Беккер, А. М. Системы вентиляции / А. М. Беккер. – Москва: Техносфера, Евроклимат, 2005. – 232 с.
8. Sokolov, V. Increasing Efficiency of Ventilation Systems with Vortex Regulation Devices / V. Sokolov // Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2023. – P. 1012-1022.
9. Sokolov, V. Increased measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems / V. Sokolov // Proceedings of the 6th international conference on industrial engineering. ICIE 2020. Lecture notes in mechanical engineering. – Cham: Springer, 2021. – Vol. 2. – P. 1182-1190.
10. Временные методические рекомендации по проектированию входных и выходных элементов вентиляторных установок. – Москва: ЦНИИПромзданий, 1976. – 25 с.
11. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – Москва: Машиностроение, 1975. – 554 с.
12. Франкфурт, М. О. Экспериментальное исследование диффузоров с щелевым отсасыванием воздуха из пограничного слоя / М. О. Франкфурт // Промышленная аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1973. – Вып. 30. – С. 41-49.
13. Идельчик, И. Е. Исследование коротких диффузоров с разделительными стенками. / И. Е. Идельчик // Теплоэнергетика. – 1958. – №8. – С. 21-26.
14. Effect of the turbulence model on the heat ventilation analysis in a box prototype / Hani Benguesmia, Badis Bakri, Zied Driss [etc.] // Diagnostyka. – 2020. – Vol. 21. – No. 3. – P. 55-66.
15. Соколов, В. І. Гідраліка / В. І. Соколов, О. С. Кроль, О. В. Єпіфанова. – Сєвєродонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.
16. Zhai, Z. J. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by cfd: Part 1—summary of prevalent turbulence models / Z.J. Zhai, Z. Zhang, W. Zhang, Q.Y. Chen // HVAC and R Research. – 2007. – Vol. 13(6). – P. 853-870.
17. SolidWorks. Компьютерное моделирование в современной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е.В. Одинцов [и др.]. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.