

ПОСТРОЕНИЕ ОСРЕДНЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВОБОДНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПОТОКОВ

CREATION OF AVERAGE CHARACTERISTICS OF FREE TURBULENT VENTILATING STREAMS

С.А. КОЛОДЯЖНЫЙ, С.А. ЯРЕМЕНКО, А.И. КОЛОСОВ, И.И. ПЕРЕСЛАВЦЕВА
S.A. KOLODIAZHNY, S.A. JAREMENKO, A.I. KOLOSOV, I.I. PERESLAVTSEVA

(Воронежский государственный технический университет)
(Voronezh State Technical University)

E-mail: jaremenko83@mail.ru; innapb@mail.ru; kolossn@yandex.ru.

Существующий инженерный метод расчета свободных турбулентных вентиляционных потоков, основанный на осредненных характеристиках потока, не позволяет получать информацию о микроструктуре его турбулентности. Актуальными, на наш взгляд, являются теоретические построения осредненных характеристик свободных турбулентных вентиляционных потоков с энергетических позиций. В работе показано, что теоретические построения осредненных характеристик невозможны без изучения микроструктуры турбулентности. Установлено, что при проектировании воздухораспределителей в системах вентиляции и кондиционирования воздуха отказ от оценки значения частоты пульсаций потока приводит к существенным ошибкам. Предложенные зависимости позволяют впервые установить картину развития процесса перемешивания приточного вентиляционного потока в среде вентилируемого помещения, что делает возможным рассчитывать и организовывать воздухообмен в помещении с учетом диссипации энергии вентиляционных потоков.

The existing engineering method of calculation of free turbulent ventilating streams based on average characteristics of a turbulent stream doesn't allow to receive information on a microstructure of turbulence of a stream. In our opinion, theoretical creation of average characteristics of free turbulent ventilating streams from power positions is actual. In work it is shown that theoretical creation of average characteristics is impossible without studying of a microstructure of turbulence. It is established that at design of air distributors in systems of ventilation and air conditioning refusal of an assessment of value of frequency of pulsations of a stream leads to essential mistakes. The offered dependences allow to establish for the first time a picture of development of process of hashing of a stitched ventilating stream in the environment of the ventilated room that does possible to count and organize air exchange indoors taking into account dissipation of energy of ventilating streams.

Ключевые слова: скорость, амплитуда, поток, турбулентность, воздухо-распределитель, частота, вентиляция, энергия, спектр.

Keywords: speed, amplitude, stream, turbulence, distributor of air, frequency, ventilation, energy, spectrum.

Существующий инженерный метод расчета свободных турбулентных вентиляционных потоков, основанный на осредненных характеристиках турбулентного потока, сводится к определению скорости и температуры воздуха, выпускаемого из воздухораспределителя с целью обеспечения заданных значений подвижности, избыточной температуры и чистоты воздуха рабочей зоны [1]. К сожалению, упомянутый метод не позволяет получать информацию о микроструктуре турбулентности свободного вентиляционного потока. Между тем, ряд проблем, связанных со свободной турбулентностью – диффузия, влияние вязкости вблизи ограждающих конструкций, на которые настигается вентиляционный поток – не могут быть разрешены только на основании осредненных характеристик. К перечисленным проблемам следует отнести и управление свободным вентиляционным потоком, поскольку представление о турбулентном течении заключается в суперпозиции двух движений: осредненного и пульсационного [2], [8], [11], [12]. Следовательно, теоретические построения осредненных характеристик невозможны без изучения микроструктуры турбулентности.

1. *Моделирование свободных турбулентных вентиляционных потоков.* Известно [1], [3], что свободный турбулентный вентиляционный поток характеризу-

ется не только амплитудой отклонения пульсационной скорости от среднего значения, но и частотой этих отклонений, что позволяет утверждать:

- поток обладает наименьшим, наименее вероятным значением частоты – ω_0 , c^{-1} , и, поскольку волновое число k – отношение частоты к средней скорости течения, то и наименьшим значением $k_0 = \omega_0 / W_0$;

- так как энергия передается из области малых волновых чисел в область больших волновых чисел, то процесс распространения свободного вентиляционного потока, с известных позиций [3], [9], [10], [13], обусловлен процессом случайных столкновений частиц потока и среды, окружающей этот поток, тем более, что в помещениях, как правило, рассматривается процесс перемешивания. Такой процесс, приводящий к диссипации энергии, протекает лишь в одном направлении, сопровождающимся увеличением энтропии.

С целью иллюстрации изложенного выше рассматривается выборка из пяти членов для затопленного потока истекающего из насадков с осевой симметрией размерами $2R_0 = 20, 40$ и 80 см и начальной скоростью истечения $500 \text{ см} \cdot c^{-1}$.

В табл. 1 представлена выборка для затопленного потока, истекающего из насадков с осевой симметрией.

Таблица 1

R_0 , см	Число Рейнольдса Re_0	Наименьшая частота ω_0 , c^{-1}	Начальная длина волны Z_0 , см	Начальное значение волнового числа K_0 , cm^{-1}
10	6,7	60	26,2	0,12
15	1	40	39,3	0,08
20	1,3	30	52,3	0,06
25	1,7	24	65,4	0,048
40	2,7	15	104,7	0,03

Представленная выборка корректна в отношении теории Кирхгофа о распространении неплоских волн в цилиндрических трубах, поперечные размеры которых малы по сравнению с длиной волны.

Располагая информацией о значениях наименьшей частоты, следуя [4], представляется возможным в качестве оценки описать переход энергии осредненного движения по пульсациям низких частот и от них – к

более высоким частотам, пока последние не достигнут предела, обусловленного вязкостью воздуха. Другими словами, в полном соответствии со спектральной теорией А.Н. Колмогорова [5] следует вести речь о присутствии в свободном вентиляционном потоке низких частот, соответствующих вихрям крупных размеров, и высоких частот, которым соответствуют вихри мелких размеров. Следовательно, в рассматриваемом

потоке всегда существуют крупно- и мелко-масштабные турбулентности.

2. *Построение частотного спектра вентиляционных потоков с энергетических позиций.* На рис. 1 в соответствии с [5], из табл. 1 выполнено построение частотного спектра для вентиляционного потока при разных числах Рейнольдса. Выше было показано, что волновое число $\kappa = \omega / W$, а передача энергии осуществляется от малых значений κ (ось потока) к большим (периферия потока); так как волновое число связано с длиной волны z соотношением $z = 2\pi / \kappa$, то падение значения z (с ростом κ) свидетельствует о росте диссипации энергии в направлении периферии потока (в рассматриваемом сечении).

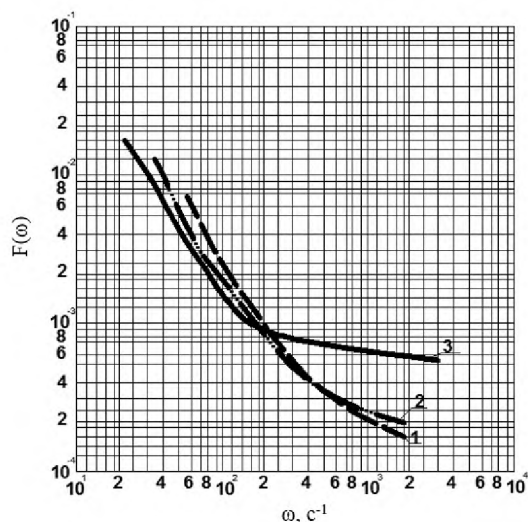


Рис. 1

Становится очевидным, что рис. 1 (частотный спектр вентиляционных потоков (табл. 1): 1 – $Re = 62000$, 2 – $Re = 130000$, 3 – $Re = 220000$) иллюстрирует частотный спектр в приосевой области течения вниз по потоку. Здесь легко усмотреть (особенно для потока с $Re = 2,7 \cdot 10^5$), если скорость потока достаточно велика, то турбулентность сносится по потоку, не претерпевая изменений.

Более наглядное представление о распределении "каскада частот" по длине потока дает рис. 2 (частота пульсаций в приосевой области свободных вентиляционных потоков: 1 – $Re = 62000$, 2 – $Re =$

130000 , 3 – $Re = 220000$), где начало отсчета частот вынесено за пределы ядра потока и расположено в основном участке течения потока.

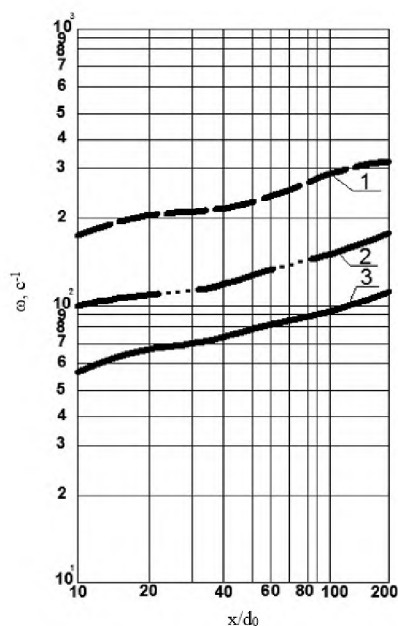


Рис. 2

Представленный рис. 2 описывает инерционные диссипативные интервалы в упомянутом типичном спектре.

Следовательно, речь идет о движении с естественным затуханием, которое в [6] для случая свободной турбулентности классифицируется, как диссипирующая волна.

Как показано в [7], характерное время затухания τ_0 убывает с ростом волнового числа, то есть короткие волны затухают быстрее, чем длинные.

Если вентиляционный поток развивается в среде, где существует некоторая мера диссипации энергии μ , то при фиксированном значении κ величина τ_0 убывает с ростом μ , а волны заданной длины затухают в среде с большим значением μ .

Иллюстрация длинноволновых возмущений для свободных потоков из табл. 1 представлена на рис. 3 (распределение волновых чисел $\kappa = \omega / W$ и длин волн z по течению свободных вентиляционных потоков: а) – волновое число, б) – длина волны; 1 – $Re = 62000$, 2 – $Re = 130000$, 3 – $Re = 220000$).

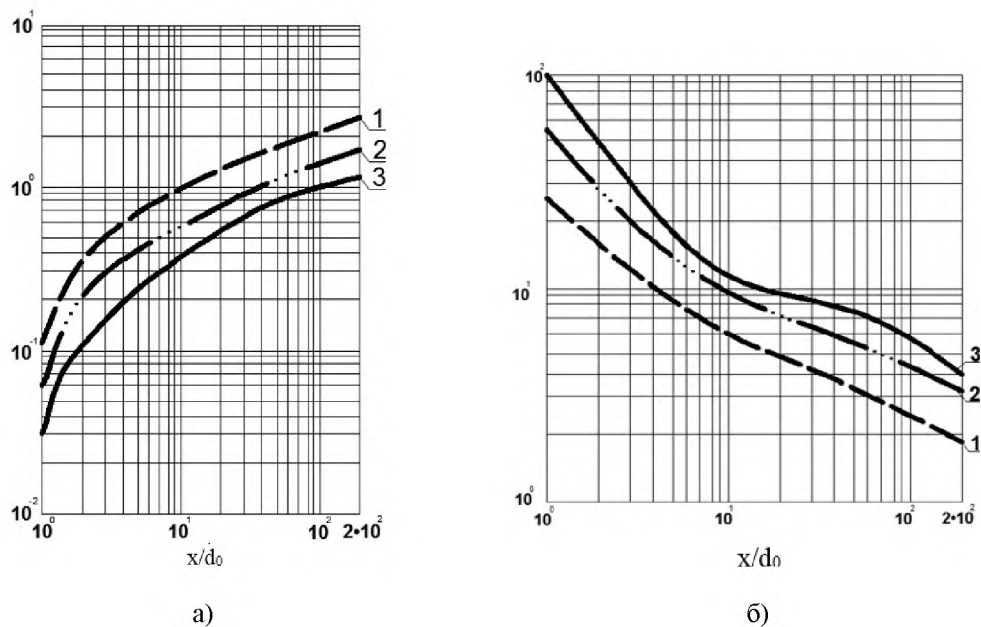


Рис. 3

Наличие информации о распределении значений волновых чисел в различных сечениях потока (табл. 1) позволяет представить рис. 4 (распределение параметра Колмогорова η в свободных вентиляционных потоках: 1 – $Re = 62000$, 2 – $Re = 130000$, 3 – $Re = 220000$) с целью описания очередных характеристик вентиляционных потоков:

одномерный спектр по волновым числам

$$\Phi(k) = 0,5\varepsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (1)$$

и энергетический спектр

$$E \sim k^{-5/3}. \quad (2)$$

Если в качестве оценки используется микромасштаб А.Н. Колмогорова:

$$\eta = (v^3 / \varepsilon)^{1/4}, \quad (3)$$

то с учетом соотношений [5]:

$$\omega \sim (\varepsilon / \nu)^{1/2} \quad (4)$$

можно характеризовать размеры вихрей в рассматриваемом потоке, в которых осуществляется диссипация энергии.

Дж. Тейлором для осредненного значения диссипации энергии предложена зависимость:

$$\varepsilon = 7,5\mu(\sigma / \eta)^2, \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость; σ – средняя квадратичная скорость.

Поскольку нас интересует лишь качественная оценка, то утверждение, что отношение средней квадратичной скорости к размеру вихря η – суть некоторая угловая скорость – вполне корректно. Но упомянутая угловая скорость, в свою очередь, связана с интенсивностью вихрей.

Становится понятным, что $\varepsilon = \mu(\text{rot}W)^2$; $\varepsilon = 7,5\mu(\sigma / \eta)^2$ и диссипация растет с уменьшением среднего размера вихря, а величина $7,5(\sigma / \eta)^2$ или $7,5(W_p / \eta)^2$ – тождественна среднему квадрату вихря.

Отметим, что η^{-1} есть значение волнового числа, вблизи которого диссипация энергии оказывается максимальной, а сам спектр круто спадает с ростом значения k в результате вязкого вырождения малых вихрей.

Построение упомянутого спектра связано с рядом дополнительных вычислений.

Наличие информации о распределении частоты пульсаций по длине свободного вентиляционного потока позволяет с помощью выражений (3) и (4) описать распределение

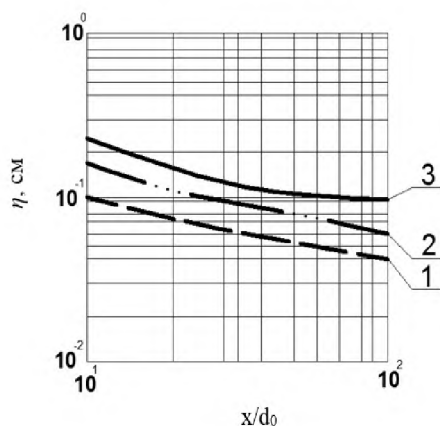


Рис. 4

Следует учитывать, что мы вынуждены оперировать значениями волновых чисел по оси потока. Если обратиться к понятию средней квадратичной скорости, то периферийный распад потока начинается ранее упомянутых значений κ .

В любом случае, утверждение И.А. Шепелева [6] о существовании некоторого критического сечения, где толщина потока имеет максимальное значение, после которого начинается распад этого течения, подтверждается гипотезой Гейзенберга и спектральной теорией турбулентности.

Поскольку пульсация скорости – результат прохождения через некоторую точку возмущений или завихренной массы различного размера, то представляется возможным, с позиций гипотезы Гейзенберга, но в координатах $\Phi(\kappa) - \eta$, описать "интегральный" спектр пульсационной скорости \overline{W}'^2 в приосевой зоне течения потока на рис. 5.

Располагая информацией о частоте пульсаций ω , значениях волнового числа κ , параметре А.Н. Колмогорова η и скорости диссипации энергии ε в данном сечении потока x/d_0 , всегда можно с целью оценки описать "локальный" спектр пульсационной скорости для условия $x/d_0 = \text{var}$.

параметра А.Н. Колмогорова η на относительных расстояниях x/d_0 (для основного участка потока) – рис. 4.

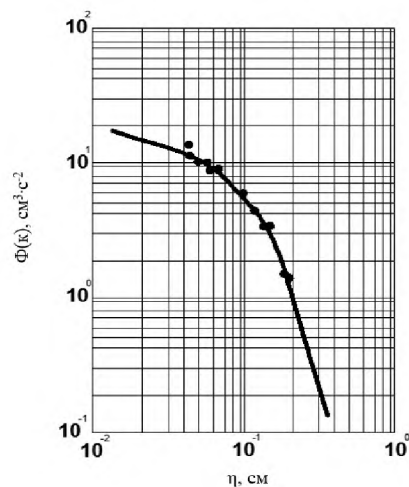


Рис. 5

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, в работе показано, что теоретические построения осредненных характеристик невозможны без изучения микроструктуры турбулентности.

2. Установлено, что при проектировании воздухораспределителей в системах вентиляции и кондиционирования воздуха отказ от оценки наименьшего наивероятнейшего значения частоты пульсаций ω_0 приводит к существенным ошибкам, так как определенная конструкция воздухораспределителя предназначена для обеспечения необходимых условий микроклимата помещения, где всегда существует мера диссипации μ , определение которой без использования основных положений спектральной теории турбулентности не представляется возможным.

3. Предложенные зависимости позволяют впервые установить картину развития процесса перемешивания приточного вентиляционного потока в среде вентилируемого помещения, что делает возможным рассчитывать и организовывать воздухообмен в помещении с учетом диссипации энергии вентиляционных потоков.

1. Полосин И.И., Дерепасов А.В. Моделирование вентиляционных процессов в производственных помещениях с проемами в междуэтажных перекрытиях // Научный вестник Воронежского гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011, № 2. С. 43...51.
2. Полосин И.И., Гармонов К.В., Плотников А.В. Применение теории вентиляционных струй к расчету концентраций вредных веществ в приземном слое атмосферы // Экология и промышленность России. – 2014, №2. С. 30...34.
3. Пейн Г. Физика колебаний и волн. – М.: Мир, 1976.
4. Минский Е.Н. О пульсациях скоростей при вполне установившемся турбулентном потоке // ЖТФ. – 1940. Т.10, вып. 19. С. 1574...1581.
5. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклады АН СССР. – 1941. Т. 30, вып. 4. С. 290...303.
6. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. – М.: Стройиздат, 1978.
7. Бахтеногар П. Нелинейные волны в одномерных дисперсных системах. – М.: Мир, 1983.
8. Bady M., Kato S., Takahashi T., Huang H. Experimental investigations of the indoor natural ventilation for different building configurations and incidences // Building and Environment. – V. 46, № 1, 2011. P.65...74.
9. Kielin Ja., Porowski R., Malozięć D., Majka A., Lesiak P. Facility for firefighting training of ksrq rescuers: analysis of requirements and possible solutions // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. – V. 32, 2013. P. 115...121.
10. Halvoňová B., Melikov A.K. Performance of "ductless" personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation: impact of intake height // Building and Environment. – V. 45, № 4, 2010. P.996...1005.
11. Яременко С.А., Панов М.Я., Бараков А.В., Колосов А.И. Влияние параметров воздушного потока на эффективность глушителей шума // Научный вестник Воронежского гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2014, № 4 (36). С. 22...30.
12. Пузач С.В., Колодяжный С.А., Колосова Н.В. Модифицированная зонная модель расчета термодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной колонки // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. Т. 24, № 12. С. 33...39.
13. Колодяжный С.А., Переславцева И.И. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия Казанского гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2014, № 4. С. 403...412.

1. Polosin I.I., Derepasov A.V. Modelirovanie ventiljacionnyh processov v proizvodstvennyh pomeshhenijah s proemami v mezhdujetazhnyh perekrytijah // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2011, № 2. S. 43...51.
2. Polosin I.I., Garmonov K.V., Plotnikov A.V. Primenenie teorii ventiljacionnyh struj k raschetu koncentracij vrednyh veshhestv v prizemnom sloe atmosfery // Jekologija i promyshlennost' Rossii. – 2014, №2. S. 30...34.
3. Pejn G. Fizika kolebanij i voln. – M.: Mir, 1976.
4. Minskij E.N. O pul'sacijah skorostej pri vpolne ustanovivshemsja turbulentnom potoke // ZhTF. – 1940. T.10, vyp. 19. S. 1574...1581.
5. Kolmogorov A.N. Lokal'naja struktura turbulentnosti v neszhimaemoj zhidkosti pri ochen' bol'shijh chislah Rejnol'dsa // Doklady AN SSSR. – 1941. T. 30, vyp. 4. S. 290...303.
6. Shepelev I.A. Ajerodinamika vozdušnyh potokov v pomeshhenii. – M.: Strojizdat, 1978.
7. Bahtnogar P. Nelinejnye volny v odnomernyh dispersnyh sistemah. – M.: Mir, 1983.
8. Bady M., Kato S., Takahashi T., Huang H. Experimental investigations of the indoor natural ventilation for different building configurations and incidences // Building and Environment. – V. 46, № 1, 2011. P.65...74.
9. Kielin Ja., Porowski R., Malozięć D., Majka A., Lesiak P. Facility for firefighting training of ksrq rescuers: analysis of requirements and possible solutions // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. – V. 32, 2013. P. 115...121.
10. Halvoňová B., Melikov A.K. Performance of "ductless" personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation: impact of intake height // Building and Environment. – V. 45, № 4, 2010. P.996...1005.
11. Jaremenko S.A., Panov M.Ja., Barakov A.V., Kolosov A.I. Vlijanie parametrov vozdušnogo potoka na jeffektivnost' glushitelej shuma // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. – 2014, № 4 (36). S. 22...30.
12. Puzach S.V., Kolodjazhnyj S.A., Kolosova N.V. Modificirovannaja zonnaja model' rascheta termogazodinamiki požara v pomeshhenii, uchityvajushhaja formu konvektivnoj kolonki // Pozharovzryvobezopasnost'. – 2015. T. 24, № 12. S. 33...39.
13. Kolodjazhnyj S.A., Pereslavceva I.I. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki osnovnyh opasnyh faktorov v nachal'noj stadii požara // Izvestija Kazanskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. – 2014, № 4. S.403...412.

Рекомендована кафедрой теплогазоснабжения и нефтегазового дела. Поступила 01.06.16.